

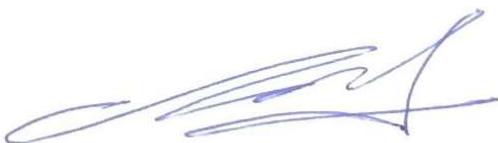
МОГИЛЬНЕР Леонид Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ
ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА)**

Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностика
в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

КАЧАНОВ Владимир Климентьевич

ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», профессор

доктор технических наук, профессор

ВОПИЛКИН Алексей Харитонович

ООО "НПЦ Эхо+", генеральный директор

член-корреспондент РАН,

доктор физико-математических наук

РИНКЕВИЧ Анатолий Брониславович

Институт физики металлов УРО РАН,

заведующий лабораторией углеродных

наноматериалов

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина», г. Москва**

Защита диссертации состоится «**13**» мая **2021** г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат технических наук



Щипаков Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Трубопроводные транспортные системы и трубопроводы различного назначения – кровеносная система топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Протяженность магистральных трубопроводов на территории Российской Федерации превышает 220 тысяч километров. Помимо собственно трубопроводов линейной части, они включают в себя многие сотни площадочных объектов: перекачивающие и компрессорные станции, резервуарные парки, порты. Большая часть этих промышленно опасных объектов находится в эксплуатации более 20 лет. Поэтому при эксплуатации магистральных трубопроводов особое внимание уделяется обследованию, диагностированию, мониторингу их состояния. При этом один из основных применяемых методов неразрушающего контроля конструкций, оборудования, технологических трубопроводов – ультразвуковой контроль (УК) материалов, труб и сварных соединений. Объем применения этого вида контроля при диагностировании стальных сооружений может достигать 50% и более от общего объема применяемых физических методов контроля.

Методические основы применения ультразвукового контроля на объектах трубопроводного транспорта разработаны в отраслевых (ЦНИИТМАШ, НИИ Мостов ЛИИЖТ, МНПО «Спектр», НИИХИММАШ, ВНИИСТ) и академических институтах (ИЭС им. Е.О. Патона, ИФМ РАН), в лабораториях и на кафедрах высших учебных заведений (МГТУ им. Н.Э. Баумана), научно-инженерных центрах (ООО «Эхо+», ООО «Акустические контрольные системы»). Используется богатый зарубежный опыт Национального центра неразрушающего контроля (National NDT Centre, Harwell, Великобритания), фирм OLYMPUS (ранее – Крауткремер, Германия), Sonatest (Англия-США), программных продуктов CIVA (Франция) и других. Развитие теории и практики ультразвукового контроля продолжается также в ООО «НИИ Транснефть», НИУ МЭИ, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, УГНТУ, ряде других институтов и ВУЗов.

Современная теория ультразвукового контроля развита в работах И.Н. Ермолова, А.К. Гурвича, Н.П. Алешина, А.Х. Вopilкина, М.В. Григорьева, Г.Я. Дымкина, В.Г. Щербинского, J. и H. Krautkramer, J.D.Achenbach, ряда других отечественных и зарубежных ученых и инженеров. Предложены и внедрены в практику критерии оценки формы дефектов, что позволило существенным образом повысить информативность и эффективность ультразвукового контроля. Для уточнения параметров дефектов в настоящее время широко применяются дифракционные методы ультразвукового контроля. Известен вклад в их развитие перечисленных отечественных школ и зарубежных ученых M.G.Silk, R.K.Chapman, J.M.Coffey, J.P.Charlesworth, J.A.G.Temple и ряда других. В этой связи необходимо отметить, что повышение точности измерения размеров дефектов, дефектометрия – одна из основных проблем, стоящих сегодня перед теорией ультразвуковой дефектоскопии. Для развития этого направления необходимо детальное изучение особенностей рассеяния ультразвука на острие дефекта. Другая важнейшая проблема связана с тем, что УК может «не замечать» слабо раскрытые, полупрозрачные для ультразвуковых волн дефекты типа несплавлений и стянутых

трещин вблизи их вершин. Выявление этих зон особенно важно для прогнозирования скорости роста трещины и расчета ресурса конструкций с дефектами. До настоящего времени не были решены некоторые задачи рассеяния ультразвука на таких дефектах. Наконец, для существенного повышения производительности обследований и снижения их трудоемкости и стоимости необходимо развивать методологию УК так, работы можно было проводить без удаления антикоррозионных покрытий металлоконструкций. Перечисленные пробелы в теории УК не позволяют с необходимой точностью определять параметры развивающихся дефектов, в том числе – в конструкциях трубопроводов.

Цель и основные задачи

Целью диссертационной работы является повышение информативности и достоверности ультразвукового контроля конструкций и сварных соединений при диагностировании объектов трубопроводного транспорта на основе теоретического и экспериментального исследования рассеяния упругих волн на объемных и плоскостных дефектах, в том числе – полупрозрачных для ультразвука.

Основные задачи исследований

1. Анализ информативных признаков, используемых при оценке формы и ориентации дефектов при ультразвуковом контроле.
2. Анализ теоретических подходов к оценке формы и размеров дефектов.
3. Теоретическое исследование рассеяния упругих волн на плоскостных и объемных дефектах, характерных для конструкций и сварных соединений объектов трубопроводного транспорта.
4. Теоретическое исследование прохождения ультразвуковых волн через «полупрозрачные» дефекты и антикоррозионные покрытия металлоконструкций.
5. Экспериментальная верификация полученных теоретических решений.
6. Формирование требований к методикам контроля конструкций и сварных соединений при диагностировании объектов трубопроводного транспорта, и разработка методических рекомендаций и нормативных документов, реализующих разработанные методики.

Методы решения

При решении поставленных задач использовались аналитические, численные и экспериментальные методы исследования распространения ультразвуковых волн в упругих средах, методы теории вероятностей и математической статистики.

Для подтверждения результатов и выводов, сделанных в работе, использованы экспериментальные данные, полученные при лабораторных, стендовых и приемочных испытаниях, а также при опытно-промышленной эксплуатации разработанных методик и производственном контроле конструкций на магистральных трубопроводах и других объектах топливно-энергетического комплекса, жилищно-коммунального хозяйства и ряда смежных отраслей.

Научная новизна

1. На основании решения задач рассеяния упругих волн на моделях плоскостных и объемных дефектов установлено, что при облучении мишени ограниченных размеров поперечной волной, вертикально поляризованной

относительно поверхности мишени, при эхо- и дифракционных методах ультразвукового контроля основной причиной немонотонного характера изменения амплитуды принимаемых от дефектов сигналов при монотонном изменении размеров дефектов является интерференция зеркально-отраженных волн с волнами, распространяющимися вдоль поверхности мишени в виде волн Релея и рассеивающимися на них, а также с боковыми волнами, которые переизлучаются с поверхности мишени. При облучении мишени продольной волной или поперечной волной, горизонтально поляризованной относительно поверхности мишени, основной вклад в результирующий сигнал дают зеркально-отраженные волны (при их наличии в эхо-методе) и волны одного типа с падающей, дифрагированные на мишени.

2. В упругой трехмерной постановке рассмотрены задачи рассеяния ультразвуковых волн на дефектах различной формы. Установлено, что при рассеянии продольных и поперечных волн на дефектах ограниченных размеров (от длины волны и более) осцилляции амплитуды регистрируемых эхо-импульсов, связанные с интерференцией сигналов различной природы, рассеиваемых дефектом, препятствуют измерению размеров дефектов и могут привести к повышению погрешности измерений.

3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при рассеянии поперечной волны, вертикально поляризованной относительно поверхности плоскостного дефекта с высотой от одной длины волны и более в сечении основного материала или сварного шва, основной вклад в осцилляции амплитуды регистрируемых сигналов дает рассеяние на нижнем ребре этого дефекта волны Релея, возбуждаемой падающей объемной волной на его верхнем ребре. Этот эффект определяет ограничение в 2 длины волны на возможность измерения минимальной высоты дефекта и глубины залегания дефекта при эхо-методе, и ограничивает минимальную погрешность измерения координат верхнего ребра дефекта в 1 длину волны при дифракционных методах ультразвукового контроля.

4. Теоретически и экспериментально исследовано прохождение упругих волн через лакокрасочные покрытия, используемые для защиты от коррозии металлоконструкций резервуаров, трубопроводов, оборудования. Установлены зависимости параметров сигналов, принимаемых от дефектов металлоконструкций, от угла наклона преобразователей, частоты колебаний и толщины покрытий. Показано, что для актуальных толщин покрытий в диапазоне от 0,1 мм до 0,5 мм для проведения контроля без удаления покрытий на частотах в диапазоне от 2,5 МГц до 5 МГц и углах ввода $45^\circ - 70^\circ$ значения поправочных коэффициентов к чувствительности контроля лежат в диапазоне 2 – 8 дБ. При этом также учтено наличие жидкости (продукта) внутри контролируемого объекта.

На защиту выносятся

1. Разработанный расчетно-экспериментальный метод выбора параметров ультразвукового контроля основного металла и сварных соединений для выявления недопустимых дефектов эксплуатационного происхождения: плоскостных типа

трещин, в том числе – полупрозрачных для ультразвуковых волн, и объемных типа свищей.

2. Критерии допустимости использования локальных мишеней для моделирования рассеяния упругих волн на плоскостных дефектах типа трещин и объемных протяженных дефектах, и соответствующие критерии, определяющие возможность и точность измерения размеров таких дефектов в сечении изделия или сварного соединения.

3. Общие подходы к повышению выявляемости полупрозрачных дефектов методами ультразвукового контроля, разработанные на основе предложенной систематизации таких дефектов.

4. Комплекс технических решений по выполнению контроля качества металла и сварных соединений стенки оборудования, конструкций и сооружений, при наличии наружного и внутреннего антикоррозионного лакокрасочного покрытия, нефти и нефтепродуктов на внутренней стенке, и методы реализации этих решений.

Практическая значимость результатов работы

1. На основе разработанных расчетных моделей выявления плоскостных и объемных дефектов основного материала и сварных швов, в том числе при прохождении ультразвуковыми волнами полупрозрачных слоев и дефектов, определены типы отражателей для настройки и проверки параметров ультразвукового контроля, поверки оборудования. Предложены технологии настройки и схемы сканирования изделий.

2. На основе проведенного комплекса исследований разработана и внедрена технология контроля качества основного металла и сварных соединений трубопроводов различного назначения и металлоконструкций стальных резервуаров с нефтью и нефтепродуктами без удаления антикоррозионных покрытий. Разработаны и утверждены руководящие документы и отраслевые стандарты, определяющие порядок применения разработанных технологий в условиях диагностирования объектов в период их эксплуатации.

3. Практическая ценность работы подтверждена внедренными в практику эксплуатации трубопроводных систем нормативными документами Российского и отраслевого уровня, которые были разработаны по результатам исследований, вошедших в диссертацию. В том числе внедрено: по линии Ростехнадзора – 4 Руководящих и методических документа, в системе трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 21 Руководящий документ и Отраслевой регламент, в системе ОАО «Газпром» - 2 Стандарта организации, и т.д.

Апробация работы

Основные результаты исследований, представленные в работе, докладывались более чем на 20-ти Всемирных, Европейских, Российских и отраслевых конференциях, в том числе, начиная с 2000 года, на конференциях:

– 15-я (Рим, 2000) и 16-я (Монреаль, 2004) Всемирные конференции по неразрушающему контролю (World Conference on Nondestructive Testing);

- 3-я Международная конференция «Диагностика трубопроводов», Москва, 2001;
- XVI Российская научно-техническая конференция "Неразрушающий контроль и диагностика», XXI и XXII Всероссийские конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 2002, 2017, 2020;
- 10-я (Москва, 2010) и 12-я (Гетеборг, 2018) Европейские конференции по неразрушающему контролю (European Conference on Non-Destructive Testing);
- Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде, Уфа, 2016;
- V международная научно-практическая конференция, посвященная 20-ти летию АО «Казтрансойл», Алматы, 2017;
- VII Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2017), Москва, 2017;
- Научный семинар кафедры Технология сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2020.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 57 научных статей, в том числе 24 работы общим объемом 5,3 п.л. – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук, включая 19 работ в журналах, индексируемых в настоящее время в системах Scopus и/или Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка использованной литературы из 214 наименований, 9 приложений. Изложена на 349 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков, 42 таблицы.

Благодарности

Автор благодарит академика РАН, д.т.н., проф. Н.П. Алешина за многолетний интерес и внимательное отношение к работам автора, а также за критические замечания, которые помогли оформить настоящую рукопись. Также автор благодарит коллективы ООО «НИИ Транснефть» и кафедры Технология сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана за содействие в выполнении исследований, использованных в настоящей работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Отмечено, что большая часть магистральных трубопроводов – промышленно опасных объектов, введена в эксплуатацию 20 – 50 лет назад. В настоящее время для обеспечения эксплуатационной надежности трубопроводов линейной части, сооружений и оборудования перекачивающих и компрессорных станций, резервуарных парков, нефтебаз (далее, обобщенно – НПС) весьма актуальны вопросы обследования, диагностирования, мониторинга их технического состояния. При выполнении диагностирования необходимо в первую очередь

выявлять дефекты, которые развиваются при эксплуатационных нагрузках. Требуется не просто обнаружить дефект с заданной чувствительностью, но обеспечить измерение его параметров с точностью, достаточной для выполнения расчетов конструкций на прочность и долговечность. Эти вопросы не менее важны и для фиксации начального «облика» вновь вводимых трубопроводов при послестроительном диагностировании. При этом нельзя допускать необоснованного увеличения стоимости диагностирования. На основании таких подходов отмечены направления развития теории и методологии ультразвукового контроля, сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава

Для конструкций и сварных соединений, применяемых в составе оборудования и сооружений магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов, а также газопроводов различного назначения, проведен анализ условий выявления дефектов в ходе периодического диагностирования объектов с применением различных видов и методов неразрушающего контроля.

Отмечено, что между требованиями к выявлению дефектов при сооружении объекта и при его эксплуатации есть существенные отличия. После строительства, ремонта, реконструкции перед вводом объекта в эксплуатацию необходимо выявить и устранить все дефекты в соответствии с нормативными требованиями. Фактически в прошлые годы это требование сводилось к выявлению дефектов на пределе чувствительности оборудования для дефектоскопии. При эксплуатации цель выявления дефектов – определить техническое состояние объекта и его способность продолжать выполнять свои функции на проектных или иных режимах. Для этого необходимо измерить размеры дефекта с той точностью, которая позволит специалистам по механике разрушения выполнить расчеты и установить срок, в течение которого дефект должен быть устранен. Поэтому требования к измерению параметров дефектов при диагностировании устанавливаются для каждого конкретного изделия с учетом условий его эксплуатации. Они могут отличаться от аналогичных требований при строительстве. Соответственно, разработка технологии выявления и измерения параметров дефектов при диагностировании должна выполняться на основании требований к выявлению дефектов в условиях эксплуатации конкретных объектов.

С учетом этих замечаний на основе анализа литературных данных и собственных исследований установлено, что при диагностировании необходимо в первую очередь выявлять дефекты 3-х типов:

- трещины в прокате и в галтельных переходах литых деталей оборудования, ориентированные преимущественно по нормали к поверхности материала; их раскрытие – от сотых долей миллиметра, а в вершинах на участках своего развития – от единиц микрон. Составляя всего от 0,5% до 7% от общего числа дефектов, такие трещины являются причиной примерно 20% всех аварий на трубопроводах;
- свищи коррозионного происхождения и отпотины (негерметичность с локальным выходом продукта) диаметром от долей миллиметра; эксплуатация оборудования и резервуаров со сквозными дефектами корпусов запрещена;
- развивающиеся коррозионные повреждения металла.

При разработке технологии диагностирования следует учитывать, что на объектах НПС наиболее применимы металлоконструкции из углеродистых сталей: прокат, литье, поковки, сварные и бесшовные трубы. На газопроводах также применяются трубы из полиэтилена. Используются плоские или с малой кривизной сварные листовые конструкции толщиной от 6 до 28 мм (для газгольдеров возможны бóльшие толщины), сварные прямошовные и бесшовные трубы диаметром до 1420 мм с толщиной стенки 4 - 28 мм, фасонный прокат толщиной 4 – 10 мм, литые корпуса оборудования толщиной, преимущественно, до 60 мм. Материал высокопрочных труб может быть анизотропным и неоднородным, скорость ультразвука в зависимости от направления и глубины прозвучивания может отклоняться от табличных значений на 3% - 8%.

Обязательная конструкция на объектах магистральных трубопроводов – антикоррозионные покрытия. На надземных конструкциях толщина лакокрасочных покрытий – 0,3 – 1,5 мм (реже – до 6 мм). Если для обследования требуется зачистка поверхностей металла от таких покрытий, то затраты на эту операцию, например, на резервуарах, могут исчисляться миллионами рублей, часто превышая затраты на основные работы по обследованиям. Поэтому необходимы методы диагностирования, не требующие удаления антикоррозионного покрытия.

Исходя из изложенного, сформулированы требования к видам и методам выявления дефектов конструкций и сварных швов при диагностировании объектов трубопроводного транспорта в период их эксплуатации. Оптимальным средством для выполнения этих требований при одностороннем доступе к объектам является ультразвуковой контроль (УК). Он позволяет выявлять наиболее опасные дефекты – трещины в материале и сварных швах, как внутренние, так и выходящие на поверхность, а также коррозионные повреждения металла. Однако известны и слабые стороны УК: хуже выявляются объемные дефекты типа свищей – второй по опасности эксплуатационный дефект металлоконструкций, а также прерывистые или стянутые плоскостные дефекты, полупрозрачные для ультразвука. Также необходимы методики УК без удаления антикоррозионного покрытия и без освобождения объектов от продукта. В работе предложены возможные решения перечисленных проблем.

Вторая глава

Проведен анализ информативных признаков и теоретических подходов, используемых для оценки формы, размеров и координат дефектов. Общие схемы ультразвукового контроля различными методами при одностороннем доступе к конструкции иллюстрируются на Рис. 1 на примере сварного стыкового шва 1 в изделии 2 толщиной H . Дефект высотой h – мишень, на которой происходит рассеяние ультразвуковых волн. При использовании эхо-методов излучающие И и приемные П преобразователи 3 и 4 располагают на поверхности изделия с одной стороны от сварного шва, а в дифракционных методах приемные преобразователи устанавливают преимущественно в положении 5 и 6.

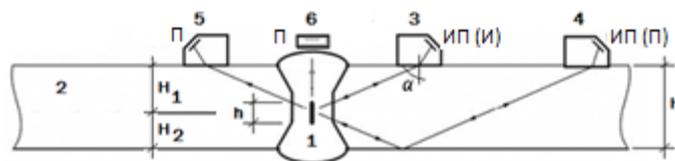


Рис. 1

Известен ряд критериев оценки формы дефектов: коэффициент формы для эхо-метода с использованием схем 3-3 и 3-4, отношение амплитуд зеркально отраженного и дифрагированного сигналов по схемам 3-3 и 3-6, соотношение времени приема и амплитуд дифрагированных сигналов по схеме 3-5 и другие. С учетом необходимости выявления вертикально ориентированных трещин и свищей, в рамках упругой модели специального рассмотрения требует рассеяние ультразвука на следующих наиболее важных мишенях: протяженной и локальной вертикальной трещине, протяженном и локальном объемных дефектах.

На Рис. 2 слева направо схематично показаны диаграммы рассеяния ультразвука на таких дефектах. Лучи A_z (синие) и A_d (зеленые) иллюстрируют направления распространения зеркально-отраженных и дифрагированных сигналов. Видно, как на разных мишенях рассеивается разное количество волн разного типа.

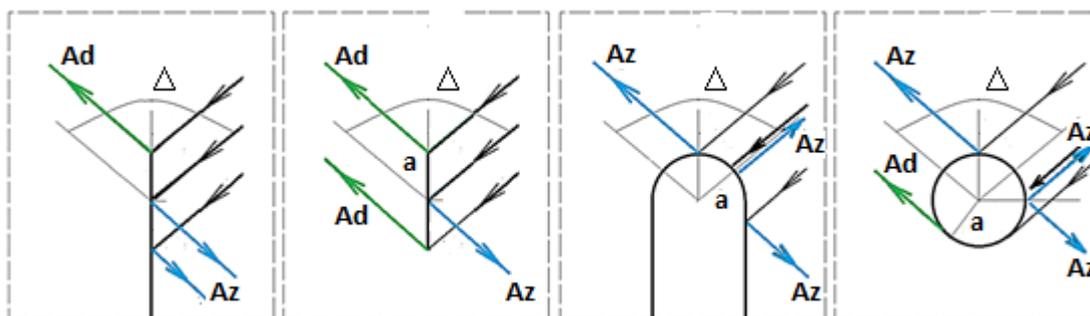


Рис. 2

Хорошо известно, что в методах отражения тип дефекта определяется путем анализа соотношения амплитуд сигналов, рассеянных в разных направлениях, а в дифракционных методах основной анализируемый признак – время приема сигналов разного типа, рассеянных дефектом. Однако теоретические вопросы рассеяния волн на плоскостных дефектах не решены в полной мере. Жидкостная (акустическая) модель, которая многие годы успешно использовалась в теории ультразвуковой дефектоскопии, не описывает взаимную трансформацию продольных и поперечных волн в упругих средах и эффекты, связанные с волнами Релея. Особенно явно погрешности расчетов по жидкостной модели проявляются при анализе интерференции сигналов различной природы, дифрагированных на дефектах с размером от длины волны ультразвука. В частности, могут возникать осцилляции амплитуд регистрируемых сигналов, приводящие к ошибкам в идентификации типа дефекта, измерении его координат и размеров. Этот вопрос особенно важен при выявлении трещин ограниченного размера, а также дефектов, частично пропускающих через себя ультразвуковые волны, и объемных дефектов. Для практики диагностирования необходимо обеспечивать максимальную чувствительность к объемным дефектам, без снижения чувствительности к плоскостным дефектам и с обеспечением необходимой точности измерения

их размеров и координат. В связи с изложенным во второй главе выполнена общая постановка 3-х мерных задач рассеяния ультразвуковых волн на протяженных и локальных плоскостных и объемных дефектах в упругих материалах и сварных швах. Далее в работе проводится решение этих задач в приложении к актуальным задачам ультразвуковой дефектоскопии.

Третья глава

Выполнена детализация вопроса о повышении выявляемости объемных дефектов типа сквозных и несквозных свищей в основном металле и сварных швах. На таких мишенях ультразвук рассеивается в значительно более широком диапазоне углов по сравнению с рассеянием на плоскостных отражателях такой же апертуры. Формирование индикатрисы рассеяния может быть связано с интерференцией сигналов, зеркально отраженных и дифрагированных на таких мишенях. Игнорирование этого факта в период развития технологии ультразвукового контроля в 60-е – 70-е годы 20-го века даже привело к ошибочному мнению о том, что цилиндрический отражатель нельзя использовать для настройки чувствительности ультразвукового контроля, поскольку амплитуда рассеянного на нем сигнала осциллирует с ростом диаметра отражателя. Однако, позже было доказано, в том числе, в кандидатской диссертации автора настоящей работы, что при озвучивании цилиндрической мишени перпендикулярно к ее оси, причиной этих осцилляций является как раз интерференция зеркально-отраженного от цилиндра сигнала с дифрагированными, огибающими цилиндр.

В настоящей главе приведены материалы теоретических и экспериментальных исследований, на основании которых ранее полученные результаты распространены на 3-х мерную задачу рассеяния упругих волн на цилиндрической мишени при произвольном угле озвучивания. В рассеянном поле выделены зеркально отраженные и дифрагированные на мишени сигналы, определены направления распространения сигналов каждого типа, условия их интерференции. На этой основе разработаны критерии, при выполнении которых интерференция сигналов разной природы не возникает. Установлено, что для отсутствия осцилляций необходимо, чтобы выполнялись условия:

$$D \geq \Delta T / K_{L,T}, N \geq \left(\frac{c_L}{2}\right) \Delta T, \text{ где } N = \min(N_1, N_2). \quad (1)$$

Здесь D – диаметр сверления; ΔT – длительность ультразвукового импульса; $N_{1,2}$ – расстояния от поверхностей образца до области мишени, в которой формируются рассеянные сигналы (см. Рис. 1). Коэффициент $K_{L,T}$ определяется параметрами среды, включая скорости c_L и c_T продольной и поперечной волн, и направлениями озвучивания мишени, и не зависит от координат мишени.

При выполнении условий (1) следует ожидать монотонного изменения амплитуд сигналов при росте размера (диаметра) мишени, т.е. максимальной точности измерения размеров дефекта. При этом амплитуда зеркально-отраженных сигналов растет, а амплитуда сигналов, огибающих цилиндр – падает с ростом его диаметра. Соотношение амплитуд этих сигналов зависит также от поляризации ультразвуковых (поперечных) волн в металле. За счет возбуждения на поверхности дефекта волн Релея дифракция (огибание дефекта) SV-волной (т.е. поперечной волной, вертикально поляризованной относительно отражающей поверхности

дефекта), проявляется значительно сильнее, чем при озвучивании объемных дефектов продольной волной (Р-волна) или горизонтально поляризованной относительно отражающей поверхности дефекта поперечной волной (SH-волна). Соответственно, и коэффициент отражения зеркально-отраженной волны в SV-случае, как правило, меньше, чем в Р- и SH- случаях. Этот эффект можно использовать для повышения выявляемости объемных дефектов методами ультразвуковой дефектоскопии. Реализация показана на Рис. 3, а, на примере озвучивания вертикального цилиндрического отверстия (свища).

В схемах такого типа, назовем их «дуэт», плоскости поляризации источника и приемника в поперечной волне развернуты на угол 2Δ . При этом поперечная волна, наклонно падающая на вертикально расположенную мишень (см. горизонтальную штриховку на рисунке), имеет относительно рассеивающей поверхности SV- и SH-компоненты, и амплитуда последней возрастает с увеличением угла 2Δ от 30° до 120° .

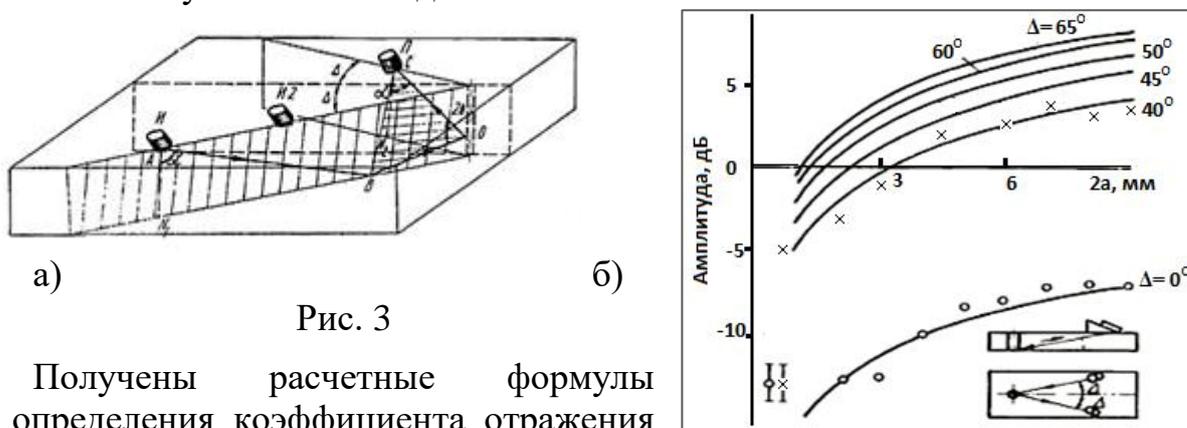


Рис. 3

Получены расчетные формулы для определения коэффициента отражения волн разного типа от центральной части цилиндрической полости $R_{\text{эф}}$. Показано, что для стали толщиной $H \geq 10$ мм при типичной полуширине основного лепестка диаграммы направленности преобразователя $\varphi < 10^\circ$ и углах ввода α в диапазоне $40^\circ - 70^\circ$, центральная часть сверления озвучивается как бесконечный цилиндр независимо от 2-х уголкового цилиндрических отражателей, образованных пересечением мишени с поверхностями изделия. Эти три зоны можно при эхо-методе контроля рассматривать как независимые отражатели. Высота центрального участка Δy может быть оценена по формуле: $\frac{\Delta y}{H} = 1 - \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}(\alpha + \varphi)}$, так что максимальное значение величины $\frac{\Delta y}{H}$ находится в диапазоне $0,3 - 0,5$. Учитывая также угол призмы β , коэффициенты прохождения поперечной волны через границу призма-изделие D_{LS} , отражение поперечной волны от донной поверхности $R_{SV}(\beta)$, затухание волн в призме $\delta_{\text{п}}$ и в изделии δ , площадь пьезопластины S , путь ультразвука в преобразователе $r_{\text{п}}$ и приведенный путь по металлу r , а также его путь в металле R от точки ввода до отражения от мишени, получена удобная инженерная формула для определения амплитуды сигнала, зеркально отраженного от цилиндра:

$$P = \sqrt{\frac{a}{2(R+r_0)} \frac{\cos \Delta}{\sin \alpha}} R_{\text{эф}} R_{SV}(\beta) \frac{S}{\lambda(R+r_0)} \exp\{-2\delta_{\text{п}} r_{\text{п}} - \delta(r + R)\} D_{LS} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (2)$$

Установлено расчетом и проверено экспериментально, что для сверлений (канальных дефектов) диаметром более 1 мм на частотах от 5 МГц или диаметром более 2 мм на частотах от 2,5 МГц зеркально отраженные и дифрагированные сигналы разрешаются во времени, не интерферируют и могут рассматриваться независимо друг от друга. На Рис. 3, б, сплошные кривые – расчетные, а точки – результаты экспериментов на частоте 5 МГц при $H = 10$ мм, $\alpha = 60^\circ$. (Нормировка – по сигналу от двугранного угла при $\Delta = 0^\circ$). Приведенные зависимости амплитуды сигнала, отраженного от вертикального цилиндрического отверстия, от диаметра отверстия $2a$, можно назвать диаграммами «амплитуда – диаметр». Параметром кривых является угол разворота преобразователей (источника и приемника) 2Δ . Аналогично можно получить формулы для углового цилиндрического отражателя. Следует только помнить, что, как и на плоскостных мишенях, необходимо избегать падения SV-компоненты на отражатель (цилиндр или донную поверхность) под углом, близким к 3-му критическому.

На основании строгого решения 3-х мерной задачи рассеяния упругих волн показано, что увеличение угла разворота преобразователей 2Δ от 0° до 120° приводит к увеличению амплитуды зеркально-отраженного сигнала в связи с увеличением доли той части падающей на цилиндр волны, которая горизонтально поляризована относительно его отражающей поверхности. При углах ввода $\alpha > 55^\circ$ оптимальны углы разворота 2Δ , превышающие 80° . Также показано, что схема «дзёт» с отражением от дна имеет преимущество перед аналогичной схемой без отражения: она позволяет за счет использования отражения поперечных волн по типу SH-волн одновременно повысить выявление вертикально ориентированных дефектов любого типа: объемных и плоскостных.

Еще одна конфигурация взаимного расположения пьезопреобразователей и дефектов, когда выявляемость объемных дефектов можно повысить, озвучивая дефект горизонтально-поляризованными относительно его отражающей поверхности волнами, это – «хордовая» схема прозвучивания для контроля сварных швов и основного материала стальных и полиэтиленовых труб диаметров 325 мм и ниже. В работе показано, что для настройки чувствительности по вертикальному сверлению в данном случае амплитуда зеркально отраженной волны рассчитывается по формуле $A_{эф} = R_{SV}A_{SV} \cos \gamma + R_{SH}A_{SH} \sin \gamma$, где: γ – угол между плоскостями поляризации и падения на цилиндр поперечной волны с амплитудой A_0 ; A_{SV} и A_{SH} – амплитуды SV и SH компонент в падающей на цилиндр поперечной волне, так что $A_0 = A_{SV} \cos \gamma + A_{SH} \sin \gamma$, R_{SV} и R_{SH} – коэффициенты отражения SV- и SH-волн. Для $2\Delta \leq 120^\circ$ можно считать, что R_{SV} зависит от угла Δ как для зеркального отражения SV волны от плоскости, $R_{SH} = 1$.

Четвертая глава

Проведено исследование 3-х и 2-х мерных задач рассеяния упругих волн на плоскостных мишенях (трещинах) – Рис. 4.

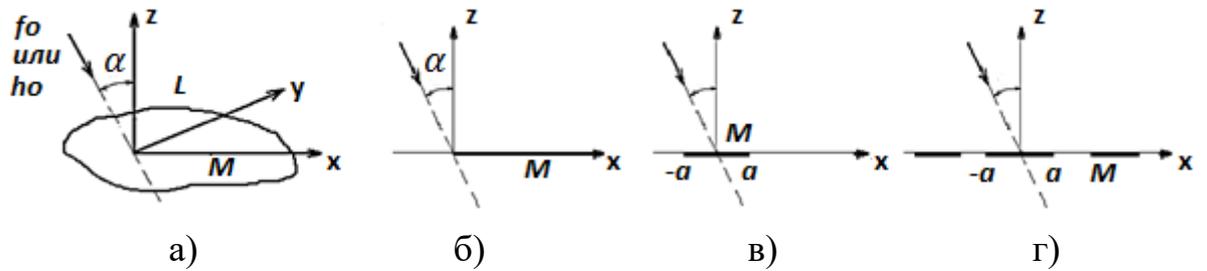


Рис. 4

Под «трещиной» будем понимать бесконечно тонкое препятствие, лежащее в плоскости $x, y, z = \pm 0$. Далее на поверхности трещины M будем писать $z = \sigma 0$, где через σ обозначен знак z . Эта поверхность может быть односвязной и ограниченной кривой L (Рис. 4, а), но может уходить на бесконечность и/или быть многосвязной. Две противоположные стороны трещины $x, y \in M, z = \sigma 0$ не взаимодействуют между собой нигде, кроме, разве точек кривой L . В однородной изотропной упругой среде на поверхностях трещины при $z = \sigma 0$, требуется выполнение 3-х условий: равенство нулю нормальных σ_{zz} и касательных σ_{zx} и σ_{zy} напряжений. В простейших случаях, можно говорить о трещинах в виде:

- полуплоскости $x \geq 0, -\infty < y < \infty, z = \sigma 0$ (Рис. 4, б);
- полосы $|x| \leq a, -\infty < y < \infty, z = \sigma 0$ или решетки из полос (Рис. 4, в, г);
- диска $x^2 + y^2 \leq a^2, z = \sigma 0$ (или $r \leq a, z = \sigma 0$), где a – радиус диска.

При падении упругой продольной (P) или поперечной (S) волны на плоскую трещину под некоторым углом α к нормали к ее поверхности, результирующее поле представляет собой сумму падающей и рассеянных волн. При этом вектор смещения частиц среды (векторы обозначены жирным шрифтом) записывают в виде: $\mathbf{U} = (U_x, U_y, U_z) = \mathbf{U}_L + \mathbf{U}_S$, где $\mathbf{U}_L = \text{grad } f$ – смещение в продольной P-волне, $\mathbf{U}_S = \text{rot } \mathbf{V}$ – смещение в поперечной S-волне. Скалярный и векторный потенциалы f и $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$, соответственно, удовлетворяют волновым уравнениям, или, для гармонических волн с круговой частотой ω - уравнениям Гельмгольца. В традиционной постановке граничные условия, выраженные через потенциалы f и \mathbf{V} , представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка, включающие смешанные частные производные искомых потенциалов. В этом случае решения 3-х мерных задач сложны и физический смысл полученных решений часто не очевиден. В работе предложено другое решение, особенностью которого является использование вспомогательной функции h , вводимой следующим образом: если \mathbf{z}^0 – орт оси z , то

$$\mathbf{V} = [\nabla h, \mathbf{z}^0] = [\text{grad } h, \mathbf{z}^0], \text{ т.е. } V_x = \frac{\partial h}{\partial y}, V_y = -\frac{\partial h}{\partial x}, V_z = 0 \quad (3)$$

Падающая поперечная волна произвольной поляризации как обычно рассматривается как суперпозиция SV- и SH-волн, и определены условия применимости представления (3) при решении 3D-и 2D- задач рассеяния P- и SV- волн на плоских мишенях.

Преимущество функции f и h заключается в том, что, используя их, можно исключить из уравнений (граничных условий) смешанные частные производные, и свести три граничные условия к двум следующим: при $x, y \in M, z = \sigma 0$

$$\left(\frac{1}{2} k_T^2 + \Delta_2\right) f + \frac{\partial}{\partial z} \Delta_2 h = 0, \quad \left(\frac{1}{2} k_T^2 + \Delta_2\right) h - \frac{\partial f}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь k_T - волновое число поперечной волны, $\Delta_2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \Delta - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, где Δ и Δ_2 операторы Лапласа в 3-х мерном пространстве и на плоскости (x, y) , соответственно. При этом граничные условия $\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$ заменены на второе уравнение в (4) с точностью до постоянных величин, которые в задачах о распространении волн можно, не нарушая общности, считать равными нулю.

Результирующее поле имеет вид $f(x, y, z) = f_o + f_d$, $h(x, y, z) = h_o + h_d$, где f_o или h_o – падающая Р- или SV-волна, $f_d^{(\sigma)}$ и $h_d^{(\sigma)}$ – искомые рассеянные поля – продольная и поперечная волны, соответственно.

Функции f и h удовлетворяют уравнениям Гельмгольца и граничным условиям, а функции f_d и h_d дополнительно условиям излучения на бесконечности и условиям на ребре. Если рассматривается импульсное излучение, то вместо уравнения Гельмгольца решаются волновые уравнения, и дополнительно вводятся начальные условия для функций f и h .

Общее решение системы уравнений (4) ищется как сумма ее частного решения и общего решения системы однородных уравнений, которая получается из (4) при $f_o \equiv 0, h_o \equiv 0$. При этом становится очевидной физическая интерпретация решения как суперпозиции продольных и поперечных волн, рассеянных по законам геометрической акустики от плоской части поверхности трещины, и волн Релея, возбуждаемых на ребре (ребрах) трещины. Например, по законам геометрической акустики рассеиваются волны:

$$\begin{cases} f_{\text{Зер}}^{(\sigma)} = A^{(\sigma)} \exp\{ik_L x \sin \alpha + ik_L \sigma z \cos \alpha\} \\ h_{\text{Зер}}^{(\sigma)} = B^{(\sigma)} \exp\{ik_T x \sin \beta + ik_T \sigma z \cos \beta\} \end{cases}, \quad (5)$$

где $k_L \sin \alpha = k_T \sin \beta$, т.е. $\frac{\sin \alpha}{c_L} = \frac{\sin \beta}{c_T}$, k_L - волновое число продольной волны, c_L и c_T – скорости продольной и поперечной волн, соответственно. Если падает продольная волна вида $f_o = \exp\{ik_L x \sin \alpha - ik_L z \cos \alpha\}$, то на теневой стороне трещины $A^- = -1, B^- = 0$, и зеркальное отражение отсутствует, а на освещенной стороне коэффициенты A^+ и B^+ совпадают, соответственно, с коэффициентом отражения продольной волны в продольную и коэффициентом трансформации продольной волны в поперечную SV-волну на свободной от напряжений плоскости (коэффициент B^+ – с точностью до постоянного множителя $ik_T \sin \beta$). Аналогично при падении SV-волны, на теневой стороне рассеянная SV-волна компенсирует падающую, а на освещенной стороне коэффициенты A^+ и B^+ соответствуют коэффициентам трансформации и отражения SV-волны. При этом также выделяются случаи скользящего падения волн вдоль трещины, и падение или трансформация SV-волны под 3-м критическим углом к поверхности трещины, когда согласно классической акустике особенно важно учитывать сдвиги фаз рассеянных волн и сдвиги ультразвуковых пучков при импульсном излучении.

В работе показано, что коэффициенты $A^{(\sigma)}$ и $B^{(\sigma)}$ в виде (5) имеют место для любой плоской мишени: полуплоскости, полосы, диска и т.д. (Рис. 4), а также

и для двух или любого другого количества рядом расположенных трещин. Например, для прерывистой трещины – «пунктир» с периодическим или произвольным расстоянием между отдельными частями (Рис. 4, г).

Общее решение на поверхностях трещины найдено при $f_o \equiv 0, h_o \equiv 0$ в виде:

$$f_R^{(\sigma)} = Y_f^{(\sigma)}(x, y) \exp\{i\sigma\alpha_L z\}, h_R^{(\sigma)} = Y_h^{(\sigma)}(x, y) \exp\{i\sigma\alpha_T z\}, \quad (6)$$

Здесь α_L и α_T – некоторые комплексные числа, на которые согласно условию излучения на бесконечности накладывається единственное ограничение: для выбранной зависимости от времени, например, в виде $\exp\{-i\omega t\}$, знак мнимой части выбирается так, чтобы выполнялись условия излучения при $z \rightarrow \sigma\infty$. Например, для рассеяния на диске $x^2 + y^2 \leq a^2, z = \sigma 0$ функции Y в полярных координатах (r, φ, z) найдены через функции Бесселя первого рода J_n :

$$\begin{cases} Y_f^{(\sigma)}(r, \varphi) = \sum_{-\infty}^{\infty} i^n C_{fn}^{(\sigma)} J_n(k_{R1}r) \cos n\varphi, \\ Y_h^{(\sigma)}(r, \varphi) = \sum_{-\infty}^{\infty} i^n C_{hn}^{(\sigma)} J_n(k_{R2}r) \cos n\varphi \end{cases}, \quad (7)$$

Аналогично для трещины, ограниченной эллипсом, эти функции записаны через функции Матье, для рассеяния на полуплоскости или полосе при падении волны нормально (2D-) или наклонно (3D-) к ребру – через экспоненту. В работе показано, что $k_{R1} = k_{R2} = k_R$, где k_R определяется из уравнения:

$$R(k_R) = \left(\frac{1}{2} k_T^2 - k_R^2\right)^2 - \alpha_L \alpha_T k_R^2 = 0, \quad (8)$$

и $\alpha_L = (k_R^2 - k_L^2)^{\frac{1}{2}}, \alpha_T = (k_R^2 - k_T^2)^{\frac{1}{2}}$. (значения корней – арифметические).

Формально (8) – уравнение Релея. Но относится оно не к поверхности упругого полупространства или полуплоскости (классические задачи), а распространено на поверхности трещины $z = \sigma 0$ с ребрами, ограничивающими ее размеры. При этом коэффициенты $C_{fn}^{(\sigma)}$ в (7) для диска и аналогичных трещин другой формы можно назвать коэффициентами дифракции волны Релея. Они определяются из условий на ребре трещины, и для выполнения (4) получено:

$$C_{hn}^{(\sigma)} = \gamma^{(\sigma)} C_{fn}^{(\sigma)}, \text{ причем } \gamma^- = -\gamma^+, \text{ где } \gamma^{(\sigma)} = -\frac{\sigma\alpha_{RL}}{\left(\frac{1}{2}k_T^2 - k_R^2\right)} = -\frac{\left(\frac{1}{2}k_T^2 - k_R^2\right)}{\sigma\alpha_{RT}k_R^2}.$$

В литературе имеются экспериментальные данные, подтверждающие этот результат, а именно – возбуждение волн Релея на ребрах трещины. Таким образом показано, что для трещин в виде полуплоскости, полосы и системы полос, а также для плоских трещин с границей в виде круга или эллипса функции $f_R^{(\sigma)}$ и $h_R^{(\sigma)}$ описывают волны Релея, возбуждаемые падающей объемной волной на ребрах трещин. Если, например, поверхность M прерывистая («пунктир», как на Рис.4, г), то каждую отдельную «черточку» в пунктире можно рассматривать как самостоятельную трещину, и для нее построить соотношения типа (6), чтобы затем объединить их при решении задачи рассеяния упругой волны на прерывистой трещине с учетом условий на ребре для каждой «черточки».

Для случая рассеяния продольной волны, падающей перпендикулярно ребру трещины-полуплоскости (2D-задача) соответствующее решение подробно рассмотрено в опубликованных источниках в потенциалах f и \mathbf{V} . В настоящей

работе эти результаты обобщены на случаи падения на ребро полуплоскости для 3D- задачи рассеяния P- или SV- (относительно поверхности M) волн, включая падение волн со стороны острия трещины и с противоположной стороны. Последний случай иллюстрируется на Рис. 5 при рассеянии в плоскости чертежа Рис.1. Цветами обозначены: синий, фиолетовый, красный – фронты поперечных, продольных и релеевских волн, соответственно, черным – направления 3-го критического угла, отделяющие зону геометрической тени для SV-волн при рассеянии P-волн. При этом результирующее поле помимо падающей волны включает в себя следующие составляющие: продольную трансформированную и поперечную зеркально отраженную волны с плоскими фронтами (в освещенной зоне), продольную и поперечную дифрагированные волны с цилиндрическими фронтами, двухсторонние поперечные (боковые) волны с плоскими фронтами и волны Релея на обеих поверхностях трещины. При рассеянии волны Релея, набегающей с некоторой задержкой на ребро трещины от противоположного ребра, к этим составляющим добавляются продольная и поперечная волны с цилиндрическими фронтами и боковые волны, возбуждаемые волной Релея – пункт 3 на Рис. 5.

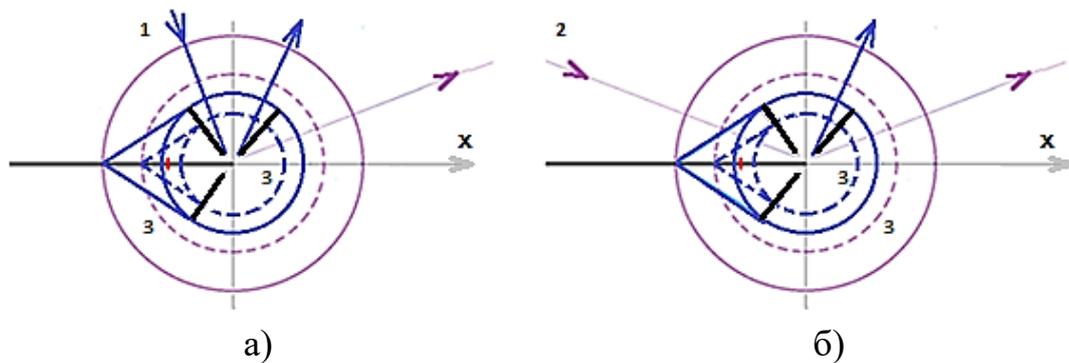


Рис. 5

Задача рассеяния поперечных волн, горизонтально поляризованных относительно поверхности M (SH-волна), аналогична классической задаче Зоммерфельда о рассеянии гармонической волны на полуплоскости (например, ультразвуковой волны в жидкости). Для этого случая рассеянное поле имеет следующие составляющие: зеркально отраженную SH-волну с плоским фронтом (в освещенной зоне) и поперечную дифрагированную SH-волну с цилиндрическим фронтом. При произвольной поляризации падающей поперечной волны рассеянные волны получаются после разложения этой волны на SV- и SH-компоненты относительно поверхности M , расчета рассеяния каждой из них по отдельности и последующего сложения полученных результатов. При этом из представления смещений через введенные функции f и h , следует, что при рассеянии P- и любой S-волны на трещине ограниченного размера, например, на диске, в результирующем поле присутствуют поперечные волны с SV- и SH-компонентами относительно поверхности мишени.

На Рис. 6 в плоскости Рис. 1 показана диаграмма рассеяния волн на трещине высотой h . Черным выделена падающая плоская P- или SV-волна. Прочие цвета:

- синий (длинная стрелка, направление – условное) – волны с плоскими фронтами, отраженные или трансформированные от освещенной поверхности трещины;

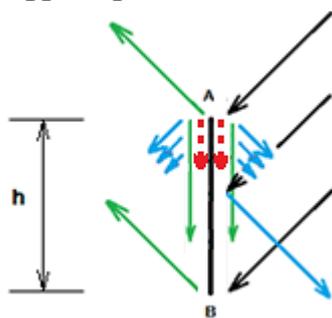
- зеленый – P- и SV-волны (или SH), дифрагированные на ребрах трещины в точках A и B; их фронты – цилиндрические при рассеянии на ребрах полосы (2D задача) или сферические при рассеянии на ребре диска (3D задача);

- короткие синие лучи – боковые SV-волны, переизлучаемые при падении P- и SV-волн продольными дифрагированными лучами, распространяющимися вдоль трещины; имеют плоские фронты для 2D задачи, и конические – для 3D;

- красный – волны Релея, излучаемые любым ребром для P- и SV-случаев.

Каждый из лучей, возбужденных на любом ребре трещины, может многократно рассеиваться на противоположном ребре. При падении поперечной SV-волны наибольший вклад в результирующее дифрагированное поле может дать волна Релея, возбужденная на верхнем ребре и после этого однократно рассеивающаяся на нижнем ребре трещины, а при падении продольной волны – продольные волны с цилиндрическими или коническими фронтами, однократно рассеянные на остриях трещины.

Сдвиг фаз между волнами, зеркально отраженными от поверхности трещины и дифрагированными на ее ребрах, зависит от ориентации трещины относительно



направления на источник и приемник ультразвука и от размера трещины (в данном случае – высоты $h=AB$). В результате интерференции рассеянных волн различной природы сигнал может осциллировать при монотонном изменении размера трещины. Особенно велика амплитуда этих осцилляций при рассеянии SV-волны в связи с возбуждением на поверхностях мишени волн Релея.

Рис. 6

При контроле поперечными волнами эхо-методом по схемам 3-3 и 3-4 (Рис. 1), сдвиг во времени между зеркально отраженным сигналом и сигналом, возбуждаемым волной Релея, возникшей на верхнем ребре и затем рассеянной на нижнем ребре трещины, можно оценить как $\Delta t = \frac{h}{\lambda} \frac{1}{2f \sin \alpha}$.

Например, для угла ввода $\alpha = 60^\circ$ и соотношении $\frac{h}{\lambda} = 2$ на частоте $f = 5$ МГц это дает ориентировочно 0,25 мкс. Поскольку длительность импульса, падающего на дефект, может составлять 2 – 3 периода, т.е. 0,4 – 0,6 мкс, то дифрагированные сигналы могут интерферировать с зеркально отраженным и исказить его амплитуду. В частности, поэтому при ультразвуковой дефектоскопии эхо-методом существует ограничение на минимальную высоту дефекта, которая может быть измерена по амплитудному признаку. Этот минимум как раз и составляет, ориентировочно 2 длины волны ультразвука на используемой частоте.

Приведенный теоретический анализ подтвержден экспериментами на моделях дискообразных мишеней и пазов. Это позволило наметить направления совершенствования методов ультразвукового контроля. При контроле эхо-методом продольной волной по схемам 3-3 и 3-4 (Рис.1), согласно Рис. 5 и Рис. 6, первыми

на приемник в любом случае проходят сигналы, создаваемые продольной волной, зеркально отраженной от трещины. В этом случае дифрагированные сигналы могут искажать только задний фронт отраженного импульса, т.е. они в меньшей степени влияют на измерение размера дефекта по амплитудному признаку. Однако при этом чувствительность контроля снижается примерно в 2 раза по сравнению с использованием поперечной волны, т.к. длина продольной волны в два раза больше длины поперечной. Снизить влияние дифрагированных сигналов на зеркально отраженный при эхо-методе также можно, если использовать поперечную волну, горизонтально поляризованную относительно отражающей поверхности дефекта. Этот путь аналогичен рассмотренному в главе 3 применительно к повышению выявляемости объемных дефектов. Но он, как правило, может быть реализован только при отдельных схемах контроля с вынесением источника И и приемника П из плоскости Рис. 1. Еще один путь снижения влияния на результаты ультразвукового контроля интерференции различных сигналов, возникающих при рассеянии ультразвуковых волн на дефектах – регистрация дифрагированных продольных волн в области слева от дефекта на Рис. 1, куда не приходят зеркально-отраженных волны. Известно, что такие схемы контроля реализованы в дифракционных методах – дифракционно-временном (TOFD), дельта методе и т.д. При этом в полном объеме можно использовать представленные результаты.

Пятая глава

Выполнена систематизация дефектов основного материала и сварных швов, полупрозрачных для ультразвука мегагерцового диапазона. Предложено классифицировать их по 3-м группам: «дефекты с заполнением», «прерывистые структуры» и «засоренность сварного шва». Такая классификация позволяет при выявлении и измерении параметров полупрозрачных дефектов системно подойти к вопросам о выборе модельных отражателей и о настройке комплекса «ультразвуковой дефектоскоп – преобразователь» с целью выявления дефектов.

Группа 1. Дефекты с заполнением представляют собой одиночные структуры со сплошной поверхностью, заполненные, хотя бы частично, веществом, пропускающим ультразвук. Противоположные поверхности дефекта могут контактировать друг с другом непосредственно или через тонкие окисные пленки, но не образуют единую непрерывную структуру. Например, раскатанное шлаковое включение может пропускать через себя до 90% энергии падающего пучка, если его толщина составляет 0,6 мм для продольной волны или 0,3 мм – для поперечной. Ультразвук слабо отражается от таких дефектов и выявлять их эхо-методом затруднительно. Такие дефекты характерны для контактной сварки стальных и пластмассовых труб, но встречаются и в сварных соединениях, выполненных сваркой проплавлением – несплавления и стянутые непровары. Их можно моделировать традиционными дисками, полосами, боковыми и вертикальными цилиндрическими сверлениями. Только границы таких мишеней необходимо считать не абсолютно мягкими или жесткими, а импедансными.

Далее, полая трещина с раскрытием $d_0 \approx 0,1$ мм практически не пропускает через себя ультразвуковые волны, и ее поверхности при моделировании рассеяния

ультразвука можно, по крайней мере, в общепринятом первом приближении, считать плоскими и свободными от напряжений. Однако вблизи острия на участке протяженностью 0,5 – 1 мм, что соизмеримо с длиной волны, ультразвук частично проходит через соприкасающиеся берега трещины. Это можно трактовать так, что в среде с акустическим импедансом Z_1 имеется бесконечно тонкая трещина, у которой пространство между берегами заполнено средой с акустическим импедансом Z_2 , зависящим от раскрытия трещины d . Если считать, что $d(x) \sim x$, где x – расстояние до острия (точки зарождения) трещины (Рис.7), и учесть, что $Z_2 = Z_1$ при $x = 0$ (острие трещины), $Z_2 \rightarrow 0$ при $x > \lambda$ (ориентировочно), то можно положить, что $Z_2 = Z_1 * (\lambda - x)$ при $0 \leq x \leq \lambda$, и $Z_2 = 0$ при $x > \lambda$.

Поскольку рассматриваются дефекты высотой в единицы миллиметров в сварных швах толщиной до 28 мм, то падающую волну можно считать плоской. Тогда, используя известные выражения для коэффициентов отражения R и прохождения D ультразвука для тонких слоев, получим зависимость этих коэффициентов от раскрытия трещины, т.е. от расстояния до ее вершины:



$$R = \left(\frac{d}{d_0}\right) R_0, D = 1 - R. \quad (9)$$

Здесь R_0 – коэффициент отражения ультразвуковой Р- или S-волны от свободной от напряжений трещины. Таким образом, если общая высота трещины в сечении, изображенном на Рис. 7, равна $2a$, то отражать ультразвук с коэффициентом отражения R_0 будет не вся трещина, а лишь ее участок длиной $(2a - 2\lambda)$.

Соответственно, индикатриса рассеяния такой трещины будет формироваться участком длиной $(2a - 2\lambda)$, где отражение происходит с коэффициентом R_0 , и участками на ее краях длиной λ каждый, где отражение происходит с коэффициентом R согласно (9). Подставляя (9) в известные формулы для расчета индикатрисы рассеяния плоской мишени, получим с учетом полупрозрачности участков вблизи острия трещины: индикатриса рассеяния окажется шире, чем при традиционных расчетах. Это приводит к увеличению погрешности измерения высоты и протяженности трещины при ультразвуковом контроле эхо-методом. При механизированном или автоматизированном сканировании этот эффект может оказаться особенно существенным, поскольку в этих случаях поиск абсолютного максимума рассеянного дефектом сигнала обычно не производится, и условные размеры дефектов могут оцениваться не на оптимальных участках его индикатрисы рассеяния. Указанное одинаково важно для использования классических одноэлементных пьезопреобразователей и для современных антенных решеток и систем с синтезированной апертурой.

Группа 2. Прерывистые структуры формируются цепочками близко расположенных дефектов типа представленных на Рис. 4, г, или периодическими конструктивными элементами контролируемого изделия, характерные размеры которых и расстояния между которыми соизмеримы с длиной ультразвуковой

волны. Примеры таких дефектов – прерывистые непровары, цепочки шлаковых или других включений. Еще пример – витки нагревательной проволоки при муфтовой сварке полиэтиленовых труб.

В опубликованных источниках можно найти аналитические решения задачи о рассеянии упругого импульса на некоторых прерывистых структурах. Однако эти решения часто не удается довести до расчетных формул, удобных для практического использования. В этом случае для моделирования рассеяния ультразвука актуальными представляются численные методы, в первую очередь – метод конечных разностей. Проще всего его можно реализовать в жидкостном приближении для рассеяния продольной волны, например, для сварных швов трубопроводов из полиэтилена. Сварные соединения таких трубопроводов также удобно применять для моделирования полупрозрачных дефектов первого типа.

Если в плоскости x, y на внешней прямоугольной границе рассматриваемой области (Рис. 8) задать функции источников звукового давления в виде:

$$g(X, Y, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, t > T; \\ A(X, Y, t) \sin(\omega t) & \text{при } 0 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (10)$$

где T – длительность исходного импульса, то в настоящей работе задача рассеяния импульса на плоских неоднородностях внутри этой области сведена к решению системы дифференциально-разностных уравнений, которая в векторной форме имеет вид: $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = R\varphi + \Phi$. Здесь φ – вектор искомых перемещений в узлах сетки, R – разностный оператор, Φ – вектор-функция звукового давления в граничных узлах сетки. Для численного интегрирования можно положить:

$$\begin{aligned} \varphi_{m+1}^H &= \varphi_m^H + H_1 R(\varphi_{m+1}^H, t_{m+1}^H); \\ \varphi_{m+1}^A &= \varphi_{m+1}^H + H_2 R(\varphi_{m+1}^H, t_{m+1}^H), \end{aligned} \quad (11)$$

где $H = H_1 + H_2$ – шаг цикла интегрирования; φ_{m+1}^H – значение вектора искомых перемещений после m -го цикла интегрирования; φ_{m+1}^A – исходное значение вектора для следующего шага интегрирования.

На Рис. 8 приведен пример результатов выполненного расчета рассеяния продольной волны на двух прерывистых дефектах, состоящих из 3-х фрагментов одинаковой ширины λ каждый, когда расстояние S между этими фрагментами различное: $S = \lambda$ на Рис. 8, а, и $S = \lambda/2$ на Рис. 8, б. При этом ширина непрозрачной части дефектов равна 3λ . Для сравнения на Рис. 8, в, приведен результат расчета рассеяния на сплошном дефекте, шириной 3λ , так что общая протяженность этих структур в плоскости чертежа уменьшается от 1-го дефекта к 3-му.

Граница «материал изделия–дефект» в данном примере – абсолютно жесткая, как для твердого включения в стыке полиэтиленовых труб. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – падающий импульс, 2 и 3 – рассеяние в верхнюю и нижнюю полуплоскости, соответственно. Сравнивая правые части Рис. 8, а, б, в, можно видеть, как один и тот же импульс рассеивается по-разному на таких дефектах, в том числе изменяется распределение амплитуд вдоль фронтов рассеянных волн, и амплитуды на фронтах рассеянных сигналов растут от 1-го случая к 3-му. Видно, что фронт рассеянной волны частично повторяет форму структуры дефекта. Ранее

эти эффекты трудно было наблюдать на А-скане. В настоящее время, используя ставшие традиционными дефектоскопы с фазированными решетками или системами с синтезированной апертурой, можно получать из контролируемого изделия развертки типа В (см. Рис. 8, г), вид которых аналогичен изображениям, полученным расчетным путем. По таким изображениям сечений можно получать дополнительную информацию о форме и размерах дефектов. Аналогичный эффект можно наблюдать и для прерывистых дефектов в сварных швах металлических изделий. При этом можно выявлять и детализировать структуру фронта рассеянного сигнала, которая несет информацию о структуре поверхности дефекта.

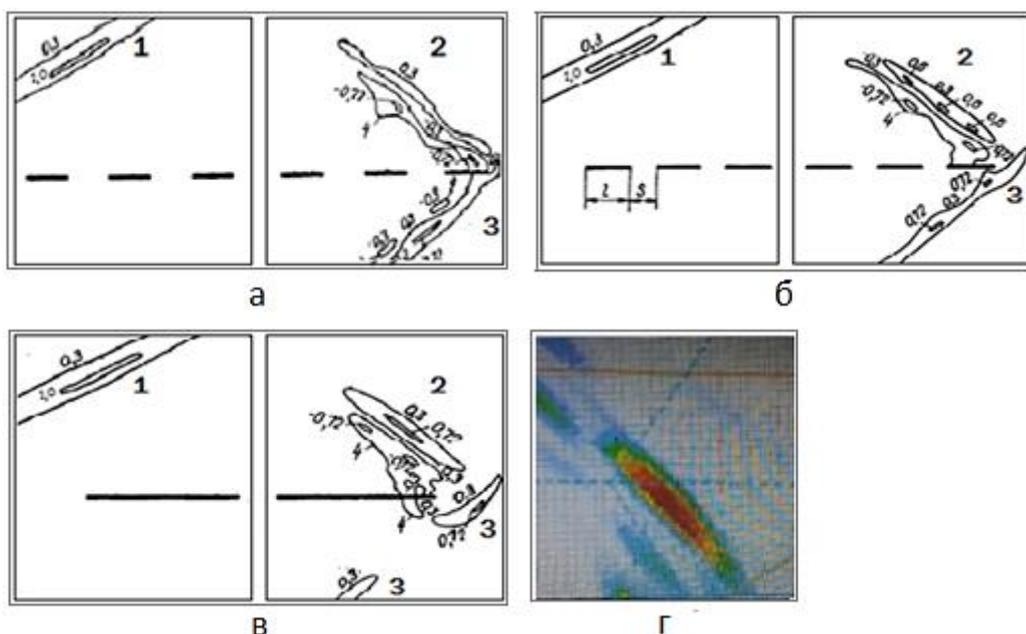


Рис. 8

Группа 3. В дефектах типа «засоренность сварного шва» мелкодисперсные инородные включения более или менее равномерно распределены в объеме зоны сплавления в сварном шве или на каком-либо его участке. Характерные размеры каждого включения и расстояния между ними в несколько раз меньше длины используемых ультразвуковых волн, а габаритные размеры всей группы включений составляют несколько длин волн. В качестве примеров таких дефектов можно привести скопления шлаковых включений в сварных соединениях, выполненных дуговой сваркой, или засоренность сварных швов металлических и пластмассовых труб песком при контактной сварке. Например, при толщине стенки соединяемых трубопроводов от 4 мм до 28 мм скопления пор в сварных швах стальных труб или скопление твердых включений в сварных швах полиэтиленовых труб имеют поперек шва ширину 5 – 10 мм.

Такие дефекты можно аппроксимировать сферами диаметром, ориентировочно, 0,1 – 1 мм. Для расчетов рассеяния ультразвука частотой от 1 МГц до 5 МГц можно считать, что диаметр включений составляет D от $0,1\lambda$ до $0,5\lambda$, а толщина слоя материала, в котором они находятся, составляет 4 – 8 длин волн, ориентировочно. Рассеяние ультразвука в данном случае зависит от концентрации включений σ , которую по данным радиографических исследований можно принять равной $\sigma = 0,5 - 0,7$. Таким образом дефект типа «засоренность сварного шва»

можно моделировать в виде находящегося в области сплавления фрагмента основного материала трубы, в котором равномерно распределены мелкие (относительно длины волны) сферические включения, твердые или полые. В прослойке материала с описанными мелкими включениями происходит реверберация ультразвука. При этом интенсивность рассеянных полей определяется законом Релея:

$$I \sim I_0 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \frac{\sigma D^6}{\lambda^4} \quad (12)$$

где: I_0 и I – интенсивности волн, падающей на слой и выходящей из него, соответственно, θ – угол между падающим лучом и направлением наблюдения.

Отсюда, в первом приближении можно считать, что индикатриса рассеяния дефектов типа «засоренность» – практически круговая в диапазоне углов $135^\circ \leq |\theta| \leq 180^\circ$ (направление $\theta = 180^\circ$ соответствует контролю эхо-методом по совмещенной схеме). В целом же путь ультразвуковой волны при наличии дефекта типа «засоренность» состоит из трех участков с различными свойствами, каждый из которых однороден:

- среда от точки ввода в изделие до засоренной прослойки;
- засоренная прослойка;
- среда от засоренной прослойки до точки наблюдения (приема сигналов).

Что касается условного размера такого дефекта, то вдоль оси трубы его можно по максимуму считать равным ширине наружного валика усиления (грата), а вдоль оси шва – измерить по падению амплитуды рассеянного сигнала на уровне -6 дБ от максимума.

Шестая глава

Рассмотрена другая сторона вопроса о полупрозрачных границах, а именно исследована возможность ультразвукового контроля и толщинометрии металла и сварных швов при наличии на поверхности сканирования антикоррозионного покрытия, а в контролируемом объекте – жидкости (нефти, нефтепродуктов).

Традиционные методики ультразвукового контроля требуют зачистки поверхностей металла до состояния Rz 40, поскольку, вообще говоря, наличие промежуточных слоев между преобразователем и изделием, либо наличие жидкости в изделии может существенно исказить форму, амплитуду и фазу сигналов от дефектов. Однако, учитывая отмеченную актуальность, в работе выполнены теоретические исследования и экспериментальное моделирование поведения реальных ультразвуковых импульсов при прохождении структур, представленных на Рис. 9.

Для этих условий Рис. 10 приведены схемы изменения размера контактной поверхности между преобразователем 3 и металлом 1 при прохождении ультразвука через промежуточный слой 2 толщиной d и обратно: иллюстрируются многократные отражения ограниченного в пространстве и времени ультразвукового пучка в слое.

С использованием диаграммной техники происходящее при этом уменьшение эффективной площади контакта при прохождении импульса из наклонного пьезопреобразователя в контролируемый металл и обратно (символ \updownarrow)

иллюстрируется на Рис. 11, а результаты выполненных расчетов и экспериментов – на Рис. 12.

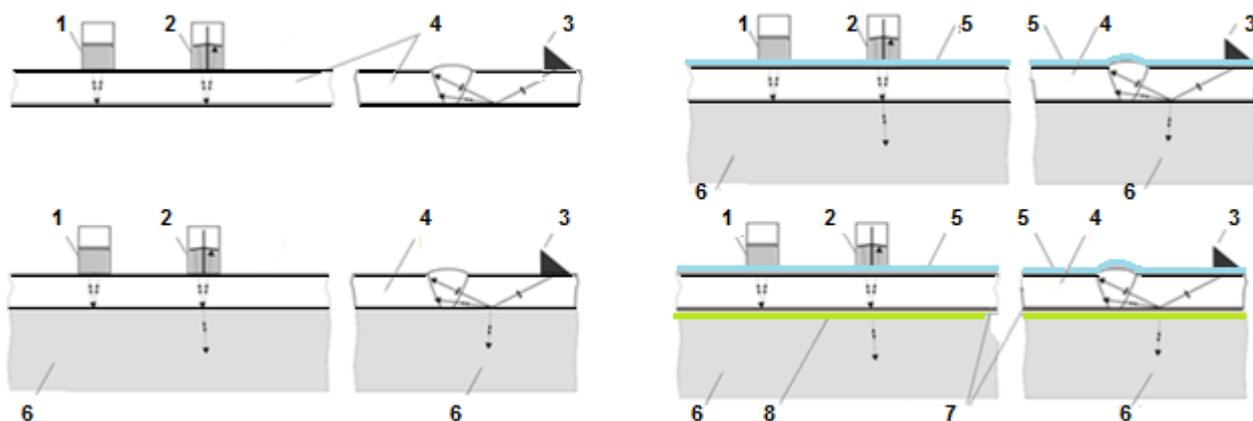


Рис.9.

1 – Прямой ПЭП, 2 – РС ПЭП, 3 – наклонный ПЭП, 4 – стенка РВС, 5 – слой наружного антикоррозионного покрытия, 6 – нефть, жидкости, 7 – слой внутреннего антикоррозионного покрытия, 8 – слой парафина

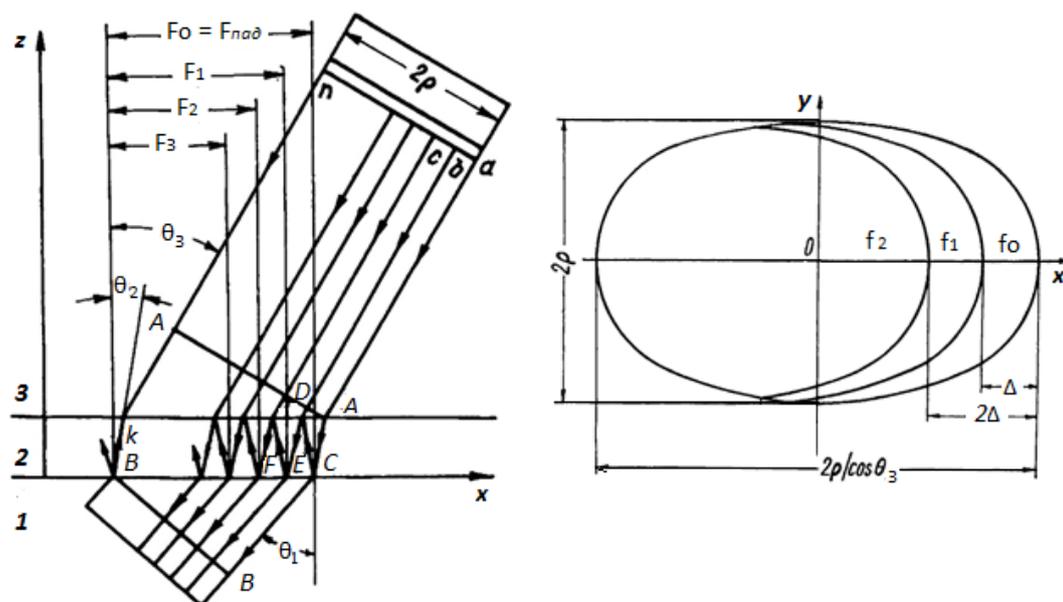


Рис. 10

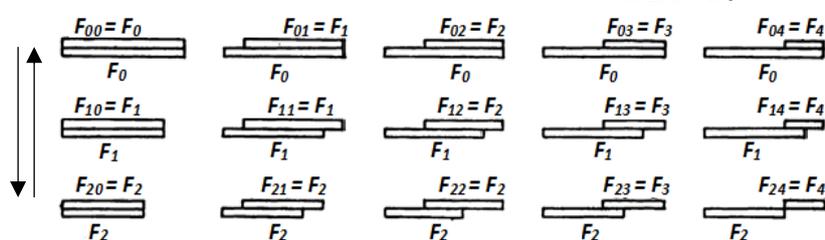


Рис. 11

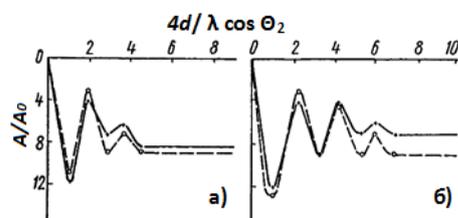


Рис. 12

На Рис. 11 через F обозначены участки контакта для пучка лучей после каждого отражения в слое. Первый индекс относится к прохождению в металл, а второй – к возвращению из металла. С помощью этих диаграмм показано, что для расчета прохождения ультразвукового импульса через слой в контролируемый

материал и обратно, достаточно представить этот импульс в виде трех последовательных участков: Φ_1 – крутой передний фронт с зависимостью от времени по линейному закону $a_1 t + b_1$, Φ_2 – колоколообразная центральная часть, которую можно аппроксимировать параболой с максимумом амплитуды в некоторый момент времени t_{max} , и Φ_3 – спад по экспоненте $\exp[-\beta(t - t_2)]$.

Получены необходимы параметры каждого участка $a_1, b_1, \beta, t_{max}, t_2$ и т.д., и выполнен расчет результирующего коэффициента прохождения через промежуточный слой в двух направлениях $\uparrow\downarrow$ с учетом интерференции сигналов и уменьшения площади контакта при каждом следующем переотражении в слое:

$$\Phi(t) = \sum_i j D_0 \Phi_i e^{i\omega t}, \quad (13)$$

где D_0 – коэффициент прозрачности границы «призма – контролируемый материал», определенный в отсутствии промежуточного слоя как при контактном ультразвуковом контроле эхо методом, а функции Φ_i помимо времени определяются площадью контакта при каждом переотражении.

Акустические свойства тонких слоев лакокрасочных покрытий близки к свойствам жидкости, и в данном случае расчеты достаточно проводить в жидкостном приближении. Эксперименты подтвердили результаты расчетов на примере прохождения пучков лучей через жидкие слои (нефть) изменяющейся толщины. Расчетные по (13) (сплошные кривые) и экспериментальные (пунктир) кривые приведены на Рис. 12 для условий: а) 2,5 МГц, угол ввода 50° ; б) 5 МГц, угол ввода 65° . Некоторое снижение измеренных в экспериментах амплитуд при большой толщине слоя можно объяснить затуханием ультразвука в нем.

Также в работе показано, что для коротких импульсов длительностью до 2-х периодов при прохождении через слой в обе стороны сдвиг ультразвукового пуча в плоскости контакта практически не наблюдается. При этом скорость убывания интерференционных экстремумов тем больше, чем меньше длительность импульса и диаметр ультразвукового пучка.

Для выявления дефектов на прямом и отраженном лучах по аналогичной схеме проведено теоретическое и экспериментальное исследование отражения и прохождения ультразвуковых волн через все слоистые системы, актуальные для условий контроля металла и сварных швов на стенке стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, в том числе – для прилегающих к призмам пьезопреобразователей структур типа «сталь-нефть», «сталь-слой парафина-нефть», «наружное защитное покрытие-сталь-внутреннее защитное покрытие-слой парафина-нефть» – Рис. 9. Приведем некоторые важные для практики результаты:

1. При увеличении толщины антикоррозионного покрытия в актуальном диапазоне от 140 до 500 мкм для углов ввода $60^\circ, 70^\circ$ происходит увеличение эффективной частоты ультразвука в импульсе до 10%; а для угла ввода 45° – уменьшение этой частоты до 14%.

2. При одновременном присутствии нефти и антикоррозионного наружного и внутреннего покрытия возможно отклонение амплитуд сигналов, отраженных от искусственных дефектов, на 1,3 – 2,3 дБ.

3. Нефть и антикоррозионное покрытие на внутренней поверхности стенки в отсутствие нефти могут привести к уменьшению чувствительности до 2,0 дБ. При этом парафин толщиной до 6 мм в составе слоев на чувствительность не влияет.

4. С учетом всех влияющих факторов, включая тип покрытия, установлено, что при качественной адгезии покрытия к металлу абсолютное значение коэффициента прохождения может меняться в пределах до 8 дБ при изменении толщины покрытия в диапазоне от 140 до 500 мкм. Зависимости этого коэффициента для всех актуальных типов покрытий однотипны, и, как правило, описываются кривыми с минимумом в диапазоне толщин покрытия 250 – 350 мкм.

Также определены требования к качеству адгезии покрытия к металлу, при которой контроль прямыми и наклонными преобразователями можно проводить через слой антикоррозионного покрытия без потери чувствительности.

В результате установлена возможность и определены границы для применения ультразвукового контроля и толщинометрии при наличии покрытий и жидкостей на поверхностях контролируемых металлоконструкций. Показано, что корректировку чувствительности при контроле через покрытие целесообразно проводить, вводя поправочные коэффициенты. Выполнен расчет этих коэффициентов в функции от толщины и типа покрытия для различных частот и углов ввода ультразвука. Результаты проверены экспериментально, необходимые коэффициенты внесены в табличные формы для покрытий, актуальных для эксплуатации стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. При необходимости выполнения обследования через какие-либо иные покрытия, поправочные коэффициенты могут быть определены в соответствии с разработанным алгоритмом.

В качестве общих рекомендаций к выбору параметров контроля установлено, что целесообразно уменьшать длительность излучаемого импульса и площадь контактной поверхности пьезопреобразователя. В этом случае, минимизируется влияние ограниченности пучка ультразвуковых волн и импульсного характера излучения на результаты контроля.

Седьмая глава

На основании выявленных в работе общих закономерности формирования сигналов, рассеянных на плоскостных и объемных дефектах типа трещин и свищей, сформулированы требования к методикам контроля конструкций и сварных соединений на объектах трубопроводного транспорта и в смежных областях. Также приведен обзор методических рекомендаций и нормативных документов по контролю, внедренных по результатам проведенных исследований.

Разработан простой и удобный для использования в инженерной практике критерий (1), определяющий возможность использования зеркально отраженных и дифрагированных сигналов независимо друг от друга. На основании этого критерия показано, что при настройке чувствительности по боковому цилиндрическому отражателю (БЦО) для поперечной волны в стали при совмещенной схеме необходимо в (1) использовать значение $K = 1,2$ (ΔT задается в микросекундах, а диаметр отверстия – в миллиметрах). Современные эхо-импульсные дефектоскопы, одноканальные и с фазированными решетками,

используют короткие ультразвуковые импульсы. Поэтому они практически не имеют ограничений по приему эхосигналов, зеркально отраженных от поверхности цилиндрических отверстий диаметром от 1 мм на частоте 5 МГц, от 2 мм на частоте 2,5 МГц, от 4 мм на частоте МГц, разрешая их во времени от сигналов, создаваемых дифрагированными волнами, огибающими цилиндр. Поскольку при этом амплитуда отраженных импульсов монотонно растет при увеличении диаметра сверления, а амплитуда дифрагированных (огибающих цилиндр) сигналов монотонно падает, то цилиндрические отражатели могут использоваться для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле эхо-методом по совмещенной схеме практически без ограничения диаметров.

В более общем случае применения отдельной схемы, продольных и/или поперечных волн, например, схемы, представленной на Рис. 3, а, коэффициент K в критерии (1) задается следующим образом:

$$K = \left\{ \frac{\cos \frac{\Delta}{2}}{c_{L,T}} + \frac{\pi}{2c_d} \left(1 - \frac{\Delta}{180} \right) \right\}^{-1}, \quad (15)$$

где Δ - угол (в градусах) между плоскостями ввода и вывода ультразвуковых волн; $c_{L,T}$ - скорость используемой (продольной или поперечной) волны в материале изделия, c_d - скорость неоднородной волны, скользящей вдоль поверхности цилиндра. При этом можно считать, что c_d равно c_R (скорость волны Релея) и/или c_T , если цилиндр облучается поперечной волной и принимается также поперечная волна, и $c_d = c_L$, если используется только продольная волна.

Поскольку коэффициент K для заданного материала (металл, полиэтилен) не зависит от глубины расположения сверления, то, например, используя меры, изготовленные по ГОСТ Р 55724-2013, по разнице времени приема сигналов, зеркально отраженного от БЦО диаметром 2 мм на глубине 8 мм, и огибающего этот БЦО, можно выполнять поверку временной развертки и точности работы глубиномера дефектоскопа, а также проверку разрешающей способности комплекса «дефектоскоп-преобразователь» по времени. При этом не требуются специальные пазы или другие дополнительные отражатели, например, в образце VI согласно вышеуказанному стандарту РФ или аналогичным зарубежным.

С учетом критерия (1) в работе показано, что простейшее вертикальное сверление, аналогичного представленному на Рис. 3, целесообразно шире применять для настройки чувствительности ультразвукового контроля. Такой отражатель просто изготовить и калибровать, а ограничения на применение определяются в основном возможным наложением зеркально-отраженного и огибающих цилиндр импульсов, которое легко может быть устранено при правильном выборе и настройке оборудования для контроля.

Для использования цилиндрического отверстия в качестве вертикального отражателя при имитации свищей разработан удобный методический прием, обеспечивающий повышение точности настройки оборудования. При озвучивании такого сверления с разных сторон (относительно направления проката) размах величин измеренных амплитуд из-за кривизны образцов и случайных отклонений оси сверления может составлять до 4 дБ. Это, разумеется, не позволяет выполнять настройку оборудования. Однако в работе установлено, что в широком диапазоне

углов ввода ультразвука при небольшом наклоне оси сверления амплитуда эхосигнала от пересечения цилиндрического сверления с поверхностью образца является нечетной функцией от угла наклона оси сверления, т.е. эта амплитуда меняется с противоположным знаком при развороте преобразователя на 180° . Следовательно, если чувствительность настраивать по полу-сумме амплитуд эхосигналов, отраженных от вертикального сверления с противоположных сторон, например, проводить усреднение по любой паре направлений 1 и 2, или 3 и 4, или 5 и 6, указанных на Рис. 13, то размах изменений пороговой амплитуды при случайных изменениях наклона оси сверления не превышает 1 дБ при среднеквадратическом отклонении 0,3 дБ.

С помощью такого простейшего усреднения можно выполнять корректировку чувствительности также с учетом возможной анизотропии структуры и акустических свойств проката.

Использование цилиндрических сверлений диаметром от 1 мм реализовано в ряде инструкций по ультразвуковому контролю сварных стыков труб различного назначения. При этом необходимая чувствительность к выявлению вертикальных трещин сохраняется.

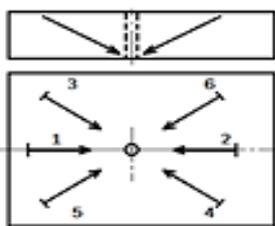


Рис. 13

Далее, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований прохождения ультразвука через слоистые лакокрасочные антикоррозионные покрытия разработан алгоритм расчета поправочных коэффициентов, учитывающих влияние толщины и типа антикоррозионных покрытий на чувствительность контроля, выполнены расчеты этих коэффициентов для покрытий, применяющихся при эксплуатации стальных резервуаров на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах. Также определены требования к качеству антикоррозионных покрытий и их адгезии к металлу, при выполнении которых допустимо проводить ультразвуковой контроль при наличии покрытия и/или продукта.

Поскольку поправочные коэффициенты определяются типом и толщиной антикоррозионного покрытия (стенки и днища стальных резервуаров, трубопроводов, корпусов оборудования и т.д.), то разработана и реализована в утвержденных методических и нормативных документах комплексная технология неразрушающего контроля сварных швов через покрытие толщиной до 1,5 мм, включающая в себя несколько этапов:

- определить качество покрытия по результатам визуального и измерительного контроля и прозвучивания металла через покрытие прямыми пьезо- или ЭМА-преобразователями; при этом в случае, если затухание и/или реверберация ультразвука в металле велико, то регламентируется применение развертки типа В;

- при отрицательных результатах этапа 1, т.е. если покрытие некачественное, его необходимо удалить и проводить контроль по зачищенной поверхности металла;

- если покрытие качественное, необходимо выполнить измерение его толщины с применением магнитного (вихретокового) толщиномера и выполнить

настройку оборудования для ультразвукового контроля сварных швов с учетом поправок для измеренной толщины применяемого покрытия;

– выполнить ультразвуковой контроль сварных швов через антикоррозионное покрытие без его удаления; при этом определен шаг и направление сканирования при контроле качества и толщинометрии металлоконструкций стальных резервуаров.

В рамках решения некоторых сопутствующих задач в работе также рассмотрены и определены границы применения:

– ультразвукового контроля сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб, в том числе – при наличии защитного кожуха, т.е. промежуточного слоя между преобразователем и основным материалом трубы;

– ЭМА-преобразователей для выявления коррозионных повреждений металла трубопроводов, резервуаров, оборудования без удаления антикоррозионного покрытия толщиной до 1,5 мм и при наличии жидкости внутри контролируемых изделий. При контроле крупнозернистых материалов, например, литых корпусов толщиной до 60 мм (насосы, задвижки и т.д.), рекомендовано пользоваться разверткой типа В.

На примере некоторых типов стыковых сварных соединений показано, что применение разработанных рекомендаций позволяет обеспечить достоверность ультразвукового эхо-метода контроля на уровне от 90% по отношению к радиографии. При этом, можно обеспечить недобраковку и перебраковку в пределах единиц процентов.

На основании теоретических и экспериментальных исследований параметров акустического тракта при выявлении дефектов стыковых сварных швов труб, трубных деталей, конструкций стенки стальных резервуаров рекомендованы параметры механизированного сканирования протяженных сварных швов. Показано, что для обеспечения измерения условных размеров дефектов сварных швов эхо-методом при механизированном перемещении преобразователей вдоль сварного шва шаг сканирования целесообразно выбирать в пределах 0,3 - 1 мм, при выявлении коррозионных повреждений околошовной зоны – в пределах 0,5 - 1мм. При эхо-методе ультразвукового контроля для снижения влияния ошибок позиционирования преобразователей относительно оси сварного шва при механизированном сканировании рекомендованы преобразователи с диаграммой направленности, расширенной по сравнению с аналогичными преобразователями для ручного контроля. Для условий ультразвуковой толщинометрии и дефектоскопии основного металла и сварных швов металлоконструкций определены направления и скорость сканирования. Так, рекомендовано избегать сканирования «на спуск» и исключить сканирование со скоростью более 40 мм/с. Показано, что при этом может быть обеспечено измерение условных линейных размеров дефектов и толщины металла с погрешностью в пределах $\pm 0,5$ мм.

Основные выводы и результаты

1. Показано, что в 3-х мерной модели рассеяния поперечных и продольных волн на компактных объемных и плоскостных мишенях (сферическая полость,

диск) и протяженных мишенях (цилиндрическое сверление, полоса) расчет в жидкостном приближении можно использовать только при определении параметров зеркально отраженного сигнала при прозвучивании изделия эхо-методом по совмещенной схеме. При расчете зеркально отраженных и трансформированных сигналов с использованием раздельной схемы, а также при расчете параметров дифрагированных сигналов, огибающих мишень, для описания результатов, получаемых на современных дефектоскопах, необходимо пользоваться упругой моделью.

2. В рамках упругой модели рассеяния продольных и поперечных волн на мишенях (дефектах) типа трещин ограниченной высоты и протяженных объемных и плоскостных мишенях (дефектах) установлено, что при изменении размера мишени причиной осцилляций амплитуды сигналов, принимаемых в выбранном направлении, является интерференция волн различного типа, возбуждаемых на ее поверхности.

3. Для нормального и наклонного озвучивания протяженных цилиндрических дефектов и для озвучивания компактных дефектов (3D-модели) показано, что рассеянные сигналы могут включать в себя зеркально-отраженные, трансформированные на мишени и огибающие мишень сигналы.

4. Как правило в эхо-методе, при озвучивании объемной полости поперечной волной максимальный вклад в принимаемый рассеянный сигнал дают зеркально отраженные поперечные волны и волны, огибающие поверхность полости со скоростью, близкой к скорости волны Релея («квазирелеевские» волны). При озвучивании объемной полости продольной волной или поперечной волной, горизонтально поляризованной относительно рассеивающей поверхности мишени, максимальный вклад в принимаемый в эхо-методе рассеянный сигнал дают зеркально отраженные волны того же типа, что и падающая. Волны, огибающие объемную полость со скоростью, близкой к скорости объемной продольной волны («квазипродольные» волны) или горизонтально-поляризованной поперечной волны обычно имеют существенно меньшую амплитуду.

5. Разработаны критерии, при выполнении которых цилиндрическое сверление можно использовать в качестве модельного отражателя (мишени) для настройки чувствительности ультразвукового контроля эхо-методом и проверки разрешающей способности по времени комплекса «дефектоскоп – преобразователь». В случае, когда поверхности контрольного образца или меры плоскопараллельны, для бокового цилиндрического отражателя (БЦО) эти критерии выглядят следующим образом: диаметр сверления D и глубина H его залегания в образце должны удовлетворять условиям: $D \geq \Delta T / K$, $H \geq (c_L / 2) \Delta T$, где $H = \min(H_1, H_2)$. Здесь где ΔT – длительность ультразвукового импульса; c_L – скорость продольной волны в материале образца, $H_{1,2}$ – расстояния от поверхности цилиндра до поверхностей образца. Значения коэффициента K определены в зависимости от схемы прозвучивания и свойств контролируемого материала.

6. Установлено, что БЦО диаметром 2 мм на глубине 8 мм в мерах СО-2, СО-3Р и настроечных образцах, изготовленных по ГОСТ Р 55724 - 2013 (или аналогичным зарубежным стандартам) при частотах 2,5 МГц и выше можно

использовать для поверки временной развертки и точности работы глубиномера и аттенюатора дефектоскопа, а также для проверки разрешающей способности системы «дефектоскоп-преобразователь» по расстоянию.

7. Показано, что влияние дифрагированных, в том числе – релеевских, волн на результаты контроля эхо методом может быть уменьшено при выявлении дефектов поперечными волнами, в основном горизонтально поляризованными относительно поверхности дефекта, либо продольными волнами. Однако в связи со снижением чувствительности при контроле эхо-методом продольными волнами примерно в 2 раза по сравнению с контролем поперечными волнами, применение продольных волн наиболее актуально для дифракционных методов контроля.

8. Для того, чтобы при контроле эхо-методом поперечными волнами использовать преимущества зеркального отражения от дефекта горизонтально поляризованных относительно его поверхности волнами, необходимо применять схемы контроля, в которых плоскость поляризации источника вводимых в материал волн развернута относительно плоскости поляризации приемника отраженных от дефекта волн ориентировочно на $70^\circ - 110^\circ$. При этом обеспечивается повышение чувствительности как к плоскостным, так и к объемным дефектам, и уменьшается влияние сигналов, дифрагированных на объемных дефектах.

9. В технологии TOFD для продольных волн превышение амплитуды зеркально-отраженного от дефекта сигнала над амплитудой огибающего можно использовать в качестве признака, характеризующего форму дефекта, лишь в случае, если дефект ориентирован перпендикулярно плоскости излучения-приема продольной волны.

10. Предложено классифицировать дефекты, полупрозрачные для ультразвуковых волн, по трем группам: дефекты с заполнением, прерывистые структуры и засоренность сварного шва. К первой группе относятся дефекты, поверхность которых не свободна от напряжений, т.е. является импедансной. В нее входят, в том числе, раскатанные включения, несплавления, матовые пятна и зеркальности в сварных швах металлических и пластмассовых труб, выполненных контактной сваркой, а также участки трещин вблизи их острия. Ко второй группе относятся прерывистые непровары, несплавления, а также некоторые конструктивные элементы в сварных соединениях полиэтиленовых трубопроводов. В третью группу входят дефекты типа скоплений пор или мелких шлаковых включений в сварных швах металлических изделий, а также засоренность контактных швов песком или другими мелкими инородными включениями.

11. Определены закономерности рассеяния ультразвука на полупрозрачных дефектах каждой из указанных групп, и предложены контрольные отражатели для настройки параметров контроля. Показано, что дефекты с заполнением можно моделировать традиционными плоскодонными отверстиями, сверлениями или пазами, а полупрозрачность дефектов учитывать, вводя поправочные коэффициенты для повышения чувствительности при контроле. Для моделирования прерывистых структур целесообразно использовать расчетные

численные методы. Моделирование дефектов типа «засоренность сварного шва» можно выполнять с помощью сверлений с широкой индикатрисой рассеяния.

12. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование прохождения ультразвуковых волн через лакокрасочные покрытия, используемые для защиты металла от коррозии. Исследованы комбинации прилегающих к призмам пьезопреобразователей структур типа «сталь-нефть», «сталь-слой парафина-нефть», «наружное защитное покрытие-сталь-внутреннее защитное покрытие-слой парафина-нефть». Установлены требования к антикоррозионным покрытиям металла, при которой контроль прямыми и наклонными пьезопреобразователями можно проводить через слой покрытия без потери чувствительности.

13. Установлено, что при ультразвуковом контроле металла и сварных соединений через антикоррозионное лакокрасочное покрытие для исключения потери чувствительности ее корректировку целесообразно проводить путем введения поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты в функции от толщины и типа покрытия рассчитаны для используемых диапазонов частот и углов ввода ультразвука и внесены в табличные формы для покрытий, актуальных для резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, находящихся в эксплуатации. Для иных видов покрытий, не рассмотренных в работе, выбор поправочных коэффициентов может выполняться в соответствии с разработанным алгоритмом.

14. Установлено, что при выборе параметров контроля сварных соединений через антикоррозионные лакокрасочные покрытия целесообразно уменьшать длительность излучаемого импульса и площадь контактной поверхности пьезопреобразователя по сравнению с принятыми для зачищенной поверхности металла. В этом случае, минимизируется влияние ограниченности пучка ультразвуковых волн и импульсного характера излучения на результаты контроля.

15. Подтверждена возможность выявления коррозионных повреждений металла трубопроводов, резервуаров, оборудования без удаления антикоррозионного лакокрасочного покрытия, с применением пьезо- и ЭМА-преобразователей. Во втором случае при использовании представленного на рынке оборудования не требуется корректировка результатов в зависимости от качества и адгезии покрытия толщиной до 1,5 мм. При этом, установлено, что при контроле крупнозернистых материалов, например, литых корпусов насосов и задвижек большой толщины (порядка 60 мм или более), необходимо пользоваться дефектоскопами с разверткой типа В. Эти измерения можно проводить в том числе при наличии жидкости внутри контролируемых изделий.

16. На основании проведенных исследований разработаны и внедрены методические и нормативные документы по контролю качества и диагностированию основного материала и сварных соединений трубопроводов, резервуаров и оборудования на объектах различного назначения: магистральных нефте-, нефтепродукто-, газо-проводах, в энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных трудах:

1. Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю. Анализ упругого поля ультразвуковых волн, рассеянных на цилиндрическом отражателе // Дефектоскопия. 1984. № 6. С. 3-13 (0,75 п.л./0,4 п.л.).

2. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю., Яровой А.А. Повышение выявляемости объемных дефектов // Дефектоскопия. 1985. № 7. С. 24-30 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

3. Могильнер Л.Ю., Сахранов А.В., Урман Н.С. Прохождение ограниченного ультразвукового пучка через плоский слой контактирующей жидкости при наклонном падении и импульсном режиме излучения // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 70-80 (0,75 п.л./0,4).

4. Алешин Н.П., Мартыненко С.В., Могильнер Л.Ю. Рассеяние ультразвука диском в упругом теле. I. Теория // Дефектоскопия. 1986. № 10. С. 3-8 (0,35 п.л./0,1 п.л.).

5. Алешин Н.П., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю. Изучение дифракции упругой волны на канальных дефектах и рекомендации по повышению их выявляемости // Дефектоскопия. 1986. № 11. С. 3-10 (0,4 п.л./0,1 п.л.).

6. Алешин Н.П., Гусаров В.Р., Могильнер Л.Ю. Количественное исследование рассеяния продольных и поперечных волн на эллиптических цилиндрах // Дефектоскопия. 1988. № 12. С. 13-18 (0,35 п.л./0,1 п.л.).

7. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Безсмертный С.П., Могильнер Л.Ю. Влияние анизотропии упругости проката на выявляемость дефектов при ультразвуковом контроле качества сварки труб большого диаметра // Дефектоскопия. 1988. № 6. С. 80-86 (0,4 п.л./0,15 п.л.).

8. Алешин Н.П., Каменский Д.В., Каменский В.С., Могильнер Л.Ю. Дифракция упругой волны на свободном от напряжений диске // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 4. С. 777-780 (0,4 п.л./0,25 п.л.).

9. Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Лежава А.Г., Могильнер Л.Ю. Настройка чувствительности ультразвукового контроля по вертикальному цилиндрическому отверстию // Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 23-29 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

10. Алешин Н.П., Князев В.Д., Могильнер Л.Ю. Рассеяние ультразвуковых импульсов на «полупрозрачных» дефектах. Моделирование методом конечных разностей // Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 3-8 (0,4 п.л./0,1 п.л.).

11. Могильнер Л.Ю., Михайлов И.И. О дискретизации сигналов при автоматизированном ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 1993. № 10. С. 24-28 (0,35 п.л./0,25 п.л.).

12. Гиллер Г.А., Могильнер Л.Ю. Оборудование и технологии для неразрушающего контроля трубопроводов систем газоснабжения // Безопасность труда в промышленности. 1997. № 11. С. 12-13 (0,1 п.л./0,05 п.л.).

13. Гиллер Г.А., Могильнер Л.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов. Новые технологии и приборы // Дефектоскопия. 2000. № 1. С. 83-87 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

14. Могильнер Л.Ю., Литвинов И.П., Окунев Д.В. Технология ультразвукового контроля стальных вертикальных резервуаров без удаления защитного лакокрасочного покрытия // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2008. № 1 (11). С. 98-99 (0,1 п.л./0,05 п.л.).
15. Могильнер Л.Ю., Капустин О.Е., Семин Е.Е. Расчет допустимых условий эксплуатации стенки резервуара с дефектами геометрии на основе данных технического диагностирования // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2009. № 4(16). С.17-19 (0,3 п.л./0,1 п.л.).
16. Могильнер Л.Ю. Применение цилиндрического отражателя для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 27-36 (0,5 п.л./0,5 п.л.).
17. Могильнер Л.Ю., Смородинский Я.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: настройка и поверка оборудования по образцам с цилиндрическим сверлением // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 14-20 (0,5 п.л./0,3 п.л.).
18. Могильнер Л.Ю., Скуридин Н.Н., Студенов Е.П. Контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций на площадочных объектах трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: состояние и перспективы // Нефтяное хозяйство. 2019. № 11. С. 144-148 (0,35 п.л./0,25 п.л.).
19. Могильнер Л.Ю., Временко А.В., Скуридин Н.Н., Придеин О.А. Применение электромагнитно-акустических толщиномеров при диагностировании металлоконструкций и механо-технологического оборудования // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 3. С. 315-325 (0,65 п.л./0,35 п.л.).
20. Могильнер Л.Ю., Придеин О.А., Сергеевцев Е.Ю. Применение комплекса методов неразрушающего контроля для диагностирования фундаментов насосных агрегатов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10, №2. С. 164-172 (0, 5 п.л./0,15 п.л.).
21. Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю., Крысько Н.В. О взаимодействии упругих волн с «полупрозрачными» дефектами // Дефектоскопия. 2020. №6. С. 3-13 (0,75 п.л./0,4 п.л.).
22. Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю., Крысько Н.В., Кусый А.Г. Исследование применимости технологии TOFD для контроля сварных соединений труб из полиэтилена // Дефектоскопия. 2020. №10. С. 3-11 (0,5 п.л./0,15 п.л.).
23. Алешин Н.П., Козлов Д.М., Могильнер Л.Ю. Особенности ультразвукового контроля сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб // Вопросы материаловедения. 2020. №11. С. 46-52 (0,45 п.л./0,25 п.л.).
24. Алешин Н. П., Крысько Н. В., Щипаков Н. А., Могильнер Л. Ю. Оптимизация параметров механизированного ультразвукового контроля протяженных сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. №2. С. 164-172 (0,5 п.л./0,35 п.л.).