МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

_____

Иванов Павел Николаевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ СДВИГОВЫХ ВОЛН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность 2.8.3
«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
Глава 1. Современное состояние исследований в области методов генерации ультразвуковых волн для определения упругих свойств горных пород 10
1.1 Возможности ультразвуковой диагностики структуры и свойств горных пород на основе различных типов упругих волн 10
1.2 Применение продольных акустических волн для диагностики структуры и свойств горных пород 11
1.3 Особенности генерации сдвиговых волн 15
1.4 Определение динамических модулей упругости на основе ультразвуковых измерений и их связь со статическими 19
1.5 Постановка задач исследования 22
Глава 2. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности прямой генерации сдвиговой упругой волны в широкополосном ультразвуковом диапазоне в исследуемую среду 24
2.1 Теоретическое описание возможности полной трансформации продольной упругой волны в сдвиговую на границе раздела «твердое изотропное тело – воздух» 24
2.2 Выбор материала и углов призмы для достижения полной трансформации энергии продольной волны в сдвиговую с помощью теоретических оценок 31
2.2.1 Выбор материала 31
2.2.2 Проведение лазерно-ультразвуковой диагностики с целью определения скоростей распространения упругих волн в потенциальных материалах для призмы 32
2.2.3 Выполнение численных расчётов углов призмы с помощью программного пакета «WolframAlpha» 35
2.3 Расчет коэффициентов отражения и трансформации продольной волны на свободной границе призмы из выбранных материалов 37
2.4 Проверка проведенных расчетов с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics 42
2.4.1 Построение расчетной модели 42
2.4.2 Результаты компьютерного моделирования 46
2.4.3 Подбор геометрической формы призмы 53
Выводы 55
Глава 3. Проектирование и разработка широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн и верификация результатов измерений на изотропных материалах 56
3.1 Проектирование и разработка лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн 56
3.2 Схема эксперимента и предлагаемые технические решения, обеспечивающие прохождения сдвиговой волны в исследуемые образцы 60
3.3 Верификация результатов измерений на изотропных материалах, выполненных с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01 62

3.3.1 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании классического преобразователя ПЛУ-6П-02 63
3.3.2 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01. 68
3.3.3 Сравнение результатов измерений, выполненных с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02 и преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 74
3.4 Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты) в исследуемых модельных образцах 75
Выводы 79
Глава 4. Исследование образцов горных пород различного генотипа с помощью разработанного преобразователя сдвиговых упругих волн 80
4.1 Сведения об исследуемых образцах горных пород 80
4.2 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании классического преобразователя ПЛУ-6П-02 83
4.3 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 94
4.3.1 Исследование временных форм сигналов, регистрируемых на образцах магматических горных пород 94
4.3.2 Обнаруженные проблемы при работе с разработанным преобразователем сдвиговых волн при исследовании образцов метаморфических пород и возможные пути их решения 96
4.3.3 Исследование временных форм сигналов, регистрируемых на образцах осадочных горных пород 100
4.4 Результаты расчета скоростей распространения сдвиговых волн с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01 102
4.5 Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты) исследуемых образцов горных пород 106
4.6 Анализ результатов сравнения динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона образцов горных пород, рассчитанных на основе применения классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01 109
4.7 Модернизация разработанного преобразователя и поиск конструктивных решений для повышения его эргономичности 112
Выводы 115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 120
Приложение А. Разработанная методика определения скоростей распространения ультразвуковых волн и расчета на их основе динамических модулей упругости с помощью широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн 130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

При современных условиях разработки месторождений инженерно-геологические условия добычи становятся все более сложными. Это обусловлено большими глубинами залегания полезных ископаемых, добыча которых рентабельна для формирования стратегического потенциала минерально-сырьевого комплекса экономики Российской Федерации.

Основными параметрами контроля и мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород являются деформационные характеристики, включающие статические модули упругости и коэффициент Пуассона. Значения данных величин в большинстве случаев получают из результатов лабораторных исследований, и эти же величины используются при проведении численного и компьютерного моделирования поведения массива. Следует отметить, что для корректного описания возможных геодинамических явлений важно знать не только полный набор упругих модулей, но и их изменение при воздействии полями различной природы.

Одним из широко применяемых методов определения динамических модулей упругости и исследования структуры образцов является ультразвуковой. Использование нескольких типов акустических волн (например, продольных, сдвиговых, поверхностных), распространяющихся в различных направлениях, позволяет по измеренным скоростям волн восстанавливать полный набор динамических модулей упругости, а также исследовать структурные особенности.

Однако использование ультразвуковых преобразователей сдвиговых волн на пьезоэлементах дает значительную погрешность при определении скоростей распространения волн данного типа. Более того, применение резонансных преобразователей для эффективного возбуждения сдвиговых волн с достаточно узкой полосой частот не позволяет учесть дисперсию фазовой скорости, возникающей за счет дифракции и затухания, и оставляет открытым вопрос, какую скорость определили – фазовую или групповую, и как по данным

скоростям рассчитывать динамические модули упругости. В связи со сказанным выше, задача разработки широкополосных ультразвуковых преобразователей для прецизионного измерения скоростей распространения сдвиговых волн является актуальной.

Диссертационное исследование выполнено в рамках грантов НИТУ МИСИС К2-2017-003 «Лазерно-ультразвуковая, терагерцовая и поляризационная спектроскопия гетерогенных сред», К2-2019-004 «Разработка комплекса интроскопических методов для исследования гетерогенных сред и численное моделирование на их основе поведения геоматериалов на различных масштабных уровнях при воздействии физических полей» и К2-2020-034 «Установление взаимосвязей статических и динамических параметров горных пород различных генотипов с помощью лазерной ультразвуковой диагностики».

Целью диссертационной работы является разработка метода генерации широкополосных лазерно-ультразвуковых импульсов сдвиговых волн для прецизионного расчета скоростей данного типа волн в образцах горных пород.

Основная идея работы заключается в создании широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн, принцип работы которого основан на полной трансформации упругих волн на свободной границе.

Задачи диссертационного исследования:

1. Проведение анализа и систематизации отечественного и зарубежного опыта по методам генерации ультразвуковых волн для определения упругих свойств горных пород;
2. Компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольной упругой волны в среде преобразователя и полной ее трансформации в сдвиговую на границе «изотропное твердое тело – воздух» в программном пакете COMSOL Multiphysics;
3. На основе численных расчетов и компьютерного моделирования проектирование лазерно-ультразвукового преобразователя широкополосных импульсов сдвиговых упругих волн, проведение

апробации его работы на модельных образцах стекла, нержавеющей стали и алюминия;

4. Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовых скоростей от частоты) в исследованных модельных образцах. Определение частотного диапазона работы преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают;
5. Выявление недостатков и ограничений в работе классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн при исследовании образцов горных пород;
6. Выполнение серии измерений скоростей распространения сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн;
7. Определение частотных диапазонов работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при которых значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %;
8. Определение значений динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона для исследованных горных пород;
9. Модернизация разработанного преобразователя и поиск конструктивных решений для повышения его эргономичности.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлено, что для достижения максимальной трансформации энергии широкополосного импульса продольной волны в сдвиговую необходимо использовать в качестве материала призмы преобразователя сдвиговых волн бесцветное оптическое стекло или тяжелый флинт с геометрическими характеристиками, обеспечивающими углы падения продольной волны 61,44° и 59,11° и отражения сдвиговой волны 30,35° и 28,82° соответственно.

2. Экспериментальные исследования на модельных средах с малым затуханием показали, что характерная длительность возбуждаемых разработанным широкополосным преобразователем импульсов сдвиговых волн

лежит в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкс, частотный диапазон работы преобразователя составляет от 0,1 до 12 МГц, причем в диапазоне от 1,5 до 9,5 МГц значения фазовых и групповых скоростей совпадают.

3. Установлено, что значения фазовых и групповых скоростей сдвиговых волн различаются менее чем на 1 % при толщинах образцов рассматриваемых горных пород: менее 3,00 мм – в частотном диапазоне 0,5 – 9,0 МГц; от 3,00 до 6,00 мм – в частотном диапазоне 1,3 – 8,0 МГц; от 6,00 до 8,50 мм – в частотном диапазоне 1,6 – 6,5 МГц.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– использованием при проведении экспериментов апробированных методов лазерно-ультразвуковой диагностики, статистического анализа и сертифицированных программных пакетов;

– сходимостью результатов сопоставления компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics с аналитическими расчетами;

– апробацией работы разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых упругих волн на модельных образцах стекла, алюминия и нержавеющей стали;

– удовлетворительной сходимостью результатов измерения сдвиговых упругих волн, полученных с помощью разработанного преобразователя и классической методики в образцах горных пород.

Методы исследований включали: анализ и обобщение современного состояния исследований в рассматриваемой области на основе обработки научно-технической информации; компьютерное моделирование распространения упругих волн с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics; лабораторные исследования с использованием установок лазерно-ультразвуковой диагностики, а также иного оборудования, необходимого для решения задач диссертационного исследования; статистические методы обработки и интерпретации полученных результатов с помощью современного программного обеспечения.

Практическая значимость работы заключается в разработке нового широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых упругих волн для прецизионного расчета скоростей распространения данного типа волн и динамических модулей упругости горных пород. Разработанный преобразователь был использован в рамках выполнения договора от 07.12.2022 г., заключенного между НИТУ МИСИС и ООО «Терра Сервис» на оказание научно-технических услуг: «Исследование физико-механических свойств скальных и мерзлых горных пород». Созданная в рамках выполнения договора «Методика определения скоростей распространения ультразвуковых волн и расчета на их основе динамических модулей упругости с помощью широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн» была передана в ООО «Терра Сервис».

Апробация работы: Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов (27.03.2019 – 29.03.2019, г. Санкт-Петербург, Россия); XV международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (13.05.2019 – 17.05.2019, г. Санкт-Петербург, Россия); Международная конференция «Innovations in Geology, Mining, Processing, Economics, Safety and Environmental Management» (05.06.2019 – 07.06.2019, г. Фрайберг, Германия); 14-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (28.10.2019 – 01.11.2019, г. Москва, Россия); Международный научный симпозиум «Неделя Горняка – 2020» (27.01.2020 – 31.01.2020, г. Москва, Россия); 1-я Международная молодежная научная конференция «Новые материалы XXI века: разработка, диагностика, использование» (21.04.2020 – 24.04.2020, г. Москва, Россия); XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2021» (25.01.2021 – 29.01.2021, г. Москва, Россия); XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (12.04.2021 – 16.04.2021, г. Санкт-Петербург, Россия); XVII Международный форум-конкурс

студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (31.05.2021 – 06.06.2021, г. Санкт-Петербург, Россия); XV Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» 25.10.2021–28.10.2021, г. Москва, Россия); XXX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2022» (01.02.2022 – 04.02.2022, г. Москва, Россия); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (16.05.2022 – 20.05.2022, г. Санкт-Петербург, Россия); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (31.01.2023 – 03.02.2023, г. Москва, Россия).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертационного исследования опубликовано 6 печатных работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 – в изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 145 страницах текста, включает 79 иллюстраций, 17 таблиц, библиографический список из 124 наименований.

Благодарности.

Автор выражает особую благодарность научному руководителю Черепецкой Елене Борисовне за сопровождение работы, ценные советы и обсуждения результатов; к.ф.-м.н. Бычкову Антону Сергеевичу и к.т.н. Шибаеву Ивану Александровичу за помощь и поддержку при решении задач диссертационной работы; коллективу лаборатории ЛУМИИ НИТУ МИСИС за помощь при проведении лабораторных исследований; зав. каф. ФизГео Винникову Владимиру Александровичу за ценные замечания и обсуждения результатов работы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1 Возможности ультразвуковой диагностики структуры и свойств горных пород на основе различных типов упругих волн

Изучение физико-механических свойств массива горных пород является одними из фундаментальных исследований, определяющих контроль и мониторинг его напряженно-деформированного состояния (НДС), что обеспечивает достижение безопасного ведения горных работ.

Корректная интерпретация сейсмических измерений массива, каротажных данных, полевых исследований физико-механических свойств керна требует уточнения полученных результатов в лабораторных условиях [1-7]. Особое внимание при описании НДС уделяется исследованию упругих свойств горных пород и закономерностей развития степени их повреждения при воздействии физическими полями различной природы [8-10]. Это актуально, например, при компьютерном моделировании поведения массива горных пород в процессе разработки, при создании хранилищ газа и ядерных отходов [11-14] с использованием различных программных комплексов [15-18].

В настоящее время для изучения упругих свойств и внутренней структуры горных пород применяются многие методы [19]: различные виды электронной микроскопии [20-22], рентгеновская компьютерная томография [23-25], телевизионный контроль [26,27], позволяющий по плотности прошедшего через образцы потока инфракрасного излучения качественно оценивать нарушенность их структуры, ультразвуковые [28,29] и иные методы [30-32].

Однако электронная микроскопия и рентгеновская компьютерная томография из-за высоких требований к условиям проведения эксперимента и оборудованию, а также вследствие трудоемкости, используются ограниченно. Тепловизионный контроль дает лишь качественную информацию о нарушенности

геоматериала. Поэтому в последние годы активно применяются ультразвуковые методы с использованием различных типов упругих волн. Данные волны являются хорошим инструментом для оценки внутренней структуры [33-38]. Также они используются для расчета динамических модулей упругости на основе измерения распространения скоростей акустических волн различных типов [39-43], определения пористости [44,45], позволяют определять флюидонасыщение пород-коллекторов по величине затухания сдвиговых волн [46]. По измеренным скоростям продольных (L-волн) и сдвиговых (S-волн) волн возможно оценивать плотность трещин [47] и другие параметры [48]. Столь обширные возможности для определения различных свойств горных пород при использовании акустических волн привело к интенсивному развитию новых и совершенствованию уже существующих методов ультразвуковой диагностики геоматериалов.

1.2 Применение продольных акустических волн для диагностики структуры и свойств горных пород

Первые работы по исследованию физико-механических свойств неоднородных сред с использованием акустических волн появились в 50-х годах прошлого века [49].

Уже в 1970-х годах в работах [50, 51] начали оценивать динамические модули упругости в породах с трещинами и без них на основе ультразвуковых измерений. В этих работах были получены аналитические выражения для зависимости плотности трещин от соотношения скоростей продольных и сдвиговых волн в среде. Однако в течение длительного промежутка времени широко данные результаты не использовались из-за сложности определения с необходимой точностью, в первую очередь, скорости S-волны. Стояла задача корректного измерения скоростей сдвиговых волн.

Поэтому большинство исследований, посвященных применению ультразвука для диагностики структуры и свойств горных пород, в течение

длительного промежутка времени базировалось на продольных акустических волнах [52,53]. Так, например, в 1990-х авторы [52] оценили процесс повреждения известняка при циклах замораживания и оттаивания с помощью ультразвуковых методов. В работе [53] оценивалась анизотропия трещиноватости гранитного тоннеля по значениям измеренных скоростей L-волн.

Следует отметить, что значительное количество работ [54-69] посвящено изучению особенностям поведения образцов различных горных пород (гранитов [58-62], известняков [63-65], базальтов [66] и иных горных пород [67]) ультразвуковыми методами, базирующимися на продольных волнах, при воздействии на них полями различной природы [68,69].

Так, исследователи [60-62] использовали коэффициент затухания продольных акустических волн для обнаружения и мониторинга развития повреждений в граните. При этом в статье [61] изучалось поведение гранитов в температурном диапазоне 20° - 600° при атмосферном давлении. Измерялись пористость, газопроницаемость, скорость продольных волн при разных температурах. По временной форме сигналов на основе быстрого Фурье-преобразования рассчитывался амплитудный спектр акустических сигналов в интервале 0,3-0,9 МГц, по которому рассчитывался частотнозависимый коэффициент затухания.

Следует отметить, что ключевыми компонентами каждой лабораторной ультразвуковой установки в приведенных выше работах [54-69] являлись пьезоэлектрические преобразователи, которые генерировали и регистрировали упругие волны в образцах горных пород.

Пьезоэлектрические преобразователи для эффективной генерации как продольных, так и сдвиговых волн должны работать на резонансной частоте. Тем не менее, в последние два десятилетия наметилась тенденция к расширению полосы пропускания пьезоэлектрических датчиков [70]. Это обусловлено тем, что широкая полоса излучения и приема ультразвуковых импульсов приводит к уменьшению мертвой зоны преобразователя и улучшению разрешения. На сегодняшний день известны несколько способов расширения полосы излучения

пьезодатчиков продольных волн. Одним из них является механическое или электрическое демпфирование пьезоэлемента с последующим согласованием с материалом объекта исследования через просветляющий четвертьволновой слой. При данном способе, однако, наблюдается значительное уменьшение чувствительности пьезопреобразователя [71].

Возможным методом расширения полосы излучения упругих волн является также применение преобразователей с неоднородным электрическим полем возбуждения при использовании переменного профиля одной из поверхностей пьезопластины [72]. В качестве основного недостатка данного метода следует отметить наличие большого количества паразитных мод колебаний, которые сильно искажают диаграмму направленности [73-76].

В качестве метода генерации широкополосных импульсов упругих волн различных типов рассматривается также электромагнитный акустический (ЭМА) метод, основанный на эффектах взаимодействия электромагнитного поля с материалом. Сюда следует отнести явление магнитострикции [70] и электродинамическое взаимодействие [77-82], когда возбуждение упругих колебаний происходит в токопроводящем материале, помещенном в постоянное или переменное магнитные поля. В работе [70] были описаны широкополосные ультразвуковые преобразователи на основе порошков магнитомягких ферритов, работающие на магнитострикционном эффекте. Главным преимуществом таких датчиков является возможность одновременно возбуждать продольные и сдвиговые волны, а также разделять их при приеме за счет изменения угла между векторами магнитной индукции постоянного и переменного полей. При этом чувствительность как магнитострикционных порошковых преобразователей, так и базирующихся на электродинамическом взаимодействии более чем на два порядка хуже пьезоэлектрических [70]. Более того, электромагнитный акустический метод используется в основном при диагностике металлов и не подходит для контроля структуры и свойств геоматериалов.

Таким образом, даже при возбуждении широкополосных импульсов продольных волн традиционными методами возникает ряд трудностей, связанных

с малой чувствительностью задемпфированных пьезопреобразователей, возникновением паразитных сигналов при сложных формах пьезоэлемента или малым значением коэффициента преобразования «электромагнитное поле – упругие колебания» для ЭМА датчиков.

В связи с этим лучшими для генерации широкополосных УЗ импульсов продольных волн являются оптико-акустические методы [83-86]. Основная идея данных методов заключается в лазерном возбуждении ультразвука, когда поглощение оптического излучения происходит в исследуемом материале (или в специально сконструированном преобразователе), а последующее расширение нагретой области приводит к генерации мощных коротких акустических импульсов [87,88]. За рубежом используют так называемую бесконтактную оптико-акустическую диагностику, при которой источником широкополосного ультразвука является поглощающая лазерное излучение поверхность исследуемого объекта, а прием рассеянных на неоднородностях сигналов осуществляется интерферометрами [89,90]. В таких схемах динамический диапазон применяемой аппаратуры на несколько порядков меньше, чем при контактном методе. Более того, при поглощении лазерного излучения в самом геоматериале коэффициент поглощения в каждой точке различен, что приводит к изменению формы импульсов продольных волн.

В России в основном используется контактный метод лазерной ультразвуковой широкополосной спектроскопии на основе генерации продольных волн [91-93]. Так, в работе [91] была исследована анизотропия коэффициента затухания и скоростей распространения упругих волн в трех взаимно перпендикулярных направлениях на образцах интрузивных горных пород. В работе [92] с помощью лазерно-ультразвуковой структуроскопии были изучены процессы образования дефектов внутренней структуры в образцах синтетического кварца при проведении испытаний на одноосное сжатие. Как показано в исследовании [93], лазерно-ультразвуковая спектроскопия позволяет исследовать и геоматериалы, обладающие высокой степенью неоднородности структуры (например, шунгит). При этом активно применяются различные режимы данного

метода, такие как эхо-режим, когда излучатель и приемник ультразвуковых сигналов расположены на одной поверхности исследуемого образца [92-95], и теневой иммерсионный режим [91, 94], при котором генератор и приемник расположены на противоположных поверхностях образца в воде.

1.3 Особенности генерации сдвиговых волн

Для расчета динамических модулей упругости горных пород необходимо обеспечить прецизионное измерение скоростей распространения продольных и сдвиговых волн. Но, как отмечается в работе [96], генерация и корректная регистрация S-волн в горных породах вызывает большие трудности, несмотря на то, что измерение скоростей ультразвуковых волн имеет решающее значение для характеристики упругих свойств геоматериала, а также других физико-механических свойств. Авторами [96] предлагается новый метод, когда записанный во временной области сигнал S-волны подвергается вейвлет-преобразованию, из него удаляются низкочастотные помехи и применяются специальные фильтры для высокочастотных шумов. Затем сигнал анализируется во временной области, чтобы обнаружить и охарактеризовать импульс S-волны. Однако даже при такой сложной обработке сигналов погрешность в определении скорости сдвиговой волны составила 4,4 %, что не позволяет точно вычислять динамический модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Более того, у авторов при регистрации первого вступления S-волны возникли значительные проблемы, в основном для средне- и крупнозернистых пород. Было установлено, что структурные компоненты горных пород оказывают сильное влияние на регистрируемый сигнал сдвиговой волны: минералогический состав, пористость и размер частиц влияют на скорость волны, затухание и форму волны.

В работах [97, 98] авторами было описана теория возбуждения сдвиговых волн на разделе границы двух сред и возможность измерения их скорости распространения с необходимой точностью. На основе теоретического анализа был предложен аналитический метод расчета временной формы сигналов

ультразвуковых импульсов в образцах горных пород, получаемых с помощью эхо-режима лазерно-ультразвуковой диагностики. Следует отметить, что для генерации импульсов S-волны был использован широкополосный источник продольных волн, а расчет скорости сдвиговой волны производился из закона Снелла, то есть по скорости продольной волны.

Как отмечалось выше, сдвиговые волны наиболее чувствительны к структурным неоднородностям горных пород [97,98], знание их скоростей необходимо для определения полного набора модулей упругости, а по измеренному коэффициенту затухания S-волн возможно оценивать наличие и свойства насыщающих флюидов [99-101]. Так, в работе [99] были измерены скорости ультразвуковых S-волн для трех типов пород (алевролитов, доломитов и песчаников) в условиях частичного флюидонасыщения на основе импульсного метода. Тем не менее, затухание S-волны оценивалось по сдвигу частоты, соответствующей максимуму амплитудного спектра. Результаты испытаний на флюидонасыщение показали, что затухание большинства водонасыщенных доломитов сильнее, чем газо- или нефтенасыщенных доломитов, в то время как не существует очевидной связи между затуханием и типом флюида в алевролитах. Затухание S-волны в алевролитах и доломитах увеличивалось с увеличением пористости и проницаемости. Максимальное затухание насыщенных газом и водой пород наблюдалось в большинстве алевролитов при высокой водонасыщенности (до 55 %). Затухание сдвиговой волны в большинстве доломитов также имело тенденцию к увеличению его значения с увеличением степени водонасыщения, но оставалось почти неизменным в частично насыщенных песчаниках.

Если рассматривать возбуждение сдвиговых волн, то для их генерации в большинстве случаев используют такие эффекты, как поперечный пьезоэффект, трансформацию энергии продольной волны в сдвиговую при наклонном падении волн на границу раздела сред или ЭМА датчики, недостатки которых описаны выше. При использовании поперечного пьезомодуля следует учитывать, что он более чем в два раза меньше, чем продольный, и его использование не

эффективно. Наклонные пьезопреобразователи сдвиговых волн наиболее распространены, но работают, как правило, на резонансных частотах, а генерация и прием широкополосных импульсов с их помощью приводит к узкому динамическому диапазону.

Тем не менее, интерес к созданию широкополосных преобразователей сдвиговых волн появился в 90-ые годы прошлого столетия в областях, связанных с медициной [102, 103]. Это было обусловлено тем, что скорость сдвиговой волны через плотность среды связана, с одной стороны, с модулем сдвига, знание которого важно для биотканей, а, с другой, появляется возможность построения изображения внутренней структуры таких объектов с использованием сдвиговых упругих волн, которые более чувствительны к неоднородностям среды. В первых работах [102, 103] была описана теоретическая модель сдвиговых колебаний в мягких биологических тканях, дистанционно индуцированных радиационной силой сфокусированного ультразвука. Здесь же рассмотрена возможность визуализации структур тканей на основе скорости сдвиговой волны для исследования эластичности внутренних областей тела. Было показано, что по сравнению с другими подходами к визуализации эластичности индуцированная деформация ткани может быть сильно локализована, поскольку дистанционно возбуждаемые сдвиговые волны полностью затухают в очень ограниченной области вблизи фокальной точки сфокусированного ультразвукового луча. В работах [102, 103] были впервые представлены некоторые экспериментальные результаты пилотных исследований, доказывающих осуществимость данной ультразвуковой технологии, а также зарегистрированы пространственно-временные профили распространяющихся сдвиговых волн, которые полностью подтверждали результаты математического моделирования.

Дальнейшие усилия исследователей были направлены на разработку широкополосных ультразвуковых датчиков сдвиговых волн для задач эластометрии. Так, в работах [104,105] была разработана и апробирована система, в которой высокочастотный фокусирующий пьезопреобразователь с воздушной связью интегрируется с компактным оптоволоконным интерферометром для

достижения широкополосной бесконтактной генерации и обнаружения сдвиговой волны. Были получены акустические импульсы сдвиговых волн длительностью 200 мкс и амплитудой давления до десятков кПа. Однако для диагностики образцов горных пород полученных значений давлений не достаточно из-за сильного затухания ультразвука в них.

Как было отмечено выше, S-волны имеют более высокую чувствительность к структурным неоднородностям геоматериалов по сравнению с L-волнами. По их характеристикам можно оценить анизотропию структуры исследуемых сред, их динамические модули упругости и коэффициент Пуассона. При этом проблема обнаружения сдвиговой волны и определения значения ее скорости с необходимой точностью в гетерогенных средах является нетривиальной задачей.

Современные источники ультразвука в лазерно-ультразвуковой диагностике, базирующиеся на термооптическом преобразовании, эффективно возбуждают в основном продольную акустическую волну [106]. Сдвиговая упругая волна возникает при отражении продольной волны от границы раздела двух сред или в результате возникновения здесь малых сдвиговых деформаций [107,108]. При этом повышение эффективности генерации сдвиговых волн может достигаться за счет фокусировки лазерного пучка для увеличения сдвиговых деформаций на границе. Так, в работе [107] использовался сфокусированный лазерный пучок диаметром 150 мкм для генерации сдвиговых волн, ширина диаграммы направленности которых достигала десятков градусов. Ввиду столь широкой диаграммы направленности получаемых S-волн и сильного затухания, их регистрация в гетерогенных средах и неоднородных по структуре горных породах практически невозможна.

В работе [108] были проведены эксперименты по получению широкополосных импульсов сдвиговых акустических волн на основе явления трансформации продольной акустической волны, возбуждаемой импульсно-периодическим лазером, при ее наклонном падении на границу твердого тела. Известно, что если угол падения продольной волны больше, чем первый критический угол, то во вторую среду будет распространяться акустическое поле

с большей сдвиговой компонентой. Исходя из этого, в работе [108] была рассмотрена следующая схема: импульс лазера поглощался на поверхности стекла СЗС-22, расширение свободной поверхности приводило к возникновению биполярного импульса продольной волны. Через слой дистиллированной воды эти импульсы падали на поверхность призмы из дюралюминия под углом, большим первого критического. Таким образом, в дюралюминиевую призму попадали импульсы сдвиговых волн, которые регистрировалась задемпфированным пьезоприемником. Данные исследования открыли предпосылки к созданию термооптического генератора сдвиговых волн для решения задач не только классической дефектоскопии, но и лазерно-ультразвуковой диагностики горных пород.

В работе [106] была предложена аналогичная схема генерации широкополосных импульсов сдвиговых волн в пластинах из различных материалов. Здесь образец, оптико-акустический генератор импульсов продольных волн и задемпфированный пьезоприемник помещались в кювету с водой. Образец поворачивался таким образом, чтобы на его переднюю поверхность падала продольная волна под углом, большим первого критического. В этом случае в образце распространялась только сдвиговая волна, которая при прохождении тыльной поверхности трансформировалась в продольную, для которой исследовались амплитудный и фазовый спектры.

Однако при изучении физико-механических свойств горных пород описанные выше иммерсионные методы генерации широкополосных импульсов сдвиговых волн не применимы вследствие пористости образцов.

1.4 Определение динамических модулей упругости на основе ультразвуковых измерений и их связь со статическими

Начиная с 70-х прошлого столетия годов большое внимание уделялось корреляционным связям статических модулей упругости, определяемым из

механических испытаний, с динамическими, рассчитываемыми из измеренных скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн [109-114].

Интенсивные исследования в данной области обусловлены тем, что геомеханическое моделирование поведения массива горных пород при его разработке, отработка нефтяных пластов и других процессах требует знания значений модулей упругости. Однако при ограниченном выходе керна эти значения не всегда можно определить. Динамические же модули упругости можно определить на образцах малых размеров. Поэтому весьма актуальным становится нахождение корреляционных взаимосвязей динамических и статических модулей упругости.

В работе [115] представлен статистический анализ основных физических, механических и ультразвуковых характеристик различных образцов осадочных пород (известняк, калькаренит, мергелистый кальцисилтит и песчаник) с целью поиска надежных моделей для прогнозирования статического модуля упругости. Здесь с помощью одиночной и множественной регрессии и искусственной нейронной сети созданы модели прогнозирования статических модулей упругости на основе измеренных скоростей продольных и сдвиговых волн.

Понимание механического поведения горной породы является фундаментальным требованием для многих геологических исследований [116]. На основе частотных зависимостях скоростей продольных и сдвиговых волн в данной работе предложен новый подход к получению статического модуля горных пород для образцов гранита, которые подвергались температурным воздействиям. Измерялись скорости продольных и сдвиговых волн этих образцов на различных частотах. Статические модули всех образцов были рассчитаны по построенным регрессионным зависимостям.

В работе [111] проводился ультразвуковой скважинный каротаж на известняках месторождений Асмари и Сарвак, которые являются двумя основными нефтедобывающими формациями в Иране и на Ближнем Востоке. Керновый материал, полученный из скважин, был ограниченным. В лабораторных условиях на образцах измерялись скорости продольных и

сдвиговых волн, рассчитывались динамические модули упругости. Для этих же образцов проводились механические испытания на одноосное сжатие, рассчитывался статический модуль упругости. На основе полученных данных строилась зависимость статического модуля упругости от динамического. Использование данных акустического каротажа и построенных зависимостей дало возможность интерполировать значения статического модуля упругости на всю длину скважины.

В работе [114] представлена взаимосвязь между статическими и динамическими модулями упругости для известняка Сан-Кристобаль, который использовался для строительства некоторых из наиболее представительных исторических сооружений в Андалусии (Испания) в течение XV-XVIII веков, включая религиозные, военные и гражданские здания. Авторами отмечалось, что перед началом реставрационных работ необходимо создавать цифровые модели таких объектов, в которые будут заложены не только физико-механические свойства отдельных элементов, но и их структурные особенности с учетом процессов выветривания. Для такого рода оценок необходимо использовать статический модуль упругости горных пород с целью расчета напряженно-деформированного состояния исторических зданий. Наиболее распространенным методом определения статических модулей является испытание на одноосное сжатие образцов в лаборатории. Однако этот процесс имеет ряд ограничений, которые важно учитывать в случае исторических построек. Главный из них – его деструктивный характер, что недопустимо в конструкциях такого рода. Все это обычно приводит к небольшому количеству извлеченных образцов, из которых невозможно получить репрезентативные значения модуля упругости. При этом процессы выветривания в течение нескольких столетий приводят к тому, что значения упругих характеристик могут значительно различаться в одном и том же здании в зависимости от расположения в нем камня, в целом, если сооружение строилось поэтапно.

Поэтому механические испытания необходимо дополнять методами неразрушающего контроля. Однако, как отмечают авторы [114], аналитические

выражения, используемые для установления этих корреляционных взаимосвязей, традиционно получали путем применения методов регрессии простыми функциями - линейными, логарифмическими или экспоненциальными. Большинство из этих функций давали прогнозы с коэффициентами детерминации, не превышающими 0,90, что недостаточно для таких сложных объектов, как исторические памятники. Поэтому в работе [114] рассмотрены линейная, полиномиальная и нелинейная множественные регрессии, в которых учитывались такие параметры, как объемная плотность и пористость. Было получено уравнение связи статического и динамического модулей упругости с коэффициентом детерминации 0,95. Найденное уравнение позволяло предсказать статический модуль упругости известняка Сан-Кристобаля с высокой степенью достоверности при применении неразрушающих методов, обеспечивающих бережное отношение к архитектурному наследию.

1.5 Постановка задач исследования

На основе анализа материалов данной главы было определено, что для прецизионного расчёта динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона необходимо повысить точность регистрации сдвиговой волны для последующего измерения ее скорости. Таким образом, была сформулирована цель диссертационной работы, заключающаяся в разработке метода генерации широкополосных лазерно-ультразвуковых импульсов сдвиговых волн для прецизионного расчета скоростей данного типа волн в образцах горных пород. В соответствии с приведенной выше целью были сформулированы следующие задачи:

1. Проведение анализа и систематизации отечественного и зарубежного опыта по методам генерации ультразвуковых волн для определения упругих свойств горных пород;
2. Компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольной упругой волны в среде преобразователя и полной ее

трансформации в сдвиговую на границе «изотропное твердое тело – воздух» в программном пакете COMSOL Multiphysics;

3. На основе численных расчетов и компьютерного моделирования проектирование лазерно-ультразвукового преобразователя широкополосных импульсов сдвиговых упругих волн, проведение апробации его работы на модельных образцах стекла, нержавеющей стали и алюминия;
4. Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовых скоростей от частоты) в исследованных модельных образцах. Определение частотного диапазона работы преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают;
5. Выявление недостатков и ограничений в работе классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн при исследовании образцов горных пород;
6. Выполнение серии измерений скоростей распространения сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн;
7. Определение частотных диапазонов работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при котором значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %;
8. Определение значений динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона для исследованных горных пород;
9. Модернизация разработанного преобразователя и поиск конструктивных решений для повышения его эргономичности.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЯМОЙ ГЕНЕРАЦИИ СДВИГОВОЙ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В ШИРОКОПОЛОСНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ В ИССЛЕДУЕМУЮ СРЕДУ

2.1 Теоретическое описание возможности полной трансформации продольной упругой волны в сдвиговую на границе раздела «твердое изотропное тело – воздух»

В теории упругих волн [117] при изучении явлений отражения, преломления и трансформации принято рассматривать идеализированный случай в виде плоской границы между двумя полубесконечными однородными средами. Если среды могут представлять собой твердые тела, жидкости или газы (воздух), возможны пять различных случаев, которые рассматриваются отдельно: «твердое тело – твердое тело», «твердое тело – жидкость», «твердое тело – воздух», «жидкость – жидкость», «жидкость – воздух».

При всех вышеперечисленных случаях в первую очередь рассматривается задача теории упругих волн, граничные условия которой зависят в первую очередь от свойств соприкасающихся сред и характера контакта между ними.

Будем рассматривать случай распространения продольной упругой волны и ее отражение на границе «твердое тело – воздух», то есть отражение от свободной границы твердого тела. Термин «свободная граница» подразумевает, что твердое тело не граничит с другой средой, акустический импеданс которой на несколько порядков меньше, чем в твердом теле.

Рассмотрим плоскую задачу: упругие волны распространяются вдоль осей x, y (рис. 2.1), при этом сдвиговая волна S – вертикально поляризованная.

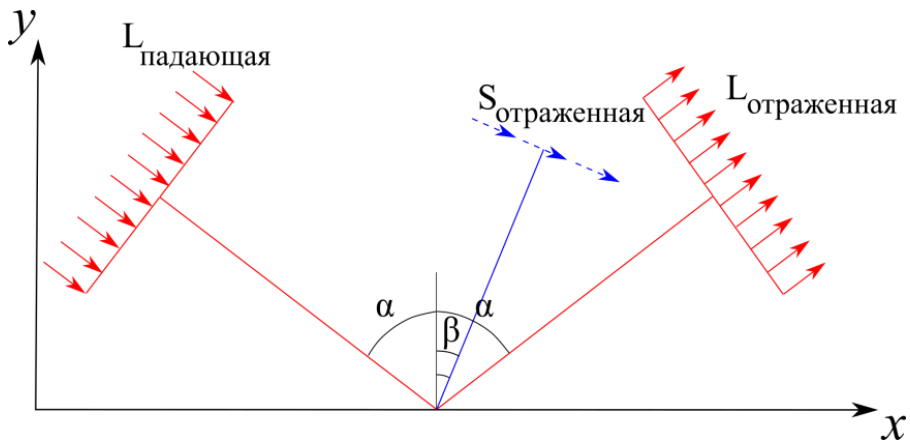


Рисунок 2.1 – Рассматриваемая задача распространения волн на свободной границе. Стрелками показан фронт волны и направления движения частиц, углы падения α и отражения β определяется лучевым параметром p

Пусть $\vec{U}_L(x,y)$ – смещение частиц в продольной волне, $\vec{U}_S(x,y)$ – смещение частиц в сдвиговой волне. Процесс распространения упругих волн удобнее записывать с помощью скалярного φ и векторного потенциала $\vec{\psi}$ которые вводятся следующим образом:

$$\vec{U}_L = grad\varphi \qquad \vec{U}_S = rot\vec{\psi} \tag{2.1}$$

Полное смещение $\vec{U}$ частиц в волне может быть записано как:

$$\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_S = grad\varphi + rot\vec{\psi} \tag{2.2}$$

В плоской постановке задачи для векторного потенциала отлична от нуля только z компонента: $\vec{\psi}(x,y) = (0,0,\psi_z)$. Тогда распространение упругих волн в твердом теле со свободной границей записывается в следующем матричном виде [118]:

$$\begin{pmatrix}\varphi_1\\ \psi_1\end{pmatrix} = \hat{S}\begin{pmatrix}\varphi_2\\ \psi_2\end{pmatrix} \tag{2.3}$$

где φ_2, ψ_2 – амплитуды потенциалов падающих продольной и сдвиговой волн; φ_1, ψ_1 – амплитуды потенциалов отраженных продольной и сдвиговой волн

соответственно; $\hat{S}$ – матрица рассеяния, которая в общем случае записывается в следующем виде [118]:

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} R_{LL} & R_{SL} \\ R_{LS} & R_{SS} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

где R_{LL} – коэффициент отражения продольной волны при падающей продольной волне ($\psi_2 = 0$); R_{LS} – коэффициент трансформации продольной волны в сдвиговую ($R_{LS} = \frac{\psi_1}{\varphi_2}$, когда $\psi_2 = 0$); R_{SL} – коэффициент трансформации сдвиговой волны в продольную ($R_{SL} = \frac{\varphi_1}{\psi_2}$, когда $\varphi_2 = 0$); R_{SS} – коэффициент отражения сдвиговой волны при падающей сдвиговой волне ($\varphi_2 = 0$)

При лазерном возбуждении ультразвука эффективность генерации продольных волн значительно выше, чем сдвиговых, вследствие малости поперечных деформаций [106]. Известно, что при падении продольных волн на границу раздела двух твердых тел происходит их отражение и преломление, а также трансформация части их энергии в сдвиговую волну (рис. 2.1). Важной особенностью является то, что при определённом угле падения на свободную границу раздела с изотропным твердым телом продольная волна полностью трансформируется в сдвиговую. Найдем при каких условиях происходит такая конверсия.

Пусть перпендикулярно к передней грани призмы, выполненной из материала с малым значением коэффициента затухания ультразвука в широком диапазоне частот, падает продольная волна $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ (рис. 2.2). Поскольку наклонная поверхность призмы граничит с воздухом (является акустически свободной), то вся энергия падающей волны отражается в материал призмы. В отраженном сигнале возникают две волны: продольная и вертикально поляризованная сдвиговая.

Далее по тексту диссертации и в рисунках приняты следующие обозначения: «*Г*→» – волна, распространяющаяся от генератора; «*П*←» – волна,

распространяющаяся к приемнику; *1* – волна, распространяющаяся в среде призмы; *2* – волна, распространяющаяся в среде образца.

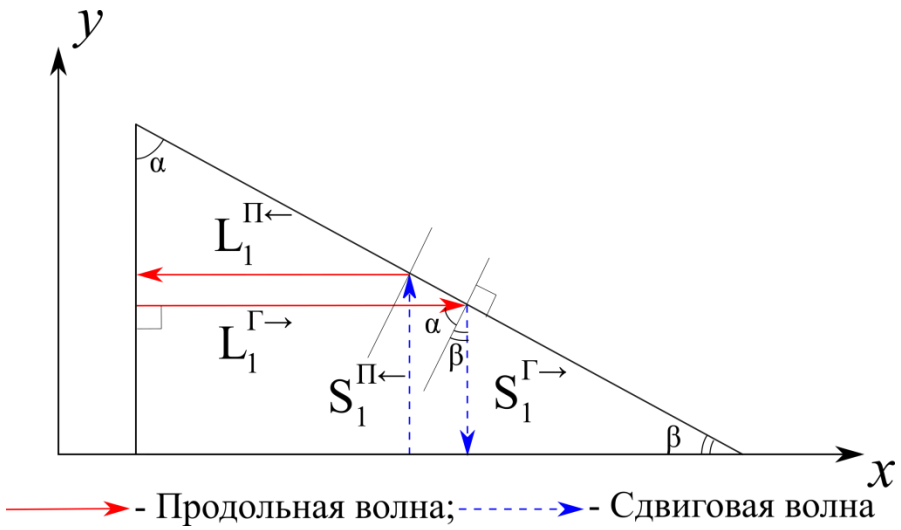


Рисунок 2.2 – Рассматриваемая геометрия задачи отражения продольной волны на границе «изотропное твердое тело – воздух»

Продольная волна $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ полностью трансформируется при отражении в сдвговую $S_1^{\Gamma\rightarrow}$, если коэффициент матрицы рассеяния $R_{LL} = 0$.

В работе [118] на основе матрицы рассеяния (2.4) с учетом граничных условий и обращения в ноль на свободной границе нормальной компоненты напряжений было получено соотношение:

$$R_{LL} = \frac{\sqrt{k_l^2-\xi^2}\times\sqrt{k_t^2-\xi^2}-(\xi-\frac{k_t^2}{2\xi})^2}{\sqrt{k_l^2-\xi^2}\times\sqrt{k_t^2-\xi^2}+(\xi-\frac{k_t^2}{2\xi})^2} \qquad (2.5)$$

получим:

$$\sqrt{k_l^2-\xi^2}\times\sqrt{k_t^2-\xi^2} = (\xi-\frac{k_t^2}{2\xi})^2 \qquad (2.6)$$

где $k_l = \frac{\omega}{V_L}$; $k_t = \frac{\omega}{V_S}$ - волновые числа падающей продольной волны и отраженной сдвиговой волны в среде призмы; ξ – горизонтальная компонента волнового

вектора; V_L, V_S – скорости распространения в среде призмы продольной и сдвиговой волн соответственно.

Коэффициенты отражения и трансформации также возможно выразить через углы между нормалью к свободной поверхности и фронтами продольных и сдвиговых волн. Тогда в уравнении (2.6):

$$k_l \times cos\alpha = \sqrt{k_l^2 - \xi^2} \tag{2.7}$$

$$k_t \times cos\beta = \sqrt{k_t^2 - \xi^2} \tag{2.8}$$

$$\xi = k_l \times sin\alpha = k_t \times sin\beta \tag{2.9}$$

где α – угол между фронтом падающей продольной волны и нормалью к свободной поверхности призмы; β – угол между фронтом отраженной сдвиговой волны и нормалью к свободной поверхности призмы.

В таком случае уравнение (2.6) примет вид:

$$k_l \times cos\alpha \times k_t \times cos\beta = k_t^2 \times \frac{cos^2 2\beta}{4sin^2\beta} \tag{2.10}$$

или:

$$k_l \times cos\alpha \times tg^2(2\beta) = k_t \times cos\beta. \tag{2.11}$$

Откуда получим:

$$k_l \times sin\alpha = k_t \times sin\beta. \tag{2.12}$$

Подставляя в данные выражения волновые числа падающей продольной волны и отраженной сдвиговой волны в среде призмы получим выражения для расчета углов α и β:

$$\sqrt{\frac{V_S^2}{V_L^2} - sin^2\beta} \times tg^2(2\beta) = cos\beta \quad (2.13)$$

$$sin\alpha = \frac{V_L}{V_S} sin\beta \quad (2.14)$$

При выполнении соотношения (2.14) вся энергия падающей продольной волны конвертируется в энергию отраженной сдвиговой волны.

Выражения (2.13) и (2.14) получены при условии, что на свободную границу призмы падает плоская монохроматическая продольная волна. Однако в нашем случае на границу раздела падает широкополосный ультразвуковой сигнал с ограниченной апертурой, в котором присутствуют лучи с углом падения, незначительно отличающимся от угла α. Поэтому при численной оценке необходимо было подобрать значения углов α и β, при которых наибольшая часть энергии продольной волны преобразуется в сдвиговую для широкополосных пучков продольных волн с ограниченной апертурой.

Следует отметить, что в выражении (2.14) фигурирует отношение скоростей $\frac{V_L}{V_S}$, которое определяется только коэффициентом Пуассона μ:

$$\frac{V_L}{V_S} = \sqrt{2 \cdot \frac{1-\mu}{1-2\mu}} \quad (2.15)$$

Поэтому важным параметром при выборе угла призмы является величина коэффициента Пуассона материала, из которого она будет выполнена.

Коэффициенты R_{LL} возможно представить как известные функции угла падения продольной волны α при различных значениях коэффициента Пуассона (рис. 2.3).

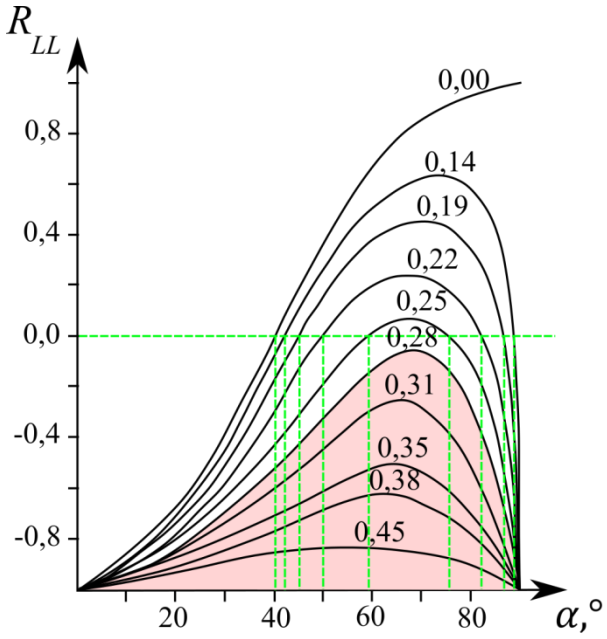


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента отражения продольной волны на свободной границе твердого тела от угла падения для различных значений коэффициента Пуассона

Из рис. 2.3 видно, что при коэффициенте Пуассона среды $\mu \leq 0{,}26$ возможны два решения выражений (2.13) и (2.14). При $\mu > 0{,}26$ условие полной трансформации волн не выполняется. Также видно, что диапазон углов отражения продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ составляет $\alpha = 40^\circ - 90^\circ$, которые обеспечивают полную трансформацию $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ в сдвиговую $S_1^{\Gamma\rightarrow}$.

Таким образом, при проектировании призмы, в которой осуществлялась бы полная трансформация энергии продольной волны в сдвиговую, необходимо решить следующие задачи:

1) Подобрать материал призмы с коэффициентом Пуассона $\mu \leq 0{,}26$, значение которого можно рассчитать по прецизионно измеренным значениям скоростей продольных и сдвиговых волн в соответствии с выражениями (2.13) и (2.14);

2) Для выбранного материала с $\mu \leq 0{,}26$ выполнить численную оценку угла падения (одного из углов призмы) α плоской монохроматической продольной волны на свободную границу (рис. 2.2), при котором в отраженном сигнале наблюдается полная конверсия ее энергии в сдвиговую. Также нужно оценить угол отражения β сдвиговой вертикально поляризованной волны.

2.2 Выбор материала и углов призмы для достижения полной трансформации энергии продольной волны в сдвиговую с помощью теоретических оценок

2.2.1 Выбор материала

В ходе решения первой из поставленных задач был проведен анализ потенциально возможных материалов призмы. Помимо того, что коэффициент Пуассона материала должен быть $\mu \leq 0{,}26$, важным является требование малости значения коэффициента затухания ультразвука в широком диапазоне частот. В табл. 2.1 приведены наиболее распространённые оптические материалы, используемые в оптоакустических задачах, для которых приведен анализ их потенциального использования при разработке призмы.

Таблица 2.1 – Наиболее распространённые оптические материалы, используемые в оптоакустических задачах

Материал	Обозначение	μ, при 25° С	Примечание
Селенид цинка	CVD-ZnSe	0,28	$\mu > 0{,}26$
Фторид кальция	CaF2	0,26	Растворим в воде
Фторид бария	BaF2	0,343	$\mu > 0{,}26$
Фторид магния	MgF2	0,276	
Фторид лития	LiF	0,326	
Лейкосапфир	Al2O3	0,25	Трудоемок в изготовлении
Кварцевое стекло	**КС**	**0,17**	**Потенциальный материал для призмы**
Бесцветное оптическое стекло	**БС**	**0,26**	
Тяжелый флинт	**ТФ8**	**0,26**	
Хлорид натрия	NaCl	0,252	Растворим в воде
Хлорид калия	KCl	0,216	
Бромид калия	KBr	0,203	
Кремний	Si	0,266	$\mu > 0{,}26$
Германий	Ge	0,28	
Арсенид галлия	GaAs	0,31	
Сульфид цинка	ZnS	0,28	
Медь	Cu	0,35	
Молибден	Mo	0,31	
Алюминий	Al	0,33	

Первоначально были исключены материалы с коэффициентом Пуассона $\mu > 0{,}26$. Поскольку в процессе изготовления призмы, а также в ходе работы материал будет периодически контактироваться с водой, были исключены материалы, растворимые в воде. Лейкосапфир подходит по своим свойствам для материала призмы, но ввиду его высокой стоимости и сложности в обработке также был исключен. Таким образом, были выбраны 3 основных материала, характеристики которых в дальнейшем были использованы для проведения теоретических оценок и компьютерного моделирования – кварцевое стекло, бесцветное оптическое стекло, тяжелый флинт.

2.2.2 Проведение лазерно-ультразвуковой диагностики с целью определения скоростей распространения упругих волн в потенциальных материалах для призмы

Для проведения численных оценок углов α и β по выражениям (2.13) и (2.14) были измерены скорости распространения упругих волн в выбранных материалах с помощью эхо-режима лазерно-ультразвуковой диагностики (ЛУД) на дефектоскопе «УДЛ-2М» с оптико-акустическим преобразователем «ПЛУ-6П-02» (рис. 2.4).

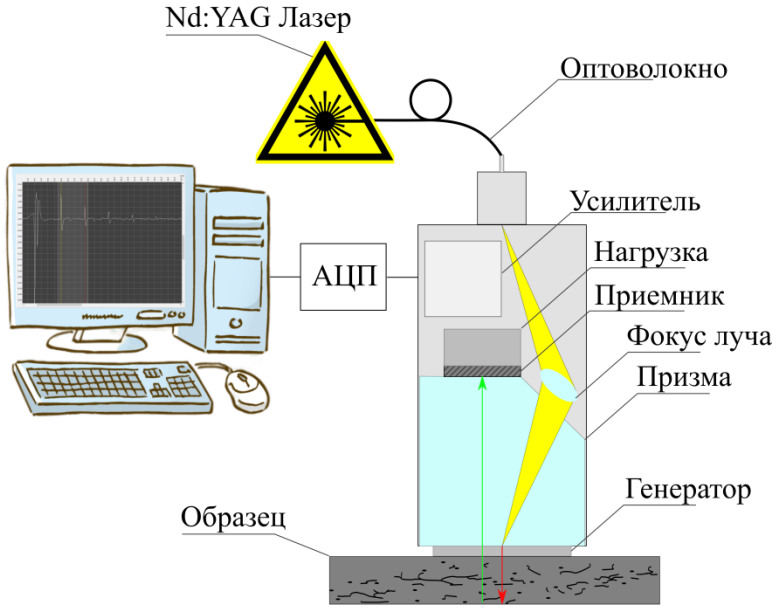


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема проведения лазерно-ультразвуковой диагностики

Принцип действия эхо-режима ЛУД основан на том, что короткий наносекундный импульс ND:YAG лазера через оптоволокно направляется к генератору преобразователя через призму, выполненную из оргстекла. Вследствие поглощения лазерного излучения и возникновения термоупругого эффекта, возбуждается ультразвуковой импульс продольных волн, с гауссовым распределением давления по поперечному сечению, длительностью порядка 70 нс и амплитудой давления 0,1 МПа, который направляется в исследуемый образец. В результате явлений отражения и преломления на границе раздела «генератор-образец» возникают три волны: первая продольная волна отражается от границы раздела и направляется к приемнику, сигнал от которой является опорным $L_{02}^{\text{П}\leftarrow}$; вторая продольная волна и образовавшиеся сдвиговая волны направляются в исследуемый образец, частично рассеиваются на различных неоднородностях, отражаются от тыльной стороны образца и также регистрируются приемником. Сигналы, зарегистрированные приемником, после усиления обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения на основе измерения времен распространения каждого из типов волн.

Скорости распространения упругих волн были рассчитаны согласно следующему алгоритму, описание которого соответствует рис. 2.5:

1) После получения временной формы сигнала фиксируются времена прихода по максимумам импульсов первого $L_{\text{эхо}}^{1}$ и второго $L_{\text{эхо}}^{2}$ отражений от тыльной поверхности исследуемого образца. Данные импульсы будут идентифицированы как две продольные волны;

2) Скорость распространения продольной волны V_L рассчитывается по формуле:

$$V_L = \frac{2h_{\text{обр}}}{T_{L_{\text{эхо}}^{2}}^{max} - T_{L_{\text{эхо}}^{1}}^{max}} \tag{2.16}$$

где $T_{L_{\text{эхо}}^{1}}^{max}$ – зарегистрированное время прихода импульса первого отражения от тыльной поверхности образца, $T_{L_{\text{эхо}}^{2}}^{max}$ – зарегистрированное время прихода

импульса второго отражения от тыльной поверхности образца, $h_{\text{обр}}$ – толщина образца.

3) Время прихода импульса сдвиговой волны некорректно регистрировать аналогично действиям, описанным в пункте 2, поскольку при работе с широкой полосой частот на время прихода импульса сдвиговой волны достаточно сильно влияет дифракция. Поэтому для более точного определения его положения все полученные сигналы были продифференцированы. В точках максимума производная обращалась в нуль, положение которого и регистрировалось.

4) Скорость распространения сдвиговой волны V_S рассчитывается по формуле:

$$V_S = \frac{h_{\text{обр}}}{(T^{min}_{S_{\text{эхо}}} - T^{max}_{L^1_{\text{эхо}}}) + \frac{h_{\text{обр}}}{V_L}} \tag{2.17}$$

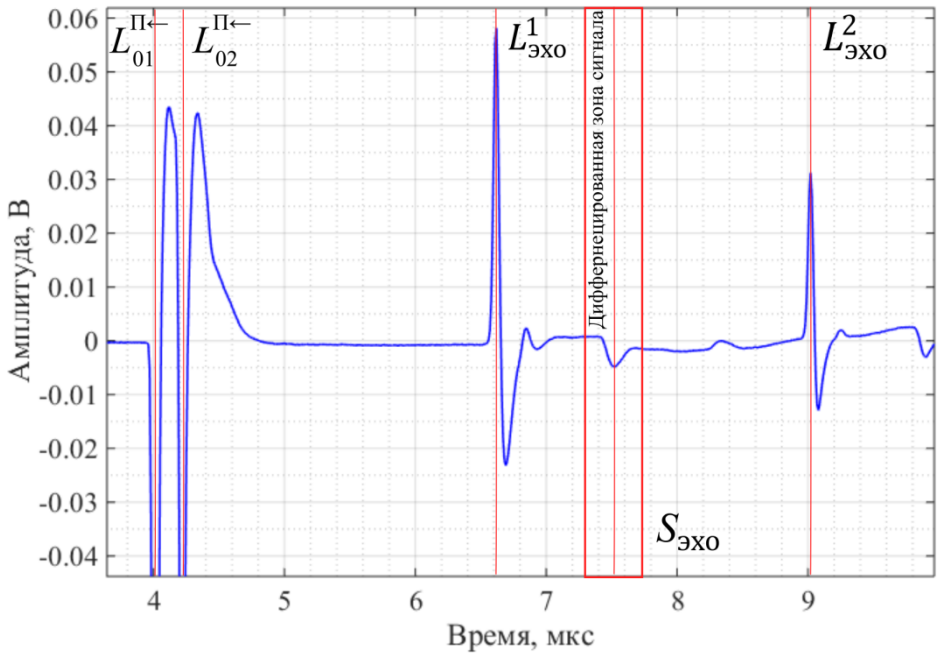


Рисунок 2.5 – Пример временной формы сигнала, по которой производится расчёт скоростей прохождения продольной и сдвиговой волн

В табл. 2.2 приведены результаты измерений скоростей распространения упругих волн и расчета коэффициента Пуассона в выбранных материалах. Отклонение параллельности граней образцов составляло менее 0,01 мм

относительно ниже приведенных толщин. Ошибка скорости распространения волн была рассчитана как стандартное отклонение значений скоростей, определенных локально в разных точках по поверхности образцов. Расчет коэффициента Пуассона проводился исходя из соотношения (2.15).

Таблица 2.2 – Результаты измерения скоростей распространения упругих волн в выбранных материалах

Материал	Номер образца	Толщина, мм*	V_L, м/с	V_S, м/с	Коэффициент Пуассона μ
Кварцевое стекло	КС_1	10,15	5883±8	3690±6	0,17±0,01
	КС_2	6,56	5879±2	3686±14	
	КС_3	4,45	5874±5	3684±10	
	КС_4	7,50	5880±3	3689±5	
	КС_5	9,10	5881±4	3687±1	
Бесцветное оптическое стекло	ОС_1	5,20	5844±1	3351±2	0,25±0,01
	ОС_2	5,70	5850±9	3361±10	
	ОС_3	4,96	5857±5	3350±7	
	ОС_4	4,65	5856±7	3350±11	
	ОС_5	3,98	5854±2	3360±6	
Тяжелый флинт	ТФ_1	10,78	3676±14	2125±8	0,25±0,01
	ТФ_2	17,45	3641±18	2140±10	
	ТФ_3	11,45	3656±15	2115±9	
	ТФ_4	10,00	3680±9	2119±7	
	ТФ_5	8,43	3672±19	2121±10	

* измерения производились с точностью ±0,01, мм

2.2.3 Выполнение численных расчётов углов призмы с помощью программного пакета «WolframAlpha»

Для каждого из выбранных материалов в соответствии с выражением (2.13) были рассчитаны значения углов отражения β продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ от свободной границы призмы (согласно обозначениям на рис. 2.2), исходя из средних значений скоростей в материалах для каждой серии измерений. Расчет производился с помощью программного пакета «WolframAlpha». На рис. 2.6 приведены результаты численного расчета угла β в радианах для каждого

материала. Далее, с помощью выражения (2.14) были вычислены искомые значения углов падения α продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы.

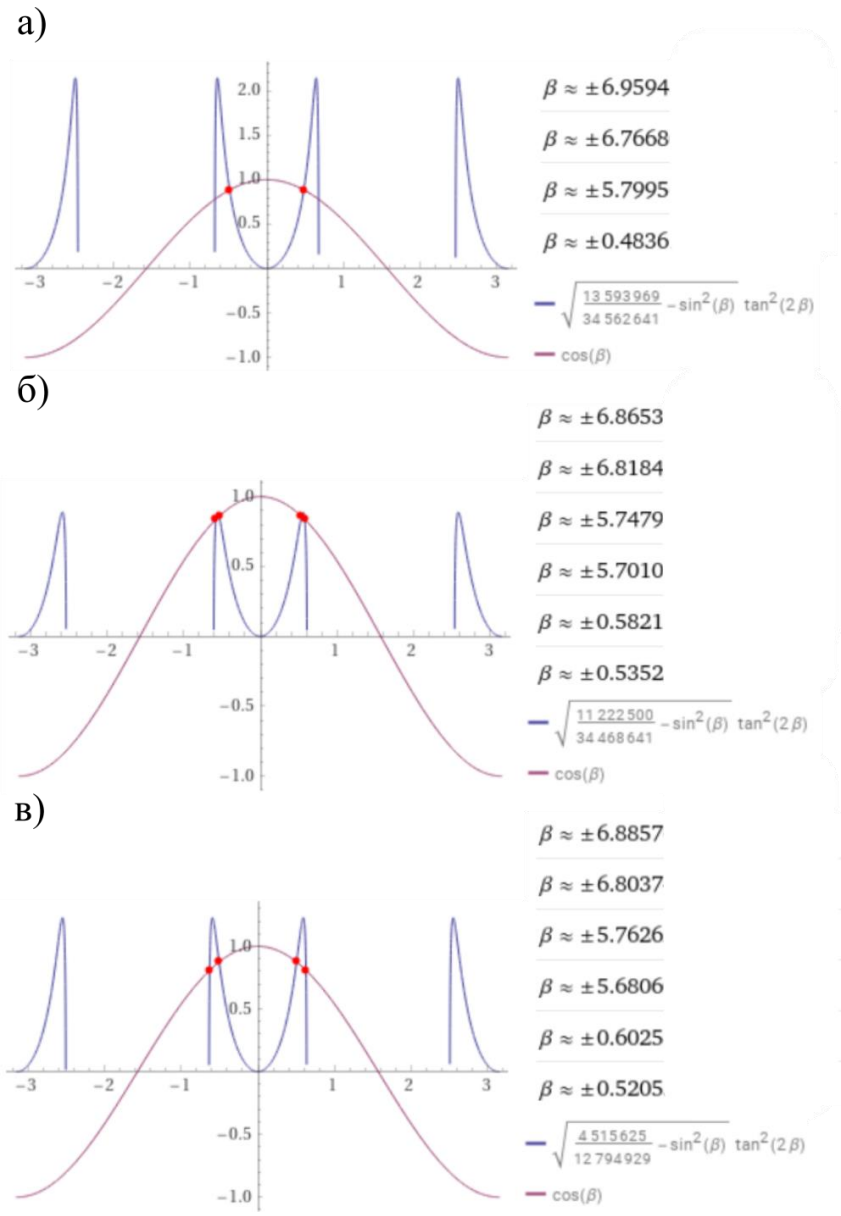


Рисунок 2.6 – Результаты численного расчета углов β при использовании в качестве материалы призмы а) кварцевого стекла; б) бесцветного оптического стекла; в) тяжелого флинта

Исходя из полученных результатов были определены следующие углы при использовании того или иного материала:

1) Кварцевое стекло: $\alpha_1 = 86{,}39°, \beta_1 = 38{,}75°; \alpha_2 = 47{,}85°, \beta_2 = 27{,}71°;$

2) Бесцветное оптическое стекло: $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°; \alpha_2 = 75{,}65°, \beta_2 = 33{,}90°;$

3) Тяжелый флинт: $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°; \alpha_2 = 77{,}99°, \beta_2 = 34{,}53°.$

2.3 Расчет коэффициентов отражения и трансформации продольной волны на свободной границе призмы из выбранных материалов

В соответствии с рис. 2.2 продольная волна $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ трансформируется в сдвиговую $S_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободной границе призмы, направляется на нижнюю грань призмы, отражается от нее как сдвиговая ($R_{SS}=1$), на свободной границе призмы трансформируется в продольную волну $L_1^{\Pi\leftarrow}$ и регистрируется приемником. Процесс распространения можно описать умножением ее амплитуды на все коэффициенты отражения и трансформации $R_{LL}, R_{LS}, R_{SL}, R_{SS}$.

Проведенные численные расчеты в разделе 2.2 основывались на том, что коэффициент отражения продольной волны при падающей продольной волне должен быть равен $R_{LL}=0$, т.е. должно выполняться соотношение (2.6).

Целью данного раздела является дополнительная проверка проведенных численных расчетов путем рассмотрения полного поля углов отражения продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ и определение коэффициентов трансформации R_{LS}, R_{SL} с помощью соотношений [119]:

$$R_{LS} = 4\frac{V_L}{V_S}p\frac{\cos\alpha}{V_L}\left(\frac{1}{V_S^2}-2p^2\right)/D \tag{2.18}$$

$$R_{SL} = 4\frac{V_S}{V_L}p\frac{\cos\beta}{V_S}\left(\frac{1}{V_S^2}-2p^2\right)/D \tag{2.19}$$

где p – лучевой параметр (горизонтальная медленность), определяющий угол распространения упругих волн в среде, $p=\sin\alpha/V_L=\sin\beta/V_S$; $D=\left(\frac{1}{V_S^2}-2p^2\right)^2+4p^2\frac{\cos\alpha}{V_L}\frac{\cos\beta}{V_S}$.

В табл. 2.3 приведены результаты определения коэффициентов R_{LS}, R_{SL} для случая применения в качестве материала призмы бесцветного оптического стекла со значениями скоростей распространения $V_L=5879$ м/с, $V_S=3587$ м/с.

Таблица 2.3 – Результаты расчета коэффициентов R_{LS}, R_{SL} при использовании кварцевого стекла

№	$\alpha°$	$\beta°$	p / 10^4	D / 10^{15}	R_{LS}	R_{SL}	$R_{LS} \times R_{SL}$
1	40	23,77	1,093	4,012	1,1246	0,8426	0,9475
2	42	24,81	1,138	3,883	1,1260	0,8626	0,9713
3	44	25,83	1,182	3,751	1,1219	0,8804	0,9878
4	46	26,82	1,224	3,615	1,1125	0,8964	0,9972
5	**47,85**	**27,71**	**1,261**	3,487	**1,0994**	**0,9096**	**1,0000**
6	50	28,71	1,303	3,335	1,0791	0,9234	0,9965
7	52	29,62	1,340	3,190	1,0559	0,9351	0,9874
8	54	30,49	1,376	3,044	1,0289	0,9460	0,9734
9	56	31,33	1,410	2,895	0,9987	0,9567	0,9554
10	58	32,13	1,443	2,744	0,9656	0,9677	0,9344
11	60	32,90	1,473	2,591	0,9302	0,9797	0,9114
12	62	33,62	1,502	2,437	0,8932	0,9935	0,8874
13	64	34,31	1,529	2,281	0,8548	1,0102	0,8635
14	66	34,95	1,554	2,124	0,8158	1,0309	0,8410
15	68	35,55	1,577	1,966	0,7764	1,0575	0,8211
16	70	36,11	1,598	1,807	0,7372	1,0921	0,8050
17	72	36,62	1,618	1,648	0,6983	1,1375	0,7943
18	74	37,07	1,635	1,489	0,6599	1,1980	0,7906
19	76	37,48	1,650	1,329	0,6219	1,2794	0,7956
20	78	37,84	1,664	1,170	0,5837	1,3906	0,8117
21	80	38,14	1,675	1,011	0,5442	1,5458	0,8412
22	82	38,39	1,684	0,854	0,5009	1,7690	0,8860
23	84	38,59	1,692	0,698	0,4487	2,1043	0,9442
24	86	38,73	1,697	0,544	0,3769	2,6432	0,9961
25	**86,39**	**38,75**	**1,698**	0,514	**0,3588**	**2,7868**	**0,9998**
26	40	23,77	1,093	0,401	1,1246	0,8426	0,9475

На рис. 2.7 приведена взаимосвязь углов падения α продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из кварцевого стекла и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$.

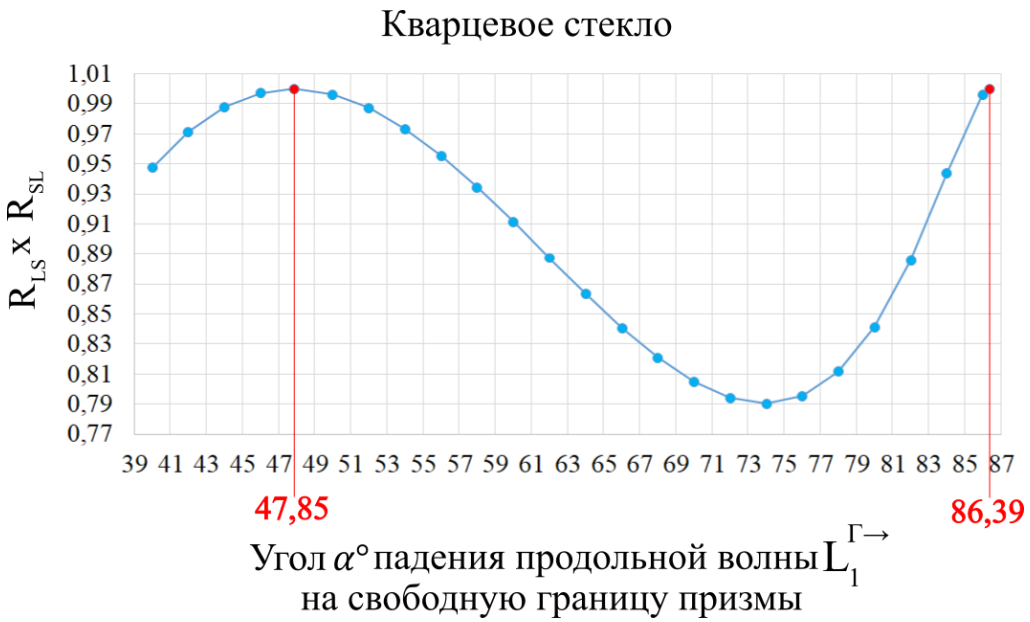


Рисунок 2.7 – Взаимосвязь углов падения $\alpha°$ продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из кварцевого стекла и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$

В табл. 2.4 приведены результаты определения коэффициентов R_{LS}, R_{SL} для случая применения в качестве материала призмы бесцветного оптического стекла со значениями скоростей распространения $V_L = 5852$ м/с, $V_S = 3355$ м/с

Таблица 2.4 – Результаты расчета коэффициентов R_{LS}, R_{SL} при использовании бесцветного оптического стекла

№	$\alpha°$	$\beta°$	p / 10^4	D / 10^{15}	R_{LS}	R_{SL}	$R_{LS} \times R_{SL}$
1	40	21,59	1,098	5,975	1,092	0,759	0,8293
2	42	22,56	1,143	5,758	1,103	0,786	0,8667
3	44	23,47	1,187	5,574	1,108	0,810	0,8974
4	46	24,36	1,229	5,385	1,108	0,833	0,9236
5	48	25,22	1,270	5,191	1,104	0,856	0,9454
6	50	26,05	1,309	4,994	1,096	0,878	0,9629
7	52	26,86	1,347	4,793	1,084	0,901	0,9765
8	54	27,63	1,382	4,590	1,068	0,923	0,9864
9	56	28,38	1,417	4,384	1,049	0,947	0,9932
10	58	29,09	1,449	4,175	1,027	0,971	0,9974
11	60	29,77	1,480	3,965	1,002	0,997	0,9995
12	**61,74**	**30,33**	**1,505**	**3,781**	**0,978**	**1,022**	**1,0000**
13	62	30,41	1,509	3,754	0,974	1,026	0,9999
14	64	31,02	1,536	3,541	0,944	1,058	0,9996
15	66	31,58	1,561	3,328	0,912	1,095	0,9989
16	68	32,11	1,584	3,115	0,878	1,138	0,9983

Продолжение таблицы 2.4.

№	$\alpha°$	$\beta°$	p / 10^4	D / 10^{15}	R_{LS}	R_{SL}	$R_{LS} \times R_{SL}$
17	70	32,60	1,606	2,903	0,841	1,187	0,9982
18	72	33,04	1,625	2,691	0,801	1,246	0,9987
19	74	33,44	1,643	2,481	0,759	1,317	0,9996
20	**75,65**	**33,74**	**1,656**	**2,309**	**0,721**	**1,387**	**1,0000**
21	76	33,80	1,658	2,272	0,713	1,403	0,9999
22	78	34,11	1,671	2,067	0,661	1,509	0,9973
23	80	34,37	1,683	1,864	0,602	1,640	0,9873
24	82	34,59	1,692	1,665	0,532	1,805	0,9611
25	84	34,76	1,699	1,471	0,447	2,016	0,9020
26	86	34,88	1,705	1,283	0,340	2,289	0,7774

На рис. 2.8 приведена взаимосвязь углов падения $\alpha°$ продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из бесцветного оптического стекла и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$.

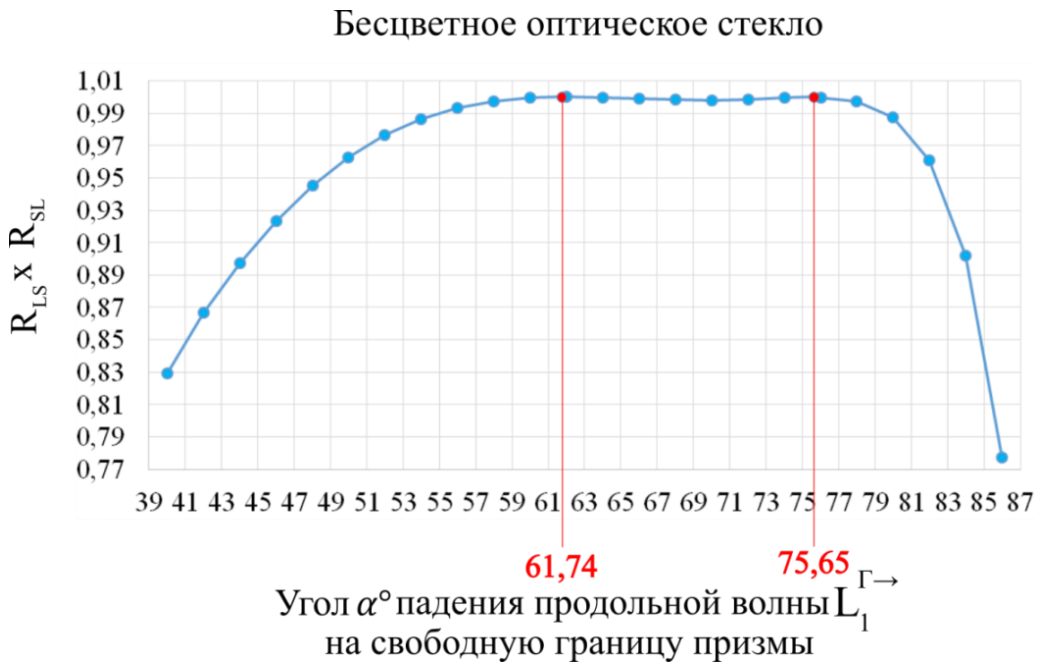


Рисунок 2.8 – Взаимосвязь углов падения $\alpha°$ продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из бесцветного оптического стекла и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$

В табл. 2.5 приведены результаты определения коэффициентов R_{LS}, R_{SL} для случая применения в качестве материала призмы тяжелого флинта со значениями скоростей распространения $V_L = 3665$ м/с, $V_S = 2124$ м/с.

Таблица 2.5 – Результаты расчета коэффициентов R_{LS}, R_{SL} при использовании кварцевого стекла

№	$\alpha°$	$\beta°$	p / 10^4	D / 10^{14}	R_{LS}	R_{SL}	$R_{LS} \times R_{SL}$
1	40	21,87	1,754	3,688	1,099	0,771	0,8474
2	42	22,82	1,826	3,576	1,108	0,796	0,8818
3	44	23,74	1,895	3,460	1,112	0,820	0,9116
4	46	24,64	1,963	3,341	1,111	0,843	0,9366
5	48	25,45	2,023	3,229	1,107	0,863	0,9556
6	50	26,36	2,090	3,096	1,097	0,887	0,9728
7	52	27,17	2,150	2,970	1,084	0,908	0,9846
8	54	27,96	2,207	2,843	1,068	0,930	0,9927
9	56	28,72	2,262	2,713	1,048	0,952	0,9975
10	58	29,44	2,314	2,583	1,025	0,976	0,9991
11	**59,11**	**29,82**	**2,341**	2,509	**1,010**	**0,990**	**1,0000**
12	60	30,13	2,363	2,451	0,999	1,001	0,9990
13	62	30,78	2,409	2,318	0,970	1,029	0,9986
14	64	31,39	2,452	2,184	0,940	1,060	0,9965
15	66	31,97	2,493	2,050	0,907	1,096	0,9944
16	68	32,50	2,530	1,916	0,872	1,138	0,9929
17	70	33,00	2,564	1,782	0,836	1,188	0,9924
18	72	33,45	2,595	1,649	0,797	1,247	0,9932
19	74	33,85	2,623	1,516	0,755	1,318	0,9955
20	76	34,22	2,647	1,384	0,710	1,406	0,9983
21	**77,99**	**34,53**	**2,669**	1,255	**0,660**	**1,515**	**1,0000**
22	78	34,53	2,669	1,254	0,660	1,515	0,9999
23	80	34,80	2,687	1,126	0,603	1,652	0,9964
24	82	35,02	2,702	0,999	0,536	1,827	0,9790
25	84	35,20	2,714	0,876	0,453	2,054	0,9310
26	86	35,32	2,722	0,757	0,347	2,354	0,8174

На рис. 2.9 приведена взаимосвязь углов падения $\alpha°$ продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из тяжелого флинта и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$.

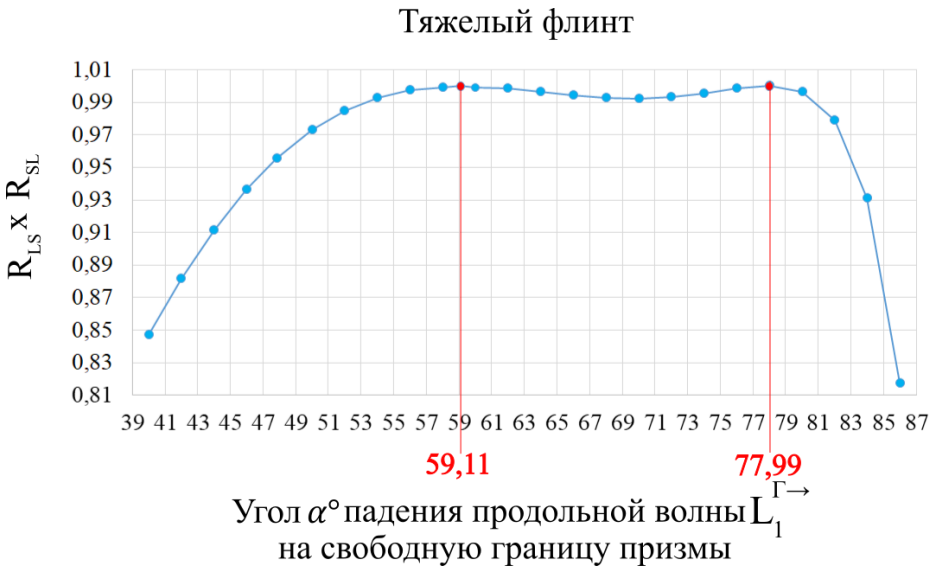


Рисунок 2.9 – Взаимосвязь углов падения α° продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ на свободную границу призмы из тяжелого флинта и произведения коэффициентов $R_{LS} \times R_{SL}$

Результаты, приведенные в табл. 2.3 – 2.5 и рис. 2.7 – 2.9, подтверждают корректность описанных в разделах 2.1 – 2.2 расчетов. Комбинации углов призм для каждого из потенциальных материалов подобраны верно.

2.4 Проверка проведенных расчетов с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics

2.4.1 Построение расчетной модели

Моделирование распространения акустического импульса продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ в среде призмы и характер ее отражения и трансформации от свободной границы было проведено в модуле Acoustic Solid Interaction Transient программного комплекса COMSOL Multiphysics [120]. Для имитации возбуждения импульса продольных волн среда генератора создавалась в режиме Pressure Acoustics, а среда призмы моделировалась как твердое тело в режиме Solid Mechanics.

В табл. 2.6 приведены геометрические параметры и свойства сред, а на рис. 2.10 приведена принципиальная схема модели для случая применения в качестве

материала бесцветного оптического стекла с углом падения и отражения продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ соответственно, причем обозначения волн приведены в соответствии с рис. 2.2. Свойства сред и принципиальная схема аналогична всем рассматриваемым случаям в части материалов и углов падения и отражения.

Таблица 2.6 – Параметры расчётной модели в Comsol Multiphysics

№	Параметр, обозначение	Значение	Единица измерения
1	Сторона призмы 1, H	3,6	мм
2	Сторона призмы 2, L	$\frac{H \times \sin(\alpha)}{\sin(\beta)}$	мм
3	Угол призмы α	61,74	°
4	Угол призмы β	$\mathrm{asin}(\frac{V_S}{V_L} \times \sin(\alpha))$	°
5	Радиус пучка, a	0,9	мм
6	Толщина генератора, $H_{ген}$	0,3	мм
7	Толщина поглощающего слоя, H_{PML}	0,05	мм
8	Толщина проставки, $H_{прием}$	0,7	мм
9	Координата точечного приемника по оси X, $X_{прием}$	-0,8	мм
10	Скорость продольной волны в среде генератора, $V_{Lген}$	2500	м/с
11	Плотность генератора, $\rho_{ген}$	1200	кг/м^3
12	Скорость продольной волны в среде призмы, V_L	5872	м/с
13	Скорость сдвиговой волны в среде призмы, V_S	3355	м/с
14	Плотность материала призмы, ρ	2510	кг/м^3
15	Коэффициент поглощения лазерного излучения в генераторе, ϑ	200	см$^{-1}$
16	Максимальный размер сетки конечных элементов в среде генератора, $\Delta h_{\text{ген}}$	$\frac{1}{10\vartheta}$	м
17	Максимальный размер сетки конечных элементов в материале призмы, Δh	$\frac{\Delta h_{\text{ген}} \times V_s}{V_{L\text{ген}}}$	м
18	Коэффициент кратности прохождения волны в единичном конечном элементе, τ	$10\Delta h_{\text{ген}}$	м
19	Число Куранта-Фридрихса-Леви (какую часть элемента волна пролетит за один шаг по времени), CFL	0,1	
20	Шаг по времени, t_{step}	$\frac{CFL \times \Delta h_{\text{ген}}}{V_{L\text{ген}}}$	с

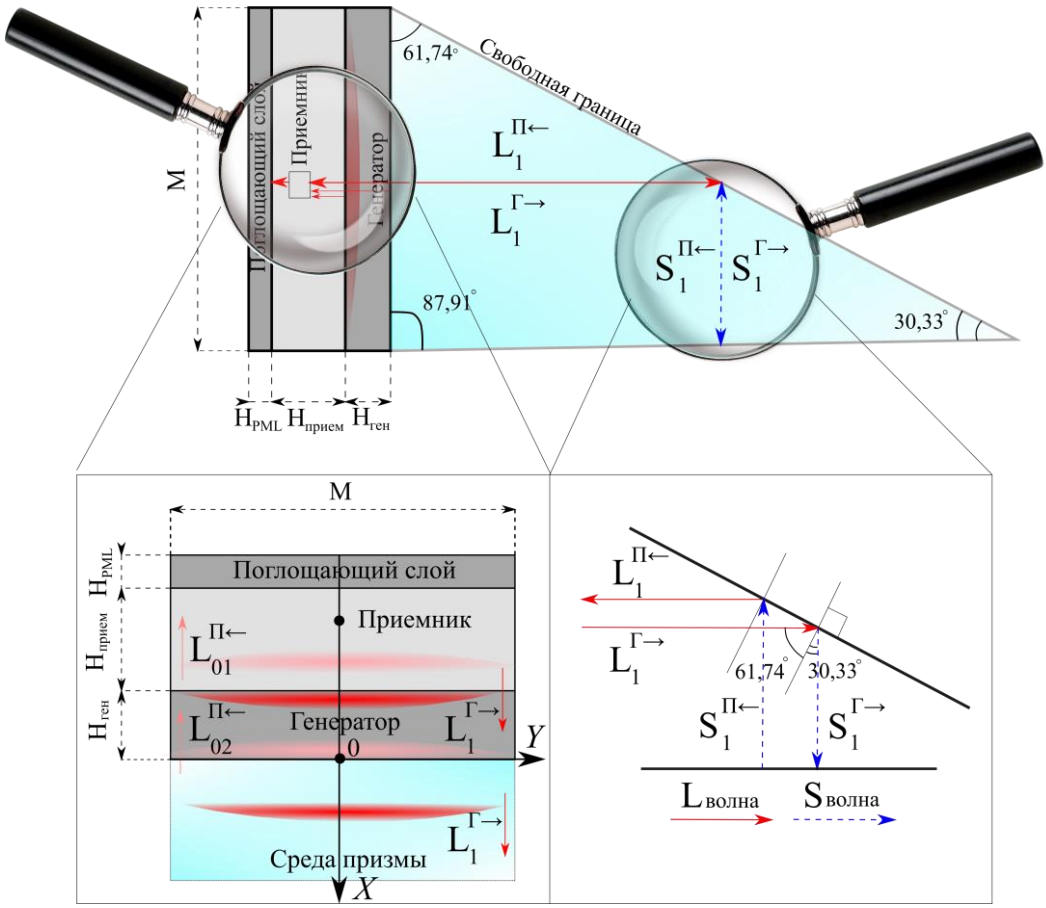


Рисунок 2.10 – Общий вид расчетной модели

В модели задан генератор толщиной $H_{ген}$ и шириной M. В нем происходит возбуждение ультразвукового импульса продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$, который направляется в среду призмы, где импульсы продольной волны конвертируются в сдвиговую. При этом на границе раздела «генератор-призма» происходит частичное отражение этого импульса в направлении к приемнику. При моделировании предполагалось, что сигналы, отраженные от всех границ, регистрируются точечном приемником, расположенном в точке $X_{прием.}$ слоя толщиной $H_{прием}$. Для исключения переотражения на верхней границе слоя $H_{прием}$ задавалась среда толщиной H_{PML}, идеально согласованная по акустическим импедансам (Perfectly Matched Layers). Данная среда обладает сильным поглощением волн, при этом от ее границы не происходит отражений. Задание такой среды аналогично использованию неотражающих граничных условий при моделировании. Граничные условия по всем граням генератора задавались как

акустически жесткие («sound hard»). На границе раздела «генератор-призма» была задана мультифизическая связка «Acoustic-Structure Boundary». Начальное давление, определяемое термоупругим эффектом в среде генератора, задавалось как гауссовый в поперечном сечении пучок в следующем виде:

$$p(x, y, t = 0) = p_0 \cdot e^{-y^2/a^2} \cdot e^{-\vartheta(x+H_{\text{ген}})} \cdot W(x), \qquad (2.20)$$

где ϑ – коэффициент поглощения лазерного излучения в среде генератора, a – радиус оптического пучка; $H_{\text{ген}}$ – толщина слоя генератора, функция $W(x)$– сглаженная оконная функция, убирающая разрывы в $p(x, y, t = 0)$ в точках $x = 0, x = -H_{\text{ген}}$ и задаваемая выражением:

$$W(x) = \frac{Erf\left(\frac{x+H_{\text{ген}}}{\tau}\right)+1}{2} \cdot \frac{Erf\left(\frac{-x}{\tau}\right)+1}{2}, \qquad (2.21)$$

где τ – коэффициент кратности прохождения волны в единичном конечном элементе.

Значение начального давления p_0 в точке $x = 0, y = 0$ принималось равным 1 Па. Дальнейшее распределение давления в генераторе и в призме описывается полем смещений $\vec{U}$ в соответствии с выражением (2.2).

Отдельно необходимо пояснить особенности выбора размеров сетки конечных элементов в материале генератора и призмы. Была задана треугольная сетка в обеих средах. При этом в параметрах расчета был задан коэффициент поглощения лазерного излучения в среде генератора ϑ. Данный коэффициент показывает экспоненциальное падение амплитуды лазерного излучения в направлении распространения оптического пучка вдоль оси x в соответствии с выражением (2.20).

Размер сетки конечных элементов в среде генератора $\Delta h_{\text{ген}}$ и среде призмы Δh разный, поскольку важно, чтобы размер сетки удовлетворял условию, что на одну длину волны будет приходиться 6 конечных элементов. В данной модели

для уточнения результатов коэффициент кратности был принят равным $\tau=10\Delta h_{gen.}$. Поскольку в среде генератора будет распространяться продольная волна, а в среде призмы она будет трансформироваться в сдвиговую, скорость которой практически в 2 раза меньше, в среде призмы будет уменьшаться длина волны, что приводит к необходимости уменьшения размера сетки конечных элементов в призме. Отдельная прямоугольная сетка была построена для слоя PML, в котором количество элементов, перпендикулярных направлению распространения импульса, принято 5. Таким образом, для каждой среды и типа волн применялась своя сетка конечных элементов.

2.4.2 Результаты компьютерного моделирования

После подготовки модели запускался расчет, результатом которого являлась карта распределения давления в средах генератора и призмы.

На рис. 2.11 (а) представлено начальное распределение давления с полным смещением $\vec{U}$ частиц (потенциальная и вихревая части), вызванное термоупругом эффектом в слое генератора в момент времени T=0,0 мкс. В соответствии с обозначениями, приведенными ранее на рис. 2.2, 2.10, на рис. 2.11 (а) изображено распределение давления в гауссовом виде в поперечном сечении, формирующее импульс продольной волны $L_1^{\Gamma\rightarrow}$, который распространяется в среду призмы. В этот же момент сформирован импульс $L_{01}^{\Pi\leftarrow}$, отраженный от границы раздела «приемник-генератор», который направлялся к приемник, и в дальнейшем был зарегистрирован как зондирующий импульс.

В момент времени T=0,15 мкс, (рис. 2.11, б) импульс $L_1^{\Gamma\rightarrow}$ полностью перешел в среду призмы, при этом возник отраженный от границы раздела «генератор-призма» импульс $L_{02}^{\Pi\leftarrow}$, который также направлялся к приемнику и идентифицировался как опорный импульс. На рис. 2.11, в, видно, что на свободной границе проявляется искомый импульс сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$, который возникает благодаря корректному подбору материала и углов призмы.

В момент времени T=1,2 мкс, (рис. 2.11, г) импульс сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$ достигает стороны призмы, которая при разработке преобразователя будет контактировать с исследуемой средой. При этом как было описано в разделе 2.1, импульс сдвиговой волны при отсутствии образца отразится от нее и трансформируется в продольную волну $L_1^{\Pi\leftarrow}$, которая направится к приемнику (рис. 2.11, д, момент времени T=2,0 мкс). В момент времени T=2,55 мкс, (рис. 2.11, е), данный импульс достигает приемника.

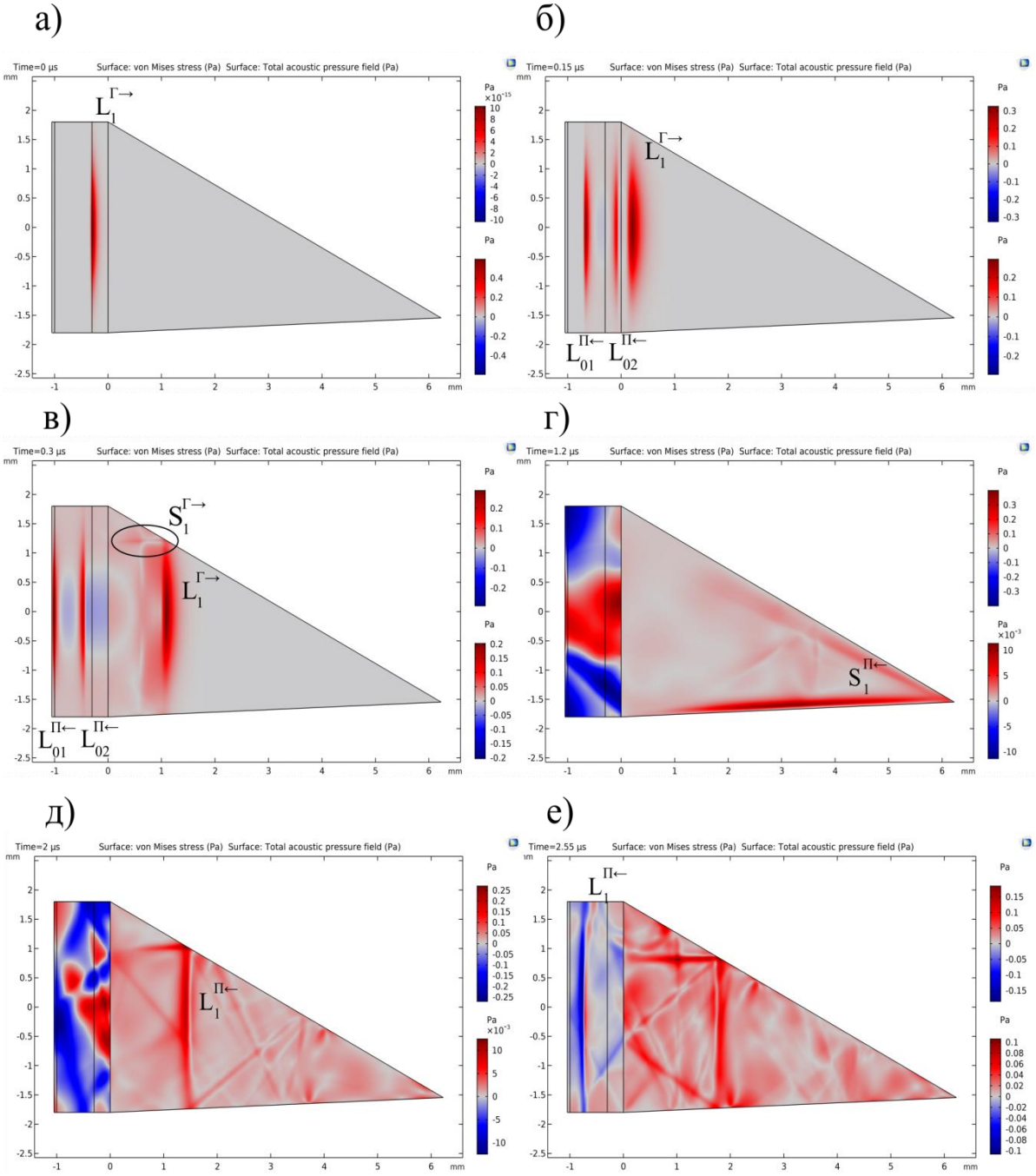


Рисунок 2.11 – Карты распределения давления в среде преобразователя (генератор, приемник, нагрузка, поглощающий слой) и призмы

Далее приведены аналогичные результаты с отдельной визуализацией сдвиговой компоненты поля смещения $\vec{U}$ частиц (рис. 2.12). Описание процесса на каждом рисунке аналогично приведенному выше описанию.

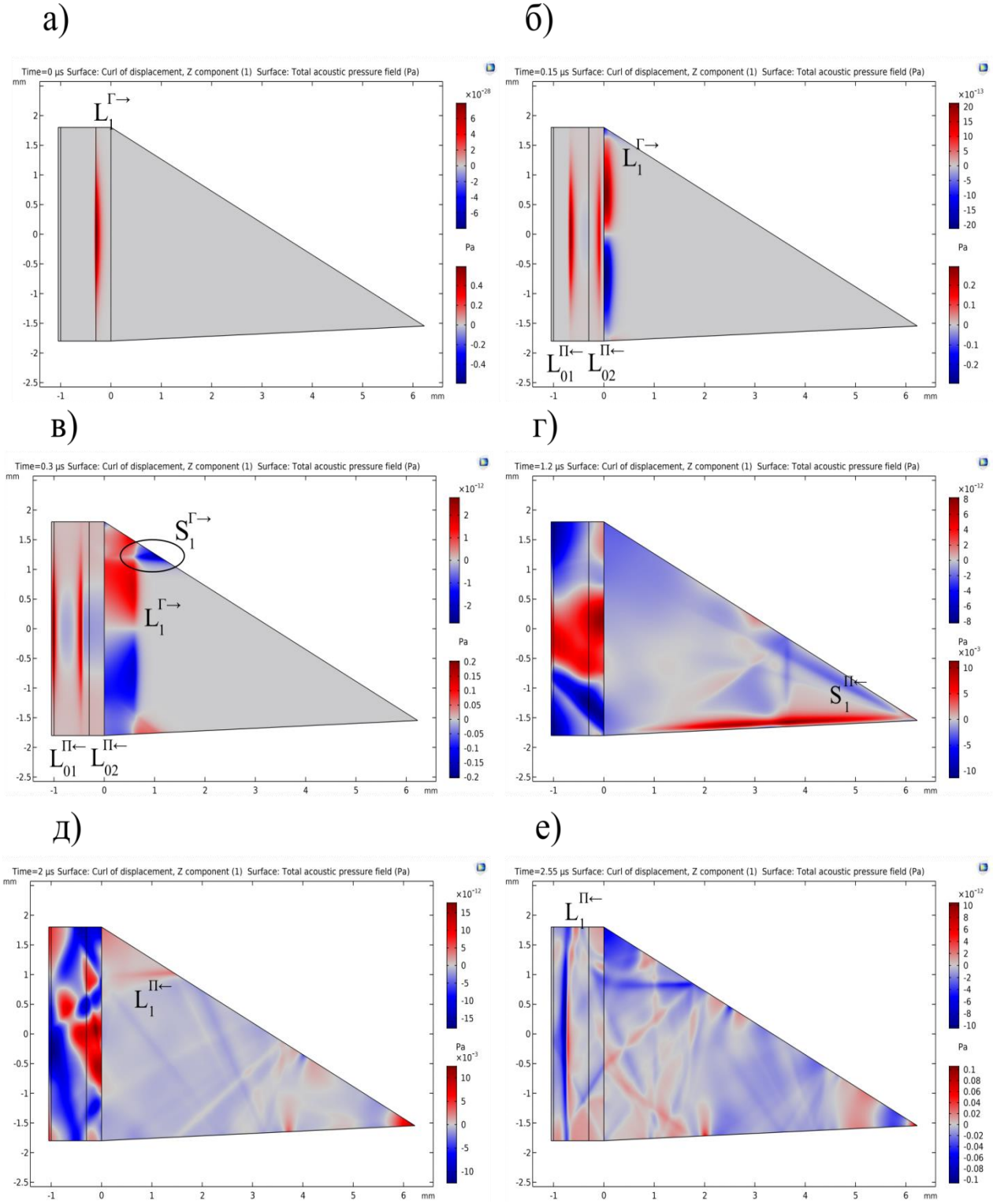


Рисунок 2.12 – Карты распределения давления (сдвиговой составляющей поля смещения $\vec{U}$ частиц в среде преобразователя (генератор, приемник, нагрузка, поглощающий слой) и призмы

На рис. 2.13 представлен полученный для угла призмы $\alpha_1 = 61{,}74°$ и угла отражения сдвиговой волны $\beta_1 = 30{,}33°$ временной профиль модельного сигнала. На рисунке обозначены зондирующий $L_{01}^{П\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{П\leftarrow}$ импульсы, а также импульс сдвиговой волны, который регистрируется приемником как импульс продольной волны $L_1^{П\leftarrow}$. Далее по тексту волна $L_1^{П\leftarrow}$ будет обозначаться сдвиговой. Из рисунка видно, что амплитуда данного импульса достигает 0,102 Па, а характерная длительность порядка 80 нс, что примерно соответствует частотному диапазону 50 кГц – 30 МГц.

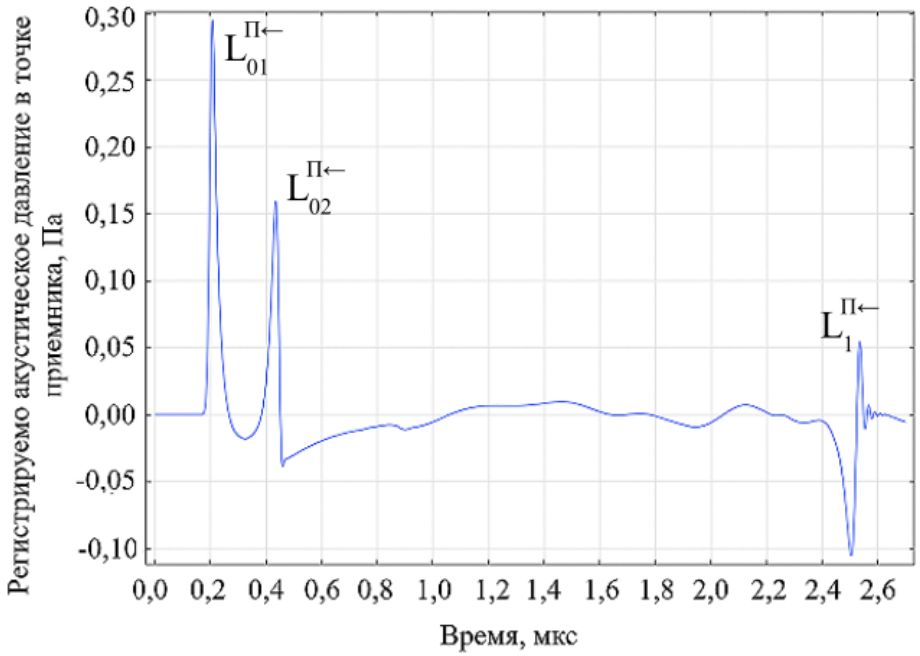


Рисунок 2.13– Полученный при моделировании временной профиль сигнала

Далее по аналогичной схеме было выполнено компьютерное моделирование для всех комбинаций материалов и углов призмы, перечисленных в конце подраздела 2.2.3. На рис. 2.14 а, б представлены изображения карт распределения давлений в момент времени регистрации импульса сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ при задании призмы из кварцевого стекла с углами ее сторон $\alpha_1 = 86{,}39°, \beta_1 = 38{,}75°$ (рис. 2.14, а) и $\alpha_2 = 47{,}85°, \beta_2 = 27{,}71°$ (рис. 2.14, в). Модельные сигналы временных профилей, полученных при данных углах, приведены на рис. 2.14 б, г, соответственно.

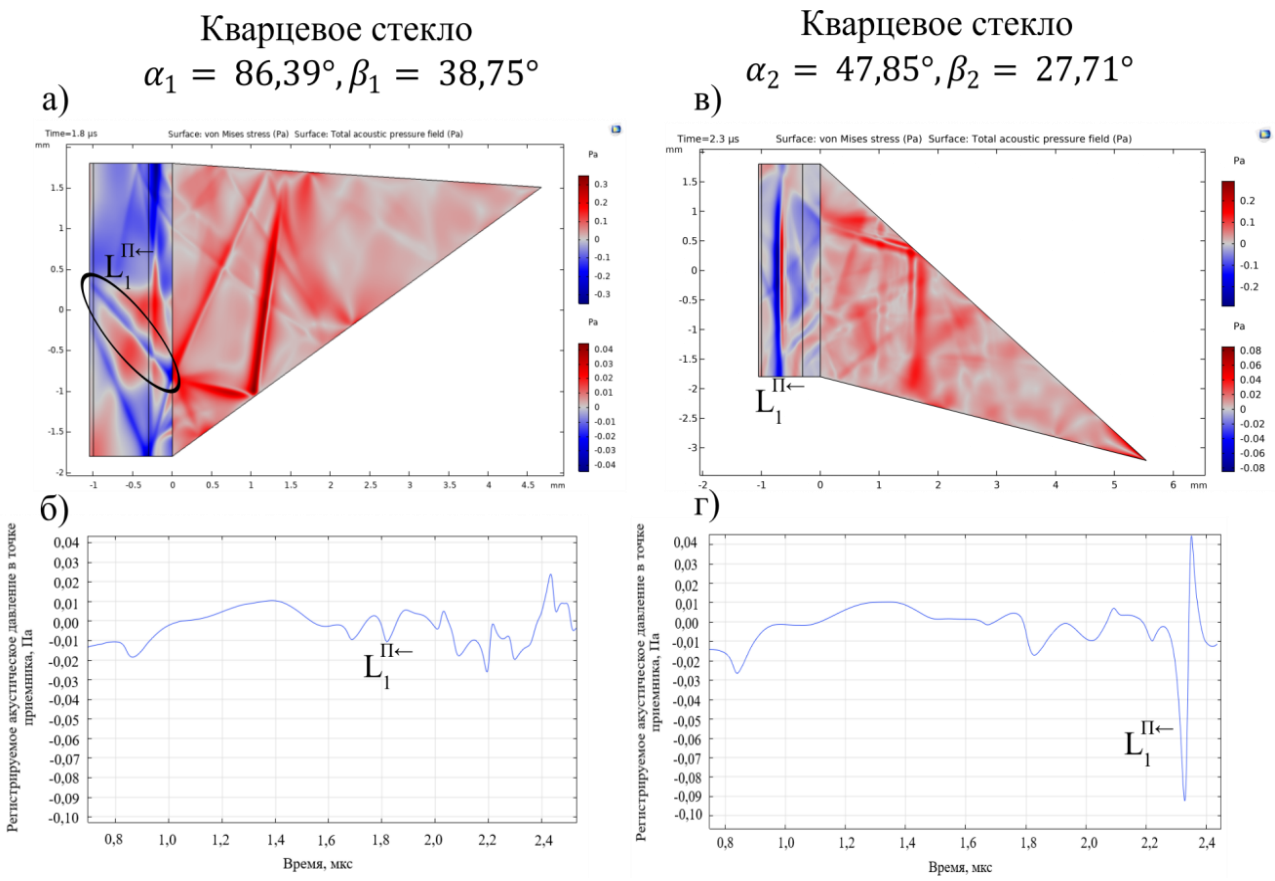


Рисунок 2.14 – Карты распределения давления в момент прихода импульсов сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ в точку приемника в призме из кварцевого стекла (а, в) и полученные временные профили сигналов (б, г)

При использовании комбинации углов $\alpha_1 = 86{,}39°, \beta_1 = 38{,}75°$ (рис. 2.14, б) по временной форме модельного сигнала можно наблюдать малую амплитуду (порядка 0,02 Па) сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$, которая зарегистрирована приемником. При этом вблизи нее были образованы дополнительные паразитные сигналы, которые возникли вследствие различных переотражений сгенерированного импульса от граней призмы. В момент регистрации импульса сдвиговой волны T=1,8 мкс также были зарегистрированы паразитные сигналы. Поэтому данная комбинация углов более не рассматривалась.

При использовании комбинации углов $\alpha_2 = 47{,}85°, \beta_2 = 27{,}71°$ (рис. 2.14, г) зарегистрирован биполярный импульс сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ амплитудой 0,092 Па. Относительно паразитных сигналов импульс сдвиговой волны виден достаточно отчетливо.

При использовании в качестве материала бесцветного оптического стекла были обработаны результаты моделирования второй комбинации углов для данного материала – $\alpha_2 = 75{,}65°, \beta_2 = 33{,}90°$. Результаты приведены на рис. 2.15.

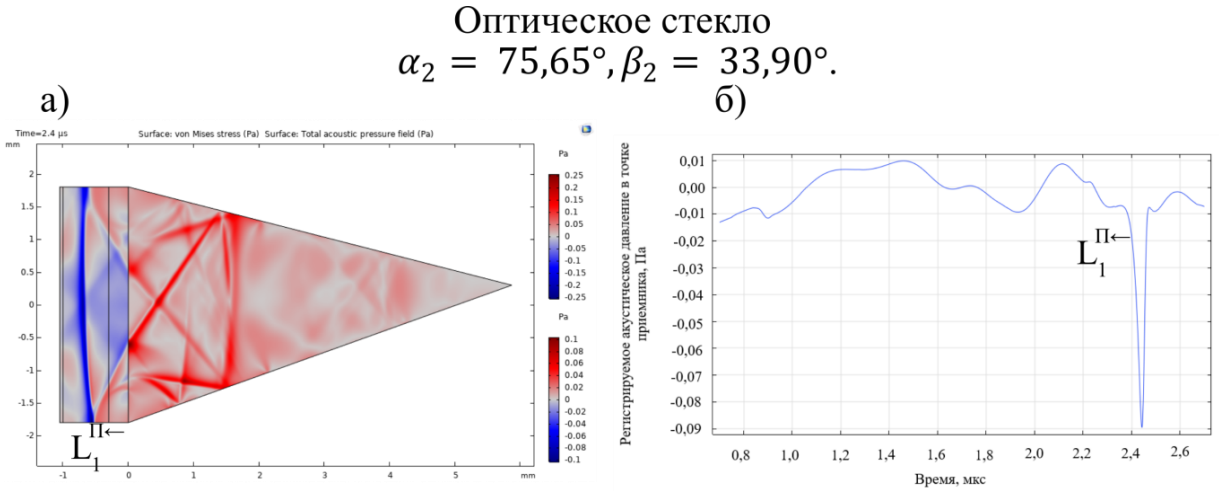


Рисунок 2.15– Карта распределения давления в момент прихода импульсов сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ в точку приемника в призме из кварцевого стекла (а) и полученный временной профиль сигнала (б)

В данном случае был зарегистрирован однополярный импульс сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ амплитудой 0,09 Па. Относительно паразитных сигналов импульс сдвиговой волны также виден достаточно отчетливо. Недостатком данной формы может являться отражение продольной волны непосредственно от угла призмы $\beta_2 = 33{,}90°$, что способствует возникновению паразитных сигналов, которые наблюдаются на карте распределения давления.

В завершении было проведено моделирование при использовании в качестве материала призмы тяжелый флинт с углами между гранями $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°$; $\alpha_2 = 77{,}99°, \beta_2 = 34{,}53°$. Результаты построения карты распределения давлений и временные профили модельных сигналов приведены на рис 2.16 а – г.

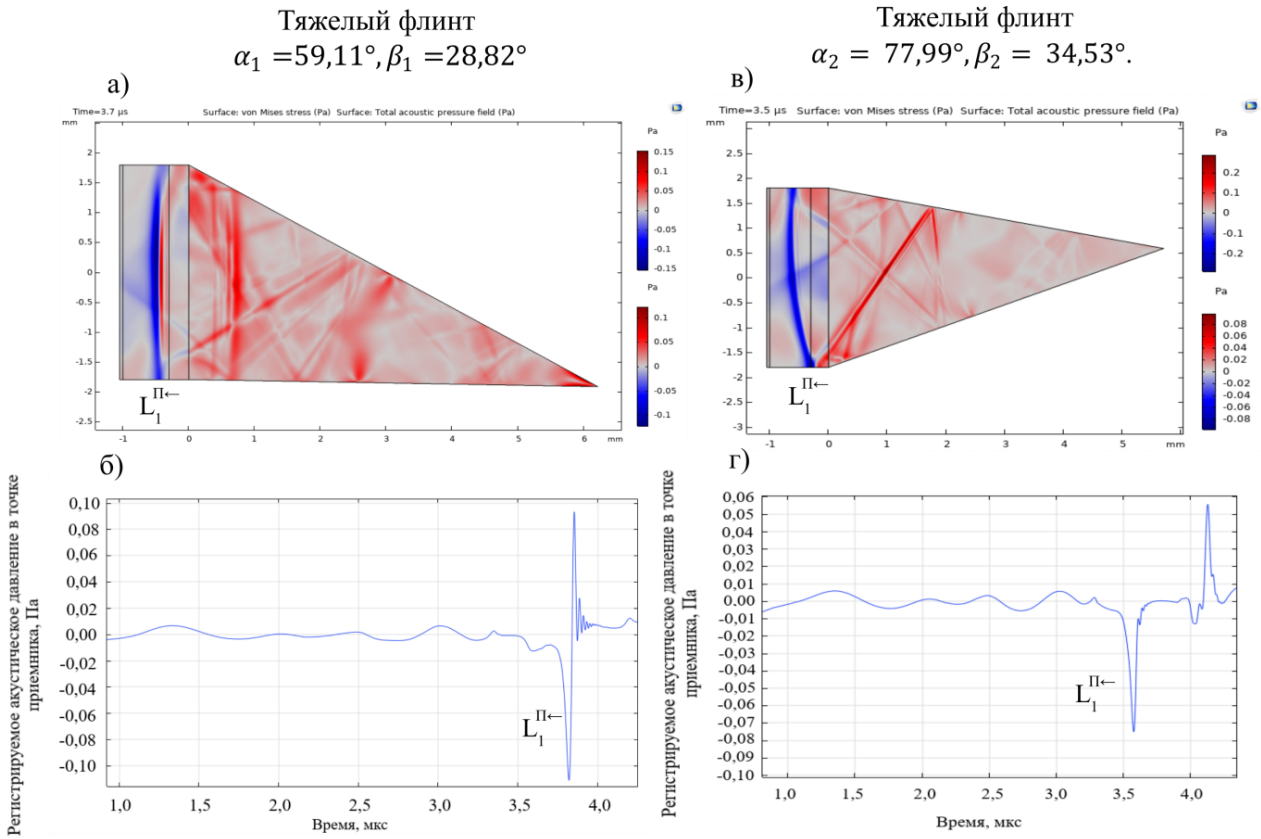


Рисунок 2.16– Карты распределения давлений в момент прихода импульсов сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ в точку приемника в призме из тяжелого флинта (а, в) и полученные временные профили сигналов (б, г)

При использовании комбинации углов $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°$; (рис. 2.16, б) по временной форме модельного сигнала можно наблюдать биполярный импульс сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$, амплитуда которого достигает 0,108 Па. Импульс отчетливо идентифицируется относительно паразитных сигналов.

При использовании комбинации углов $\alpha_2 = 77{,}99°, \beta_2 = 34{,}53°$. (рис. 2.16, г) зарегистрирован однополярный импульс сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ амплитудой 0,075 Па. Данная форма аналогична случаю, описанному на рис. 2.15. Отражение продольной волны зарегистрировано в области угла призмы $\beta_2 = 34{,}53°$.

Таким образом, для каждого из комбинаций углов и материала призмы были определены амплитуды сдвиговых волн $L_1^{П\leftarrow}$, зарегистрированные приемником, которые приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Амплитуды импульсов сдвиговых волн $L_1^{П\leftarrow}$, зарегистрированные приемником для каждой рассматриваемой комбинации углов призмы и ее материала

Материал	Кварцевое стекло		Бесцветное оптическое стекло		Тяжелый флинт	
Комбинация углов	$\alpha_1 = 86{,}39°$, $\beta_1 = 38{,}75°$	$\alpha_2 = 47{,}85°$, $\beta_2 = 27{,}71°$	$\alpha_1 = 61{,}74°$, $\beta_1 = 30{,}33°$	$\alpha_2 = 75{,}65°$, $\beta_2 = 33{,}90°$	$\alpha_1 = 59{,}11°$, $\beta_1 = 28{,}82°$	$\alpha_2 = 77{,}99°$, $\beta_2 = 34{,}53°$
Амплитуда $L_1^{П\leftarrow}$, Па	0,02	0,092	0,102	0,09	0,107	0,075

В результате проведённого компьютерного моделирования было установлено, что наиболее «чистые» по количеству паразитных сигналов, а также наибольшие амплитуды импульсов сдвиговых волн $L_1^{П\leftarrow}$ достигаются при использовании в качестве материала бесцветного оптического стекла и тяжелого флинта с углами призм $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ и $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°$ соответственно. Иные комбинации в дальнейшем не рассматривались.

2.4.3 Подбор геометрической формы призмы

Перед изготовлением были проанализированы различные геометрические формы призмы при неизменных величинах ранее установленных ее углов. Для этого было выполнено дополнительное компьютерное моделирование для двух вариаций форм, приведенных на рис. 2.17. Целью моделирования являлся поиск оптимальной формы для достижения максимума импульса сдвиговой волны, зарегистрированной при отражении от рабочей стороны призмы.

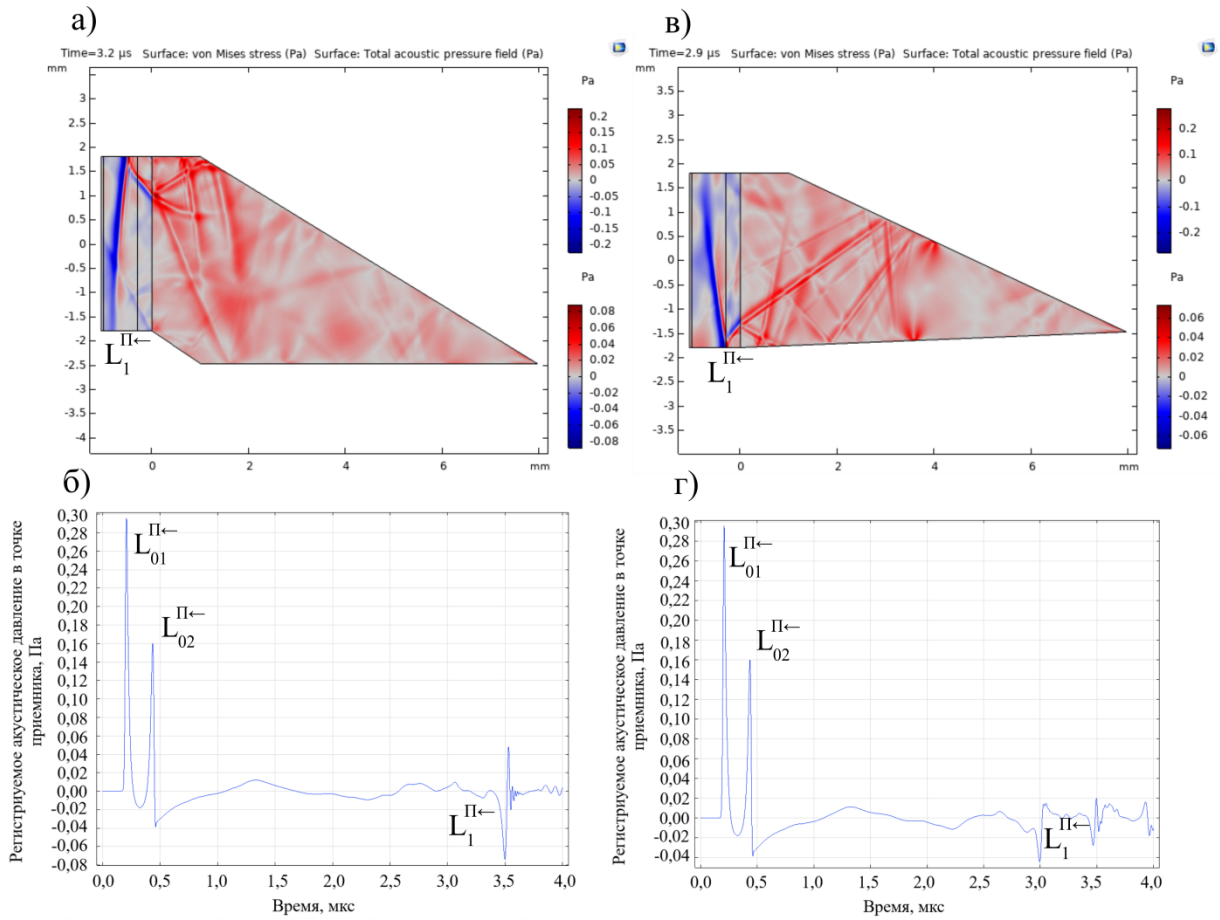


Рисунок 2.17– Карта распределения давления в момент прихода импульсов сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ в точку приемника в призме из бесцветного оптического стекла (а, в) и полученные временные профили сигналов (б, г)

Временные формы сигналов (рис. 2.17, б, г) для каждой из форм показывают, что изменение геометрической формы призмы способствует образованию паразитных сигналов и уменьшению амплитуды регистрируемой сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$. Так, для формы призмы, приведённой на рис. 2.17, а, амплитуда сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ составила 0,078 Па, а для формы на рис. 2.17 в – 0,043 Па.

Поэтому, исходя из выбранных технических решений, численных оценок и компьютерного моделирования, преобразователь сдвиговых волн будет состоять из существующего оптико-акустического преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02, к генератору которого будет примыкать призма из бесцветного оптического стекла с углами призмы $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ или из тяжелого флинта с углами сторон $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°$.

Выводы

В данной главе диссертации получены следующие результаты:

- На основе описания условий достижения трансформации на свободной границе продольной волны в сдвиговую были проведены численные оценки по определению материала и углов граней призмы, служащей составной частью при разработке преобразователя сдвиговых волн;
- Проведена проверка численных расчетов с помощью компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics;
- На основе результатов компьютерного моделирования были определены оптимальные комбинации углов граней призмы из различных материалов для регистрации сдвиговой волны .

Полученные в данном разделе результаты позволили доказать первое научное положение.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СДВИГОВЫХ ВОЛН И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ

3.1 Проектирование и разработка лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн

На этапе проектирования преобразователя сдвиговых волн необходимо было учесть наличие всех паразитных сигналов (рис. 3.1), которые возникают в преобразователе продольных волн ПЛУ-6П-02. Для исключения вариантов их наложения на полезные сигналы от рабочей стороны призмы необходимо определиться с так называемой «безопасной рабочей зоной» регистрации сдвиговых волн. Анализируя рис. 3.1, можно сделать вывод, что во временной форме сигнала присутствуют две протяженные по времени области, обозначенные как «Безопасная зона №1», от 20 мкс до 30 мкс и «Безопасная зона №2» от 31 мкс до 37 мкс, где нет паразитных сигналов.

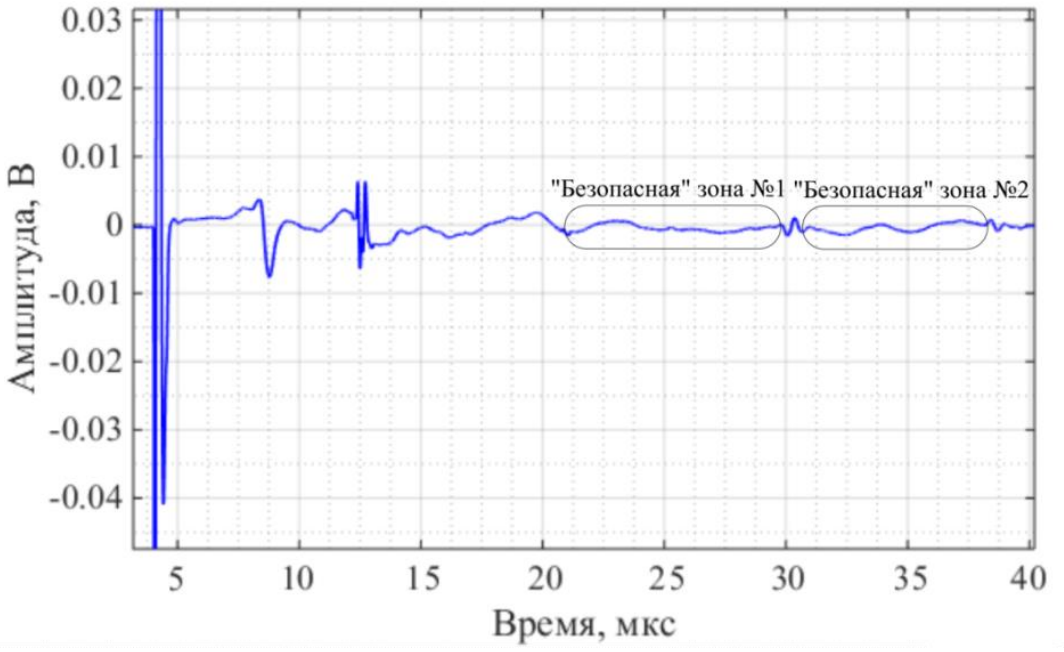


Рисунок 3.1– Временной профиль сигнала, получаемый при работе с классическим лазерно-ультразвуковым преобразователем ПЛУ-6П-02

Из рис. 3.1 видно, что призма должна быть изготовлена с габаритами, которые бы позволили регистрировать импульс сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$ в начале из каждой обозначенных «безопасных» зон. Для этого необходимо было подобрать время регистрации импульса сдвиговой волны $L_1^{П\leftarrow}$, которое в соответствии с рис. 3.2 определялось следующей формулой:

$$T_{L_1^{П\leftarrow}} = \frac{H_{L_1^{Г\rightarrow}}}{V_L} + \frac{H_{S_1^{Г\rightarrow}}}{V_S} + \frac{H_{S_1^{П\leftarrow}}}{V_S} + \frac{H_{L_1^{П\leftarrow}}}{V_L} + T_{ПЛУ}, \quad (3.1)$$

где $H_{L_1^{Г\rightarrow}}$ - расстояние, которое проходит продольная волна $L_1^{Г\rightarrow}$ от генератора до момента отражения от наклонной грани призмы, $H_{S_1^{Г\rightarrow}}$ - расстояние, которое проходит сдвиговая волна $S_1^{Г\rightarrow}$, (возникшая в результате трансформации продольной волны $L_1^{Г\rightarrow}$) до нижней грани призмы, $H_{S_1^{Г\rightarrow}}$ - расстояние, которое прошла отраженная от нижней грани призмы сдвиговая волна $S_1^{П\leftarrow}$ до наклонной грани призмы, $H_{L_1^{П\leftarrow}}$ - расстояние, которое прошла трансформированная на наклонной грани призмы продольная волна $L_1^{П\leftarrow}$, $T_{ПЛУ}$ – задержка в преобразователе ПЛУ-6П-02, равная 4,33 мкс.

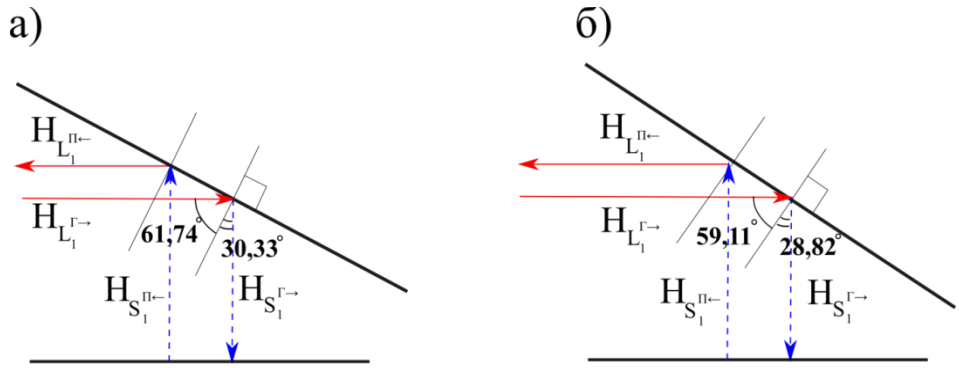


Рисунок 3.2 – Схематическое изображение распространения импульса продольной волны $L_1^{Г\rightarrow}$ в среде призмы: а) выполненной из бесцветного оптического стекла, б) из тяжелого флинта

Время регистрации импульса сдвиговой волны прямо пропорционально скорости распространения ультразвуковых волн в материале и геометрическим размерам призмы. Поэтому далее были проведены расчеты по формуле (3.1), позволившие определить оптимальные по геометрическим размерам призмы из выбранных материалов, регистрирующие импульс $L_1^{П\leftarrow}$ в начале обозначенных на рис. 3.1, «безопасных рабочих зон». Схематические изображения призм с соответствующими им временными формами сигналов приведены на рис. 3.3.

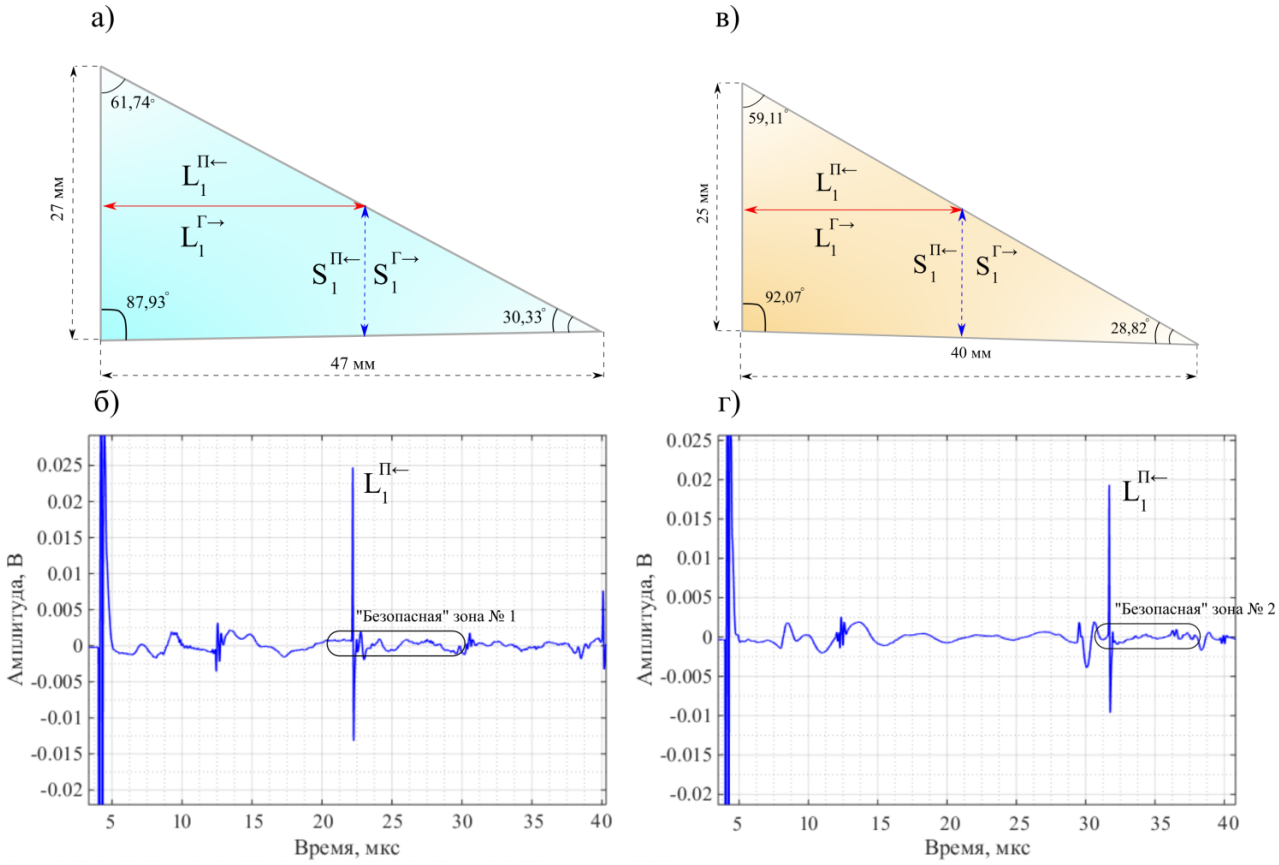


Рисунок 3.3 – Схематическое изображение призм и соответствующие им временные формы сигналов а, б – выполненной из бесцветного оптического стекла, в, г – из тяжелого флинта

Исходя из вышеперечисленных условий, был разработан проект лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 («Преобразователь Лазерно-Ультразвуковой – Сдвиговые Волны – Версия №1»), сечения и 3D модель которого приведены на рис. 3.4.

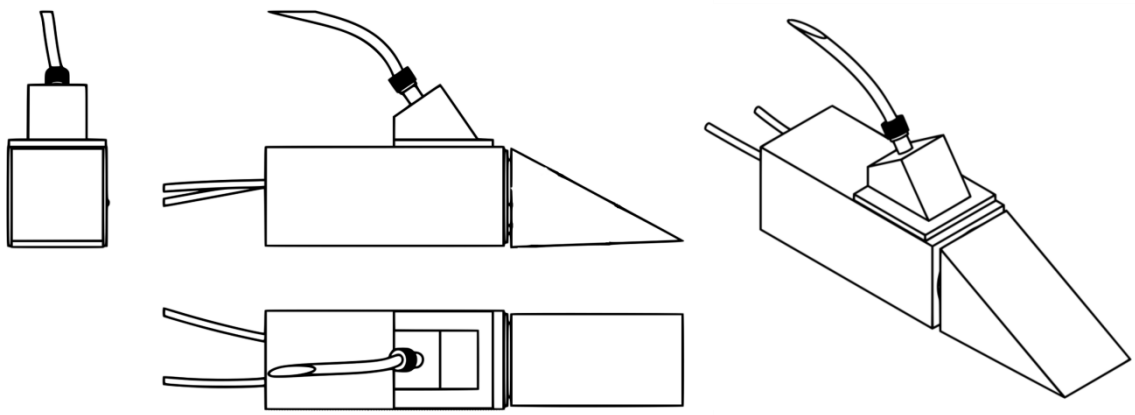


Рисунок 3.4 – 3 сечения и 3D модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Важным условием при изготовлении призмы являлось соблюдение рассчитанных углов с точностью до сотых. Ввиду того, что рассматриваемые материалы являются достаточно хрупкими, призмы вырезалась из заготовки с помощью установки гидроабразивной резки, которая позволяла выдержать значения углов между гранями с точностью до второго знака после запятой. Внешний вид разработанного преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 приведен на рис. 3.5.

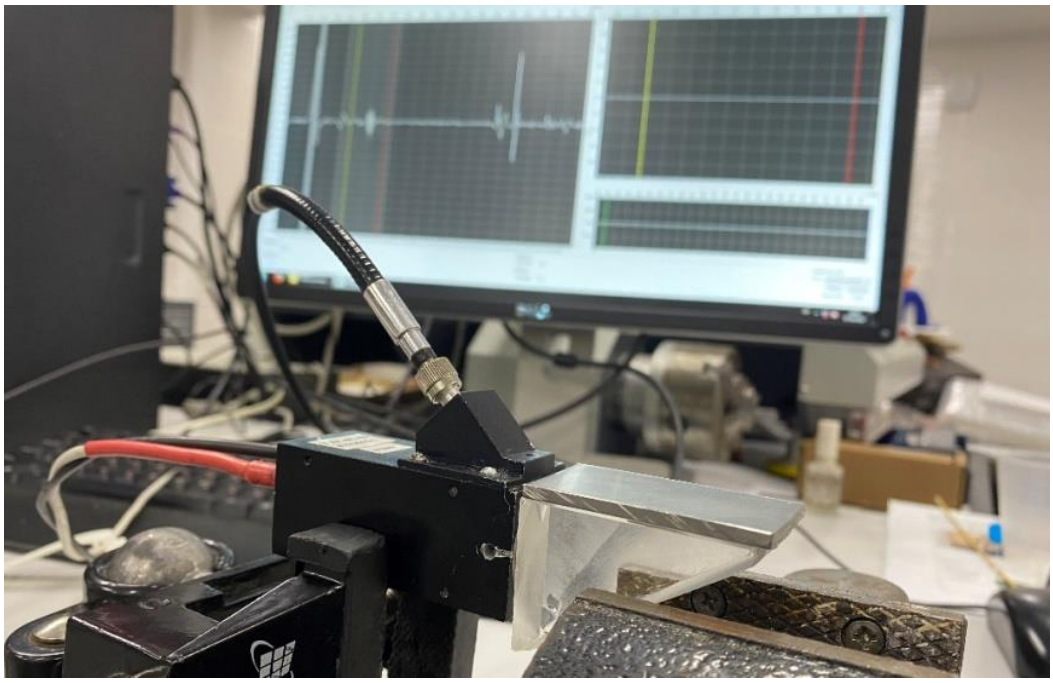


Рисунок 3.5 –Преобразователь сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

3.2 Схема эксперимента и предлагаемые технические решения, обеспечивающие прохождения сдвиговой волны в исследуемые образцы

Согласно разработанной схеме, изготовленная из бесцветного оптического стекла или тяжелого флинта призма (в соответствии с рис. 3.3) одной из сторон примыкает к генератору преобразователя ПЛУ-6П-02, а на другую сторону устанавливается исследуемый образец, как показано на рис. 3.5. Важной задачей на данном этапе работы являлось обеспечение прохождения сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$ в исследуемый образец. На рис. 3.6 приведено поэтапное распространение ультразвуковых волн в среде призмы при наличии образца. В соответствии с описанием, приведенном в подразделе 2.4.2 диссертационной работы, в начале приемником будут зарегистрированы зондирующий $L_{01}^{\Pi\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{\Pi\leftarrow}$ импульсы, возникшие в результате переотражений в преобразователе ПЛУ-6П-02. Затем будет зарегистрирован импульс продольной волны $L_1^{\Pi\leftarrow}$, возникший в результате отражения сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$ от границы раздела «призма-образец» (рис. 3.6, а). В соответствии с рис. 3.6, б, большая часть энергии сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$ также будет направлена в исследуемую среду, отразится от тыльной стороны образца в волну $S_2^{\Pi\leftarrow}$, пройдет в среду призмы как волна $S_{2\rightarrow1}^{\Pi\leftarrow}$ и в результате трансформации на свободной границе будет зарегистрирована приемником как продольная волна $L_{2\rightarrow1}^{\Pi\leftarrow}$.

Таким образом, при наличии исследуемого образца условием корректной работы преобразователя ПЛУ-СВ-01 является наличие на временной форме сигнала импульса $L_{2\rightarrow1}^{\Pi\leftarrow}$. Для этого необходимо обеспечить прохождение в среду образца импульса сдвиговой волны $S_1^{\Gamma\rightarrow}$.

При прохождении упругих волн через границы раздела твердых тел важную роль играют контактные среды.

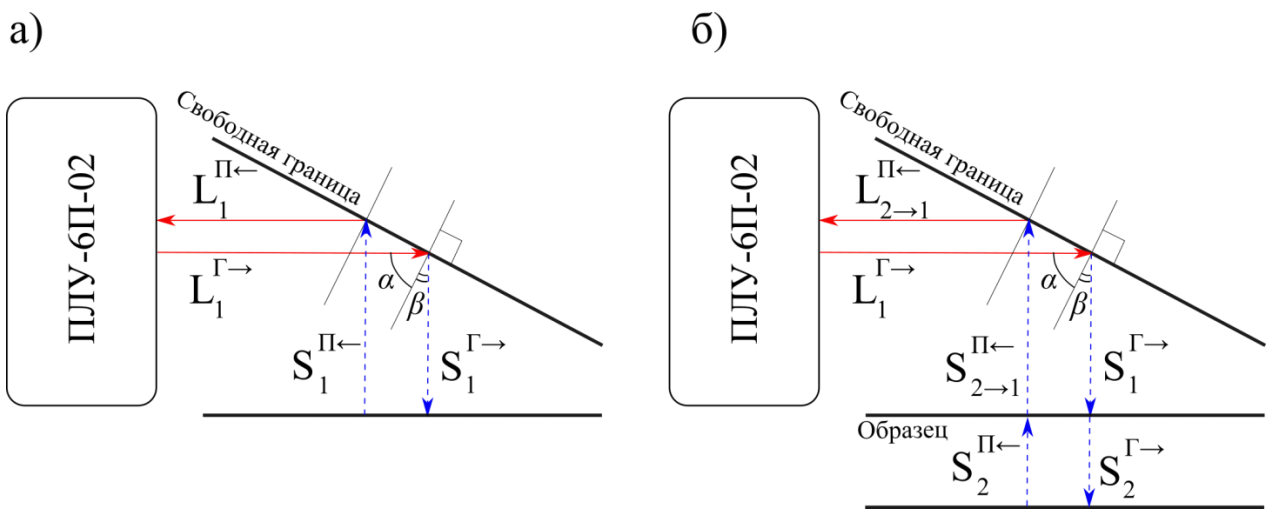


Рисунок 3.6 – Схематическое изображение распространения импульса продольной волны в среде призмы при отсутствии (а) и наличии (б) образца

Акустический контакт между преобразователем ПЛУ-6П-02 и призмой обеспечивает вода.

Для обеспечения прохождения сдвиговой волны в исследуемый образец необходимо учитывать, что ее коэффициент прохождения через границу раздела двух твердых тел зависит от множества факторов, начиная от типа акустического контакта, заканчивая шероховатостью поверхности. При этом энергия, амплитуда и фаза прошедшей в образец сдвиговой волны напрямую будут зависеть от качества обработки контактирующих поверхностей призмы и образца и силы их прижима.

Контакт между образцом и призмой обеспечивается специальной акустической склейкой на основе глицерина и высокой концентрации сахара.

Результаты, которые были приведены в работе [121], показали, что коэффициент пропускания ультразвука данной склейкой растет с течением времени и может увеличиться более чем вдвое. Поэтому в экспериментах, в частности на горных породах, измерения скоростей сдвиговых волн проводились после выдерживания склеенного с призмой образца до обнаружения отчетливого импульса сдвиговой волны.

3.3 Верификация результатов измерений на изотропных материалах, выполненных с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01

Для верификации результатов измерений, выполненных с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01, были определены скорости распространения сдвиговых волн в образцах стекла различных марок, стали и алюминия, которые сравнивались с результатами, полученными при использовании стандартного оптико-акустического преобразователя ПЛУ-6П-02. Выбор материалов был обусловлен необходимостью соблюдения однородности структур образцов. Из этих материалов изготавливались плоскопараллельные образцы-пластины прямоугольного и квадратного сечений, поверхность которых тщательно шлифовалась, а затем полировалась. В табл. 3.1 приведены параметры изготовленных образцов пластин. Фотографии образцов представлены на рис. 3.7.

Таблица 3.1 – Параметры изготовленных образцов

№	Толщина образца*, мм	Объем, мм^3	Масса, г	Плотность, кг/м^3
Оптическое стекло БС				
1	6,98	17380,27	43,02	2475
2	5,2	2853,32	7,00	2453
3	5,7	3127,68	7,78	2487
4	4,96	2770,66	6,77	2443
5	4,65	2597,49	6,41	2468
6	3,98	2223,23	5,51	2478
7	6,34	3284,40	8,07	2457
Сталь				
1	2,94	3458,94	27,03	7815
2	2,99	3640,86	28,69	7880
3	2,95	3525,47	27,50	7800
4	2,98	3696,38	28,85	7805
Алюминий				
1	4,99	14609,93	39,59	2710
Сине-зеленое стекло СЗС-20				
1	2,83	18202,64	40,86	2245
Пурпурное стекло ПС-14				
1	4,70	30067,97	67,60	2248
Пурпурное стекло ПС-13				
1	3,11	19680,04	63,13	3208

Продолжение таблицы 3.1.

№	Толщина образца*, мм	Объем, мм^3	Масса, г	Плотность, кг/м^3
Оранжевое стекло ОС-11				
1	5,16	32819,02	84,94	2588
Желтое стекло ЖС-19				
1	5,05	32582,15	77,21	2370
Синее стекло СС-4				
1	3,04	19552,02	49,10	2511

*измерения производились с точностью ±0,01 мм

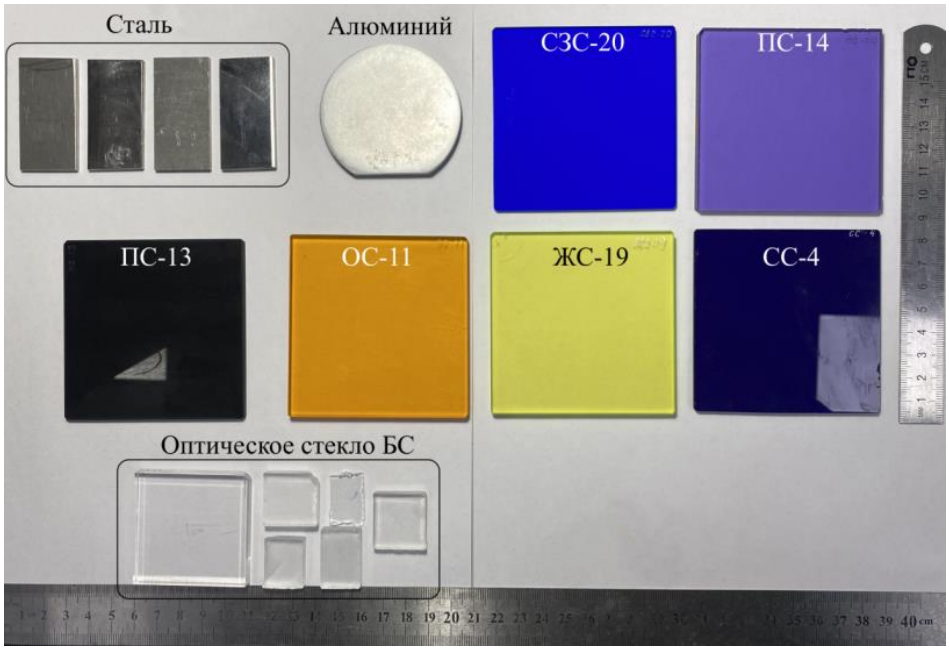


Рисунок 3.7 – Подготовленные образцы изотропных материалов

3.3.1 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании классического преобразователя ПЛУ-6П-02

Образцы исследовались с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02 в эхо-режиме лазерно-ультразвуковой диагностики по алгоритму, описанному в подразделе 2.2.2. Измерения скоростей распространения сдвиговых волн с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02 будут позиционироваться как применение «классической методики» лазерно-ультразвуковой диагностики.

На рис. 3.8 приведена характерная усредненная по 5 точкам временная форма сигнала, полученная при сканировании образца из бесцветного

оптического стекла. На сигнале обозначены зондирующий $L_{01}^{П\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{П\leftarrow}$ импульсы, образование которых описано во второй главе. Также отчетливо идентифицируются сигналы, зарегистрированные при первом $L_{эхо}^{1}$ и втором $L_{эхо}^{2}$ отражении от тыльной стороны образцов. Между данными импульсами расположен импульс сдвиговой волны $S_{эхо}$, положение которого определялась после дифференцирования полученного сигнала.

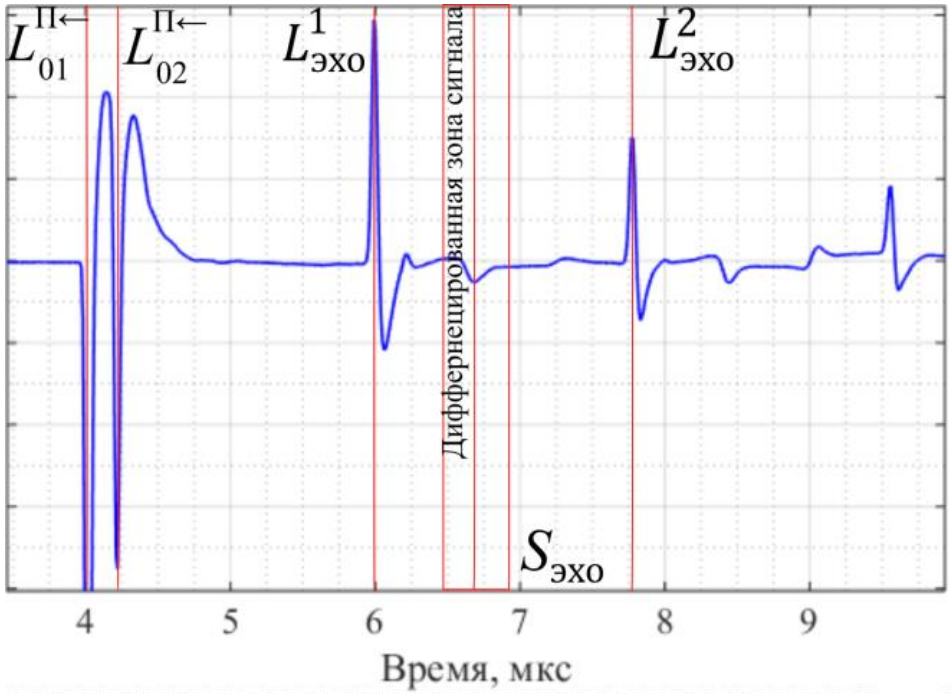


Рисунок 3.8 – Усредненная временная форма сигнала, регистрируемый при исследовании образцов из бесцветного оптического стекла

На рис. 3.9 и 3.10 приведены характерные временные формы сигналов для каждого из образцов, представленных в табл. 3.1. Сигналы усреднялись по 5 точкам сканирования.

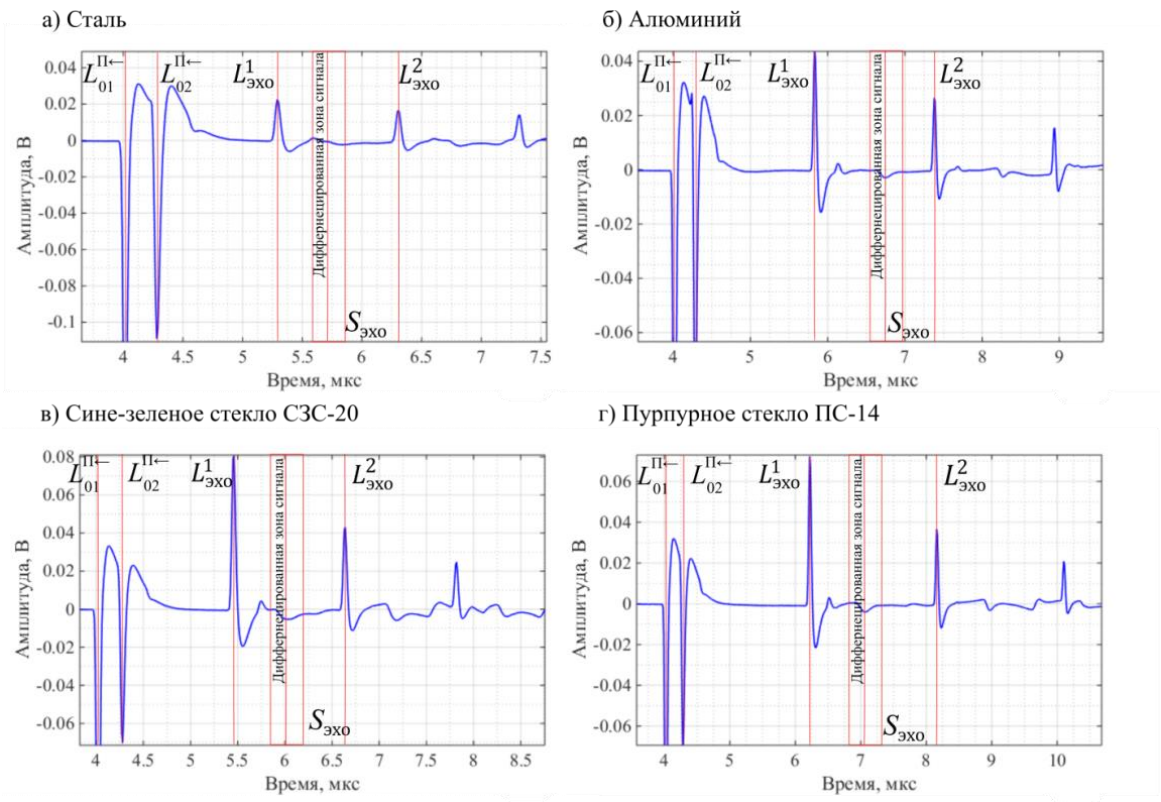


Рисунок 3.9 – Временные формы сигналов, полученные при исследовании образцов

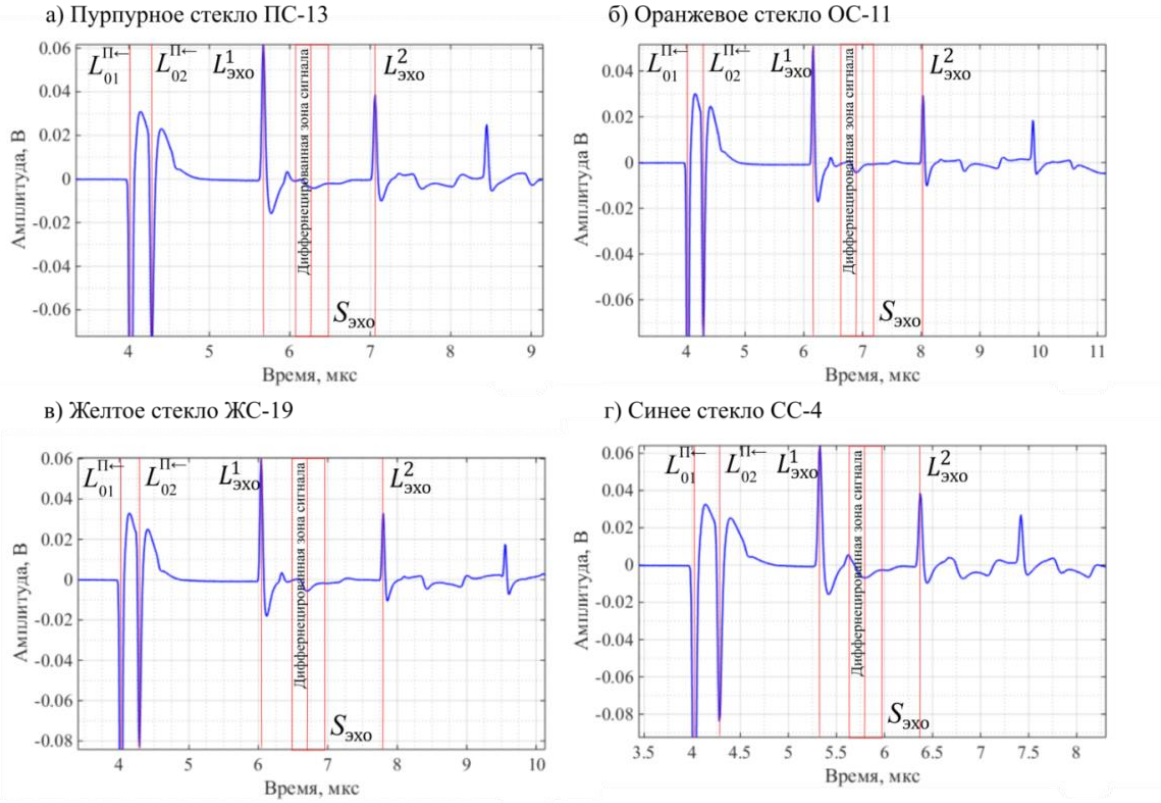


Рисунок 3.10 – Временные формы сигналов, полученные при исследовании образцов

Следует отметить, что одним из недостатков работы с классическим преобразователем ПЛУ-6П-02 является сложность регистрации времени прихода импульса сдвиговой волны $T_{S_{эхо}}^{min}$. Так, на рис. 3.11 представлена форма сигнала сдвиговой волны для одного из образцов нержавеющей стали, из которой видна неочевидность идентификации времени регистрации. Это связано с поликристаллической структурой образцов нержавеющей стали, что приводит к рассеянию сдвиговой волны. Для решения этой проблемы довольно часто приходится использовать справочные значения скоростей распространения в исследуемом материале для определения положения импульса сдвиговой волны на временной форме, что искажает объективность исследования.

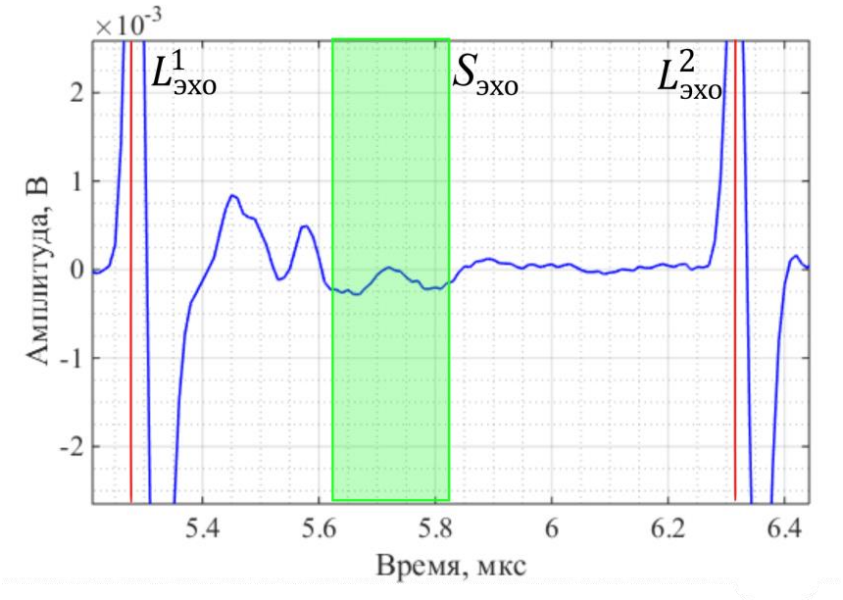


Рисунок 3.11 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании одного из образцов нержавеющей стали (фронт сдвиговой волны выделен в зеленый прямоугольник)

В табл. 3.2 представлены результаты определения скоростей распространения ультразвуковых волн V_L и V_{S1} с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02. Здесь же приведены усредненные по 5 точкам для каждого из сигналов значения времен прихода и скоростей продольных и сдвиговых волн. Цветом выделены образцы, при исследовании которых возникли сомнения в точности определения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02.

Таблица 3.2 – Результаты определения скоростей распространения ультразвуковых волн V_L и V_{S1}

№	Толщина образца*, мм	$T_{L_{эхо}^1}^{max}$, мкс	$T_{S_{эхо}}^{min}$, мкс	$T_{L_{эхо}^2}^{max}$	V_L, м/с	V_{S1}, м/с
Оптическое стекло						
1	6,98	6,596±0,002	7,470±0,012	8,998±0,001	**5814±8**	**3365±12**
2	5,2	5,973±0,001	6,635±0,005	7,752±0,002	**5844±5**	**3351±7**
3	5,7	6,133±0,002	6,856±0,014	8,065±0,002	**5901±25**	**3375±29**
4	4,96	5,878±0,001	6,516±0,006	7,653±0,002	**5887±9**	**3350±12**
5	4,65	5,78±0,002	6,378±0,009	7,361±0,003	**5885±23**	**3350±15**
6	3,98	5,524±0,002	6,034±0,005	6,711±0,001	**5894±10**	**3360±12**
7	6,34	6,356±0,001	7,150±0,001	8,558±0,001	**5836±2**	**3373±5**
Нержавеющая сталь						
1	2,94	5,374±0,002	5,836±0,011	6,385±0,001	**5820±7**	**3042±35**
2	2,99	5,346±0,001	5,816±0,010	6,378±0,001	**5797±8**	**3033±24**
3	2,95	5,365±0,002	5,825±0,011	6,380±0,002	**5838±12**	**3055±34**
4	2,98	5,374±0,001	5,850±0,009	6,403±0,002	**5819±10**	**3023±20**
Алюминий						
1	4,99	5,865±0,001	6,721±0,008	7,413±0,001	**6451±5**	**3080±15**
Сине-зеленое стекло СЗС-20						
1	2,83	5,500±0,001	5,978±0,012	6,675±0,004	**4813±7**	**2655±15**
Пурпурное стекло ПС-14						
1	4,70	6,258±0,002	7,023±0,007	8,196±0,001	**4853±12**	**2712±10**
Пурпурное стекло ПС-13						
1	3,11	5,719±0,001	6,245±0,001	7,106±0,001	**4476±3**	**2546±6**
Оранжевое стекло ОС-11						
1	5,16	6,193±0,001	6,864±0,006	8,064±0,002	**5514±15**	**3211±14**
Желтое стекло ЖС-19						
1	5,05	6,072±0,001	6,665±0,005	7,827±0,001	**5756±5**	**3435±14**
Синее стекло СС-4						
1	3,04	5,367±0,001	5,748±0,008	6,413±0,001	**5806±6**	**3359±20**

*измерения производились с точностью ±0,01 мм

Как видно из результатов, приведенных в табл. 3.2, при выполнении измерений возникли сложности в определении скоростей сдвиговых волн в образцах нержавеющей стали, фронт которой «расплывался» по временной форме сигнала за счет дифракции (рис. 3.11). Это повлияло на разброс и точность определения значений скоростей сдвиговых волн. Аналогичная ситуация возникла при исследовании образцов СЗС-20, ПС-13, СС-4. Как можно наблюдать, проблема идентификации сдвиговой волны также может быть связана

с толщиной исследуемого образца. Для тонких образцов (до 3 мм) начинает сказываться влияние контактного слоя.

3.3.2 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01.

Образцы, описанные в подразделе 3.3.1, были исследованы с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01, в котором была использована призма из бесцветного оптического стекла в соответствии с рис. 3.3. То есть измерения проводились в «безопасной зоне №1».

Эксперименты, проведенные с помощью преобразователя, оказались весьма успешными. Так, на рис. 3.12 приведена характерная, усредненная по 5 точкам, временная форма сигнала, полученная при сканировании образца из нержавеющей стали. На сигнале обозначены зондирующий $L_{01}^{\Pi\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{\Pi\leftarrow}$ импульсы, образование которых описано во второй главе диссертационной работы. При этом отчетливо наблюдается импульс сдвиговой волны $L_{1}^{\Pi\leftarrow}$, зарегистрированный в результате отражения продольной волны от грани призмы, примыкающей к исследуемому образцу в соответствии с рис. 3.6, б. В правой части рисунка в увеличенном масштабе приведена временная форма зарегистрированного искомого импульса сдвиговой волны $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$. Также отчетливо регистрируется второе отражение сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемого образца.

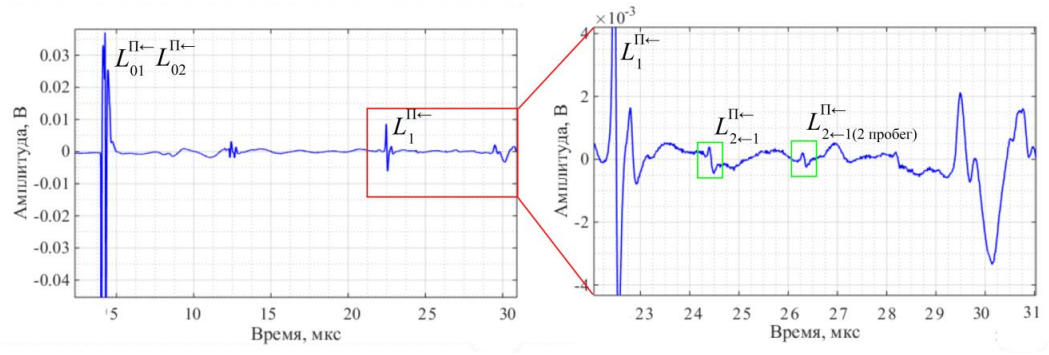


Рисунок 3.12 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании одного из образцов нержавеющей стали

Необходимо определиться, по какой фазе измерять время регистрации импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$, $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ и последующих переотражений от донной поверхности образцов для расчёта скоростей распространения сдвиговых волн.

Поскольку на данной временной форме отчетливо наблюдается импульс, зарегистрированный в результате двойного пробега сдвиговой волны в образце, была рассчитана разница времен регистрации данных импульсов по положительной фазе (согласно классической методике регистрации продольных волн это обеспечивает наиболее точное определение скоростей распространения продольных волн). В данном случае она составила $\Delta T_1 = T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}(2\text{ пробег})} - T^{min}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}} =$ 1,91 мкс. Тогда для расчёта скоростей распространения сдвиговых волн с помощью импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ (в случае отсутствия второго переотражения) необходимо, чтобы разница времен их регистрации ΔT_2 была равна ΔT_1. Это условие выполняется, если время регистрации импульса $L_1^{\Pi\leftarrow}$ принимать по максимуму его положительной фазы.

Таким образом, регистрация времен прихода импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$, $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ и последующих переотражений от донной поверхности образцов осуществляется по положительной фазе импульсов, как показано на рис. 3.13.

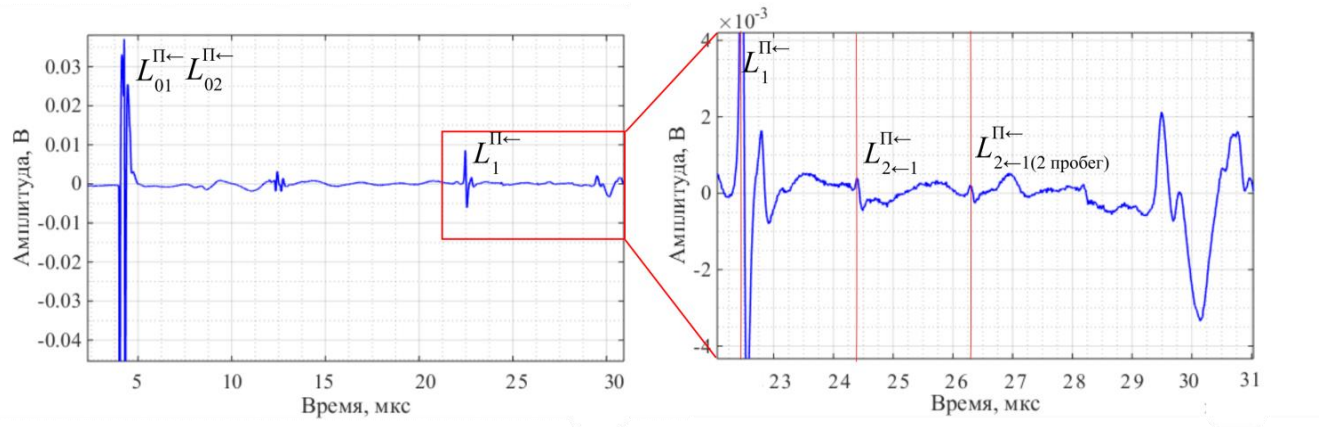


Рисунок 3.13 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании одного из образцов нержавеющей стали с расставленными стробами регистрации времен прихода полезных импульсов

На рис. 3.14 и 3.15 приведены характерные временные формы сигналов, полученные при использовании преобразователя ПЛУ-СВ-01 для всех образцов,

которые ранее были исследованы с помощью классической методики. На временных формах всех образцов отчетливо зарегистрированы импульсы сдвиговой волны $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$, при этом также удалось зарегистрировать второе и третье отражение от тыльной стороны исследуемых образцов, что позволяет измерять скорость сдвиговой волны не только относительно импульса $L_1^{\Pi\leftarrow}$, но и аналогично измерению скоростей распространения продольных волн при работе с классическим преобразователем ПЛУ-6П-02.

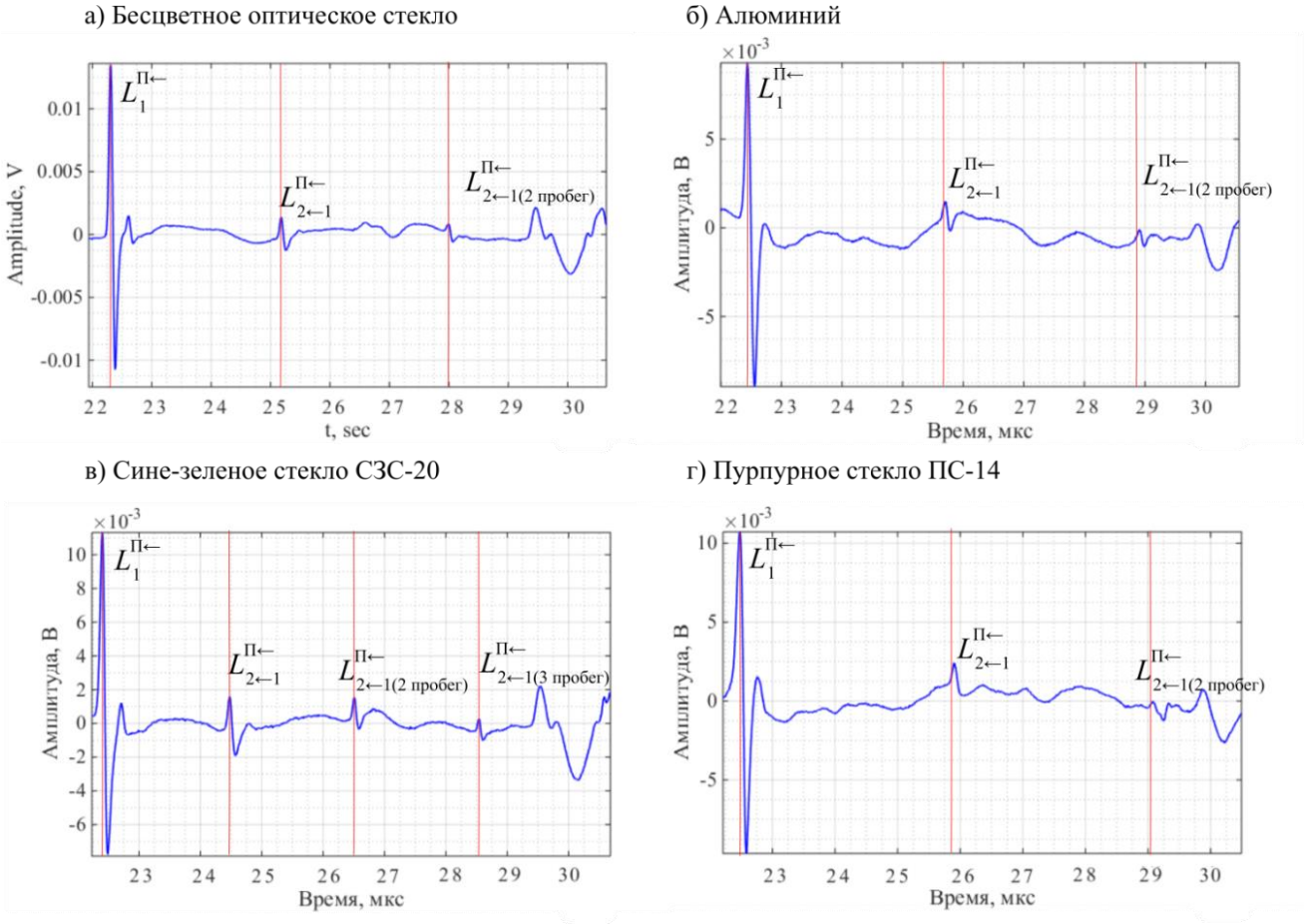


Рисунок 3.14 – Временные формы сигналов, полученные при исследовании образцов: а) бесцветного оптического стекла; б) Алюминия; в) СЗС-20; г) ПС-14

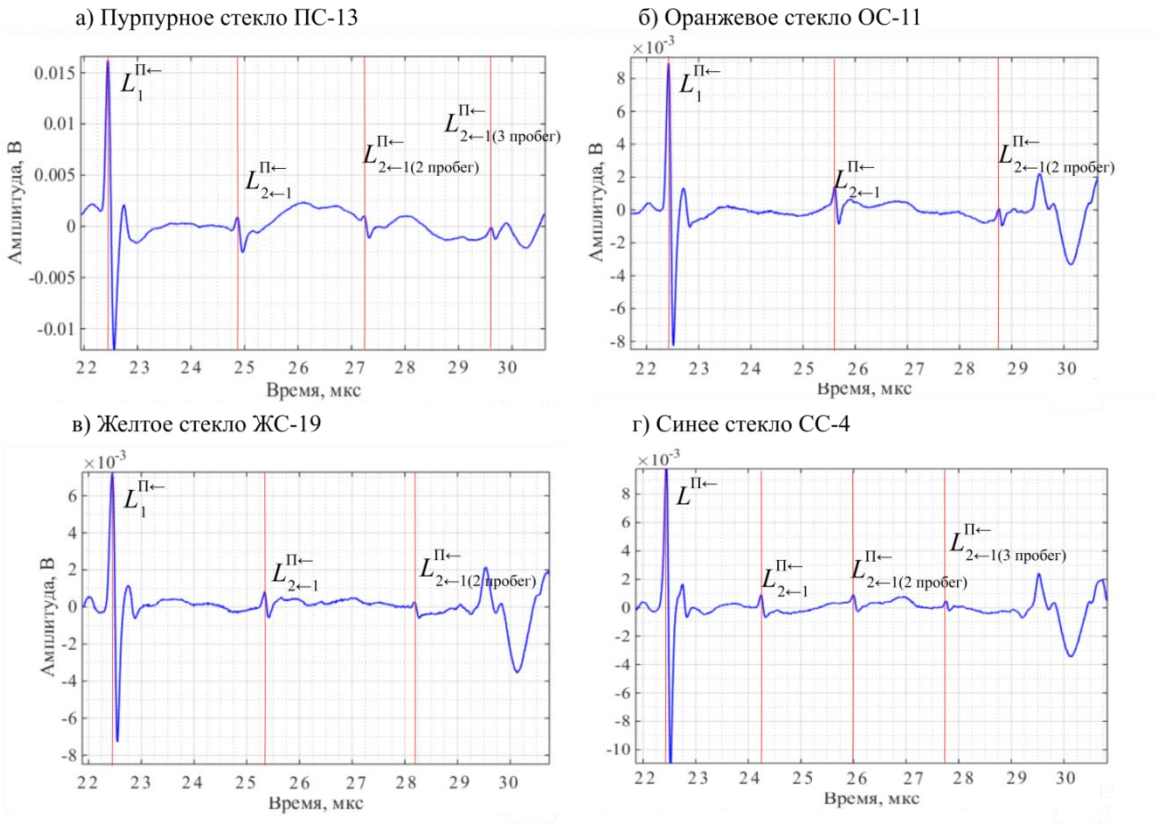


Рисунок 3.15 – Временные формы сигналов, полученные при исследовании образцов: а) ПС-13; б) ОС-11; в) ЖС-19; СС-4

В табл. 3.3 приведены результаты измерений скоростей распространения сдвиговых волн V_{S2}.. Скорость распространения сдвиговой волны $L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1}$ рассчитывалась по следующей формуле:

При наличии на временной форме сигнала второго отражения сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемых образцов $L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}$, скорость распространения сдвиговой волны возможно рассчитать по формуле:

$$V_{S2} = \frac{2h_{обр}}{(T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}} - T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1}})} \quad (3.2)$$

где $T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса$L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}$.

При отсутствии на временной форме сигнала второго отражения сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемых образцов $L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}$, скорость распространения сдвиговой волны возможно рассчитать по формуле:

$$V_{S2} = \frac{2h_{\text{обр}}}{(T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}} - T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{1}})} \quad (3.3)$$

где $T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}$; $T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{1}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L^{\Pi\leftarrow}_{1}$; $h_{\text{обр}}$ – толщина образца.

Таблица 3.3. Результаты определения скоростей распространения сдвиговых волн, измеренных с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01

№	Толщина образца*, мм	$T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{1}}$, мкс	$T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1}}$, мкс	$T^{max}_{L^{\Pi\leftarrow}_{2\to1(2\Pi)}}$, мкс	**V_{S2}, м/с**
Оптическое стекло					
1	6,98	22,445±0,004	24,520±0,004	26,575±0,004	**3364±10**
2	5,2	22,436±0,002	23,983±0,003	25,519±0,002	**3384±8**
3	5,7	22,453±0,005	24,189±0,004	25,914±0,003	**3393±9**
4	4,96	22,439±0,002	23,901±0,002	25,354±0,001	**3372±4**
5	4,65	22,465±0,001	23,838±0,004	25,201±0,004	**3381±11**
6	3,98	22,437±0,006	23,611±0,010	24,774±0,009	**3391±13**
7	6,34	22,450±0,004	24,324±0,005	26,187±0,006	**3384±8**
Нержавеющая сталь					
1	2,94	22,455±0,001	24,421±0,008	26,310±0,007	**2994±10**
2	2,99	22,504±0,006	24,451±0,009	26,363±0,007	**3071±8**
3	2,95	22,438±0,002	24,367±0,010	26,245±0,004	**3057±12**
4	2,98	22,465±0,003	24,416±0,002	26,325±0,002	**3070±5**
Алюминий					
1	4,99	22,444±0,002	25,704±0,014	28,908±0,009	**3063±11**
Сине-зеленое стекло СЗС-20					
1	2,83	22,438±0,003	24,530±0,014	26,582±0,013	**2705±10**
Пурпурное стекло ПС-14					
1	4,70	22,483±0,002	25,909±0,012	29,3320±0,012	**2737±7**
Пурпурное стекло ПС-13					
1	3,11	22,450±0,003	24,870±0,003	27,237±0,004	**2576±6**
Оранжевое стекло ОС-11					
1	5,16	22,437±0,002	25,652±0,012	28,806±0,007	**3208±5**
Желтое стекло ЖС-19					
1	5,05	22,443±0,003	25,386±0,013	28,271±0,011	**3433±12**
Синее стекло СС-4					
1	3,04	28,443±0,005	24,245±0,002	25,999±0,004	**3399±5**

*измерения производились с точностью ±0,01 мм

Таким образом, на основе вышеописанных в настоящей главе измерений с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01 был сформулирован алгоритм работы с ним:

1) Из исследуемого материала подготавливается плоскопараллельный образец, рабочие поверхности которого должны быть отшлифованы и отполированы;

2) К генератору классического преобразователя ПЛУ-6П-02 прикладывается разработанная призма (в соответствии с рис. 3.5) из бесцветного оптического стекла с углами между гранями $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ или из тяжелого флинта с углами между гранями $\alpha_2 = 59{,}11°, \beta_2 = 28{,}82°$. Акустический контакт между генератором и призмой обеспечивается водой. Сборная конструкция устанавливается в зажимное устройство;

3) На рабочую грань призмы наносится тонкий слой акустической смеси на основе сахара и глицерина, на который «приклеивается» исследуемый образец.

4) Производится запуск дефектоскопа УДЛ-2М и ПО для обработки сигналов;

5) При статичном положении генератора производится юстировка призмы таким образом, чтобы импульс $L_1^{\text{П}\leftarrow}$ был максимальным по амплитуде;

6) Образец перемещается вручную по рабочей грани призмы до тех пор, пока на временной форме сигнала не будет проявляться импульс сдвиговой волны $L_{2\to1}^{\text{П}\leftarrow}$ максимальной амплитуды;

7) Регистрируются времена прихода импульсов $L_1^{\text{П}\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{\text{П}\leftarrow}$, по которым производится расчет скоростей распространения сдвиговых волн по формуле (3.2) или по формуле (3.3) в случае отсутствия на временной форме сигнала второго отражения сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемого образца. Время регистрации импульсов $L_1^{\text{П}\leftarrow}$ $L_{2\to1}^{\text{П}\leftarrow}$ и последующих отражений от тыльной стороны образца производится по максимуму амплитуд.

3.3.3 Сравнение результатов измерений, выполненных с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02 и преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Исходя из проведенных измерений, выполненных с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02 и преобразователя ПЛУ-СВ-01, в табл. 3.4 приведены сводные результаты расчётов скоростей распространения сдвиговых волн. Цветом выделены образцы, при исследовании которых возникли сомнения в точности определения скоростей с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02.

Таблица 3.4. Результаты измерения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классической методики (преобразователь ПЛУ-6П-02) и с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01

№	V_{S1}, м/с ПЛУ-6П-02	V_{S2}, м/с ПЛУ-СВ-01	V_{S2} - V_{S1}, м/с	$\frac{V_{S2}-V_{S1}}{V_{S2}}$, %
Оптическое стекло				
1	3365	3364	-1	-0,03
2	3351	3384	33	0,98
3	3375	3393	18	0,53
4	3350	3372	22	0,66
5	3350	3381	31	0,93
6	3360	3391	31	0,92
7	3373	3384	11	0,33
Нержавеющая сталь				
1	3042	2994	-48	-1,58
2	3033	3071	38	1,25
3	3055	3057	2	0,07
4	3023	3070	47	1,55
Алюминий				
1	3080	3063	-17	-0,55
Сине-зеленое стекло СЗС-20				
1	2655	2705	50	1,88
Пурпурное стекло ПС-14				
1	2712	2737	25	0,92
Пурпурное стекло ПС-13				
1	2546	2576	30	1,18
Оранжевое стекло ОС-11				
1	3211	3208	-3	-0,09
Желтое стекло ЖС-19				
1	3435	3433	-2	-0,06
Синее стекло СС-4				
1	3359	3399	40	1,19

Из приведенных результатов видно, что значения скоростей сдвиговых волн, измеренных с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01, близки к скоростям, измеренным в эхо-режиме ЛУД с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02. Разница скоростей составила от 0,03 % до 1,58 %. При этом, наиболее высокий процент разницы в результатах измерений составил для нержавеющей стали, стекол марки СЗС-20, ПС-13, СС-4, при исследовании которых с помощью ПЛУ-6П-02 были выявлены сложности определения времени регистрации сдвиговой волны ввиду «расплывания» фронта ее импульса. Поскольку при использовании преобразователя ПЛУ-СВ-01 в исследуемый образец направляется прямая сдвиговая волна, данная проблема решается.

Значения скоростей сдвиговых волн, измеренные с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01, были уточнены для образцов нержавеющей стали, а их разброс был значительно меньше, чем при использовании классической методики. Вышеперечисленные результаты обосновывают целесообразность дальнейшего применения разработанного преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01.

3.4 Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты) в исследуемых модельных образцах

Построение дисперсионных кривых проводилось на основе разработанного в работе [97] алгоритма со следующими поправками.

На первом этапе выбирался импульс $L_{2\to1}^{\text{П}\leftarrow}$, зарегистрированный в результате отражения от донной поверхности образца. Данный импульс умножался на оконную функцию гауссовой формы, для того чтобы отфильтровать шумовые помехи и выделить пик импульса. Затем с помощью быстрого Фурье-преобразования вычислялся комплексный спектр данного сигнала.

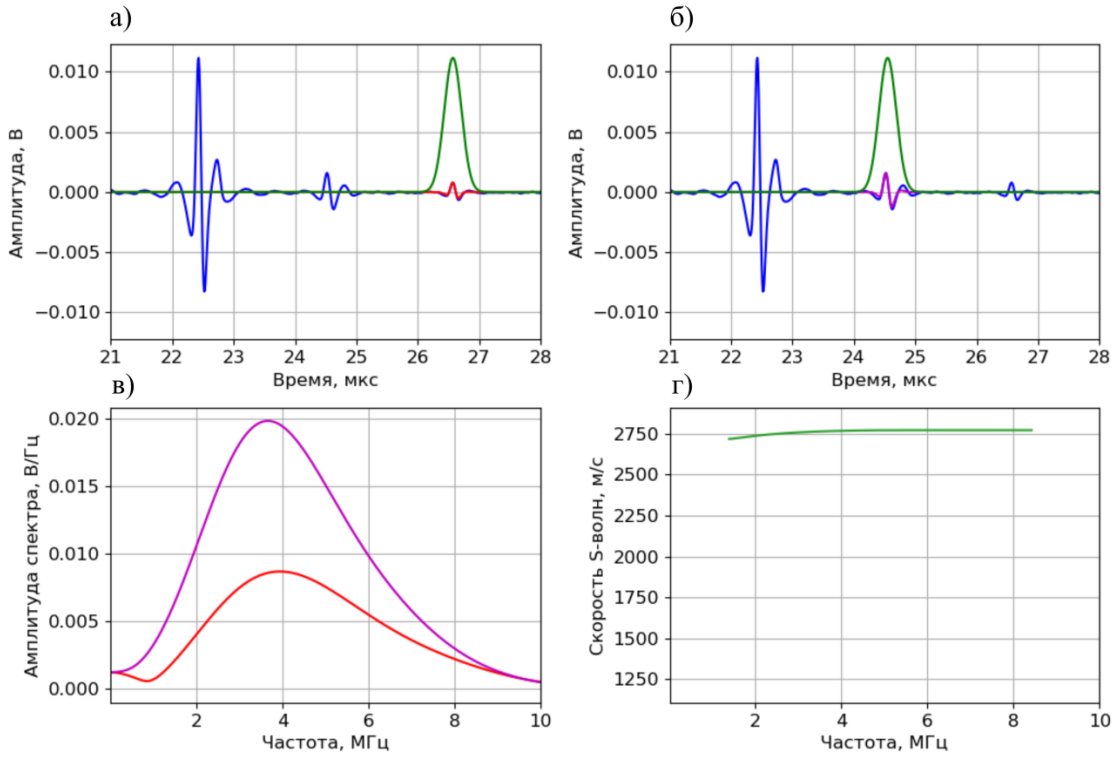
На втором этапе выделялся импульс сдвиговой волны $L_{2\to1(2\text{П})}^{\text{П}\leftarrow}$, полученный в результате второго донного отражения, который также умножался на оконную функцию.

Далее из обоих комплексных спектров сигналов выделялись действительные части, которые соответствовали амплитудным спектрам. А фазовые спектры были получены путем деления мнимой части сигнала $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ на его действительную часть.

Следует отметить, что в случае отсутствия сигнала от второго донного отражения возможно провести обработку временной формы на основе выделения и умножения на оконную функцию импульсов $L_{1}^{\Pi\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$.

Для выполнения вышеперечисленных процедур был модернизирован написанный в работе [97] код на языке Python. Программа была скорректирована для обработки сигналов, полученных в эхо-режиме лазерно-ультразвуковой диагностики.

На рис. 3.16 приведен пример типовой обработки сигнала, полученный для образца сине-зеленого стекла СЗС-20.



а) Выделение с помощью оконной функции импульса $L_{2\to1(2\Pi)}^{\Pi\leftarrow}$; б) Выделение с помощью оконной функции импульса $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$; в) построенные спектры сигналов первого и второго донных отражений; г) Дисперсионная кривая

Рисунок 3.16 – Пример типовой обработки сигнала, полученного при исследовании образца СЗС-20 с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01.

По дисперсионной кривой видно, что в частотном диапазоне 2,0 – 8,3 МГц значения скоростей сдвиговых волн стабилизируются в интервале 2695 – 2720 м/с. Разброс значений скоростей в данном частотном диапазоне составляет менее 1 %.

В табл. 3.5 приведены значения фазовых скоростей сдвиговых волн для исследуемых модельных образцов в зависимости от частотного диапазона, а на рис. 3.17 и 3.18 показаны построенные дисперсионные кривые. Для образцов из бесцветного оптического стекла (ОСБ) и нержавеющей стали приведены дисперсионные кривые для одного образца из каждой группы ввиду получения типовых результатов.

Таблица 3.5 – Значения фазовых скоростей сдвиговых волн в зависимости от частотного диапазона

№	Образец	Частотный диапазон, МГц	Интервал фазовых скоростей, м/с	Средняя скорость, м/с	Разброс значений скоростей, м/с	Групповая скорость, полученная с помощью ПЛУ-СВ-01 м/с
1	ОСБ	1,0-9,0	3350-3385	3370	35	3364
2		1,1-9,0	3360-3390	3375	30	3384
3		0,9-9,7	3365-3400	3385	35	3393
4		1,1-9,5	3365-3395	3375	30	3372
5		1,5-8,9	3360-3380	3370	20	3381
6		1,3-9,0	3370-3400	3385	30	3391
7		1,0-10,0	3370-3390	3380	20	3384
1	Нержавеющая сталь	1,5-10,0	3010-3020	3000	10	2994
2		4,0-10,0	3060-3090	3370	30	3071
3		1,5-10,0	3030-3060	3045	30	3057
4		1,5-10,0	3050-3080	3065	30	3070
1	Алюминий	2,0-9,8	3055-3080	3070	25	3063
1	СЗС-20	2,0-8,3	2695-2720	2700	25	2705
1	ПС-14	1,5-8,0	2710-2745	2730	35	2737
1	ПС-13	2,0-8,5	2575-2595	2580	20	2576
1	ОС-11	1,6-8,2	3200-3220	3210	20	3208
1	ЖС-19	3,0-10,0	3420-3440	3430	30	3433
1	СС-4	0,6-9,6	3380-3405	3390	26	3399

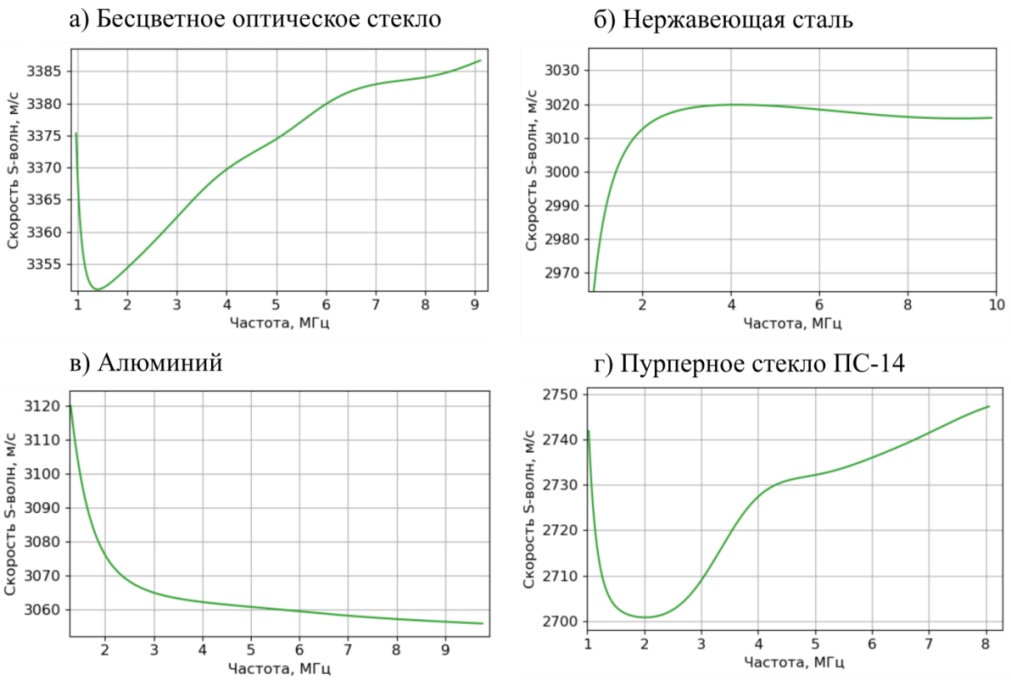


Рисунок 3.17 – Зависимости скоростей распространения сдвиговых волн от частоты (дисперсионные кривые) в образцах: а) бесцветного оптического стекла; б) нержавеющей стали; в) Алюминия; г) ПС-14

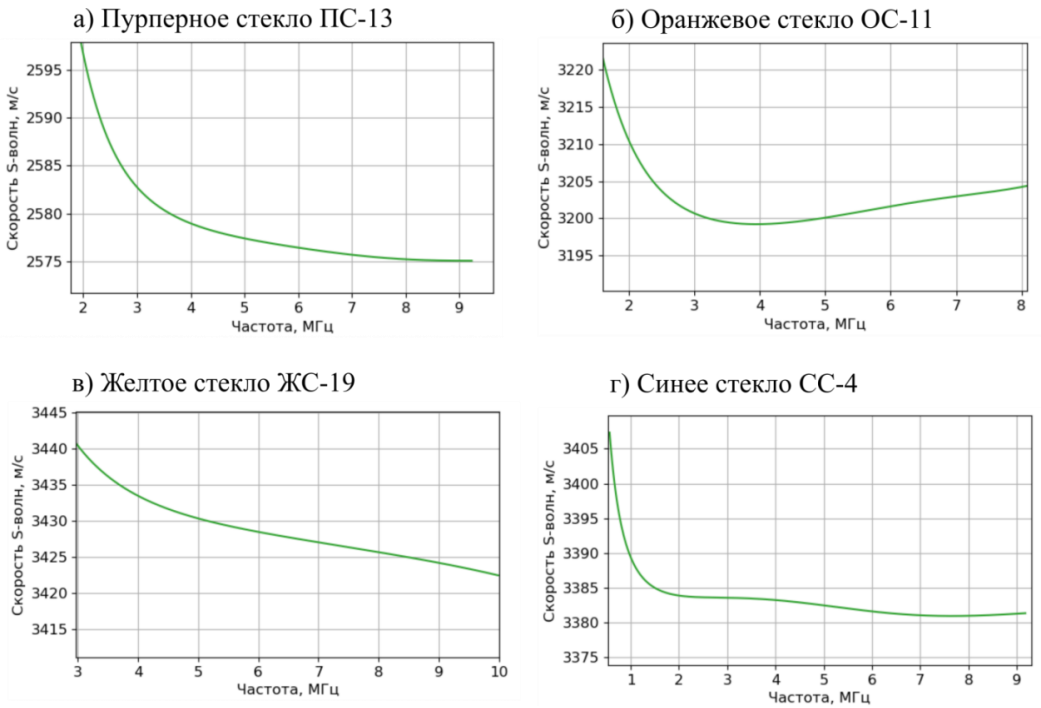


Рисунок 3.18 – Зависимости скоростей распространения сдвиговых волн от частоты (дисперсионные кривые) в образцах: а) ПС-13; б) ОС-11; в) ЖС-19; г) СС-4

Характерная длительность возбуждаемых разработанным широкополосным преобразователем импульсов сдвиговых волн лежит в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкс. Частотный диапазон работы преобразователя составляет от 0,1 до 12 МГц, причем

в диапазоне от 1,5 до 9,5 МГц значения фазовых и групповых скоростей совпадают.

Выводы

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие результаты:

- С учетом паразитных сигналов, возникающих в классическом оптико-акустическом преобразователе, спроектирован и изготовлен преобразователь преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01;
- Сформулирован алгоритм работы с разработанным преобразователем ПЛУ-СВ-01;
- Выявлены недостатки классической методики идентификации импульса сдвиговой волны с помощью преобразователя ПЛУ-6П-02, заключающаяся в «расплытии» фронта сдвиговой волны, при исследовании поликристаллических материалов (нержавеющая сталь) и тонких (до 3 мм) образцах иных изотропных материалов
- Проведена верификация результатов измерений с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01, которая показала качественную сходимость результатов измерения относительно применения классической методики. Выявлено существенное уменьшение разброса измеренных значений скоростей сдвиговых волн для всех исследуемых образцов. При этом разработанный преобразователь позволяет точно определять скорости распространения сдвиговых волн в тонких образцах и материалах с поликристаллической структурой, что решает описанные недостатки классической методики;
- Выявлен рабочий частотный диапазон преобразователя ПЛУ-СВ-01, при котором значения фазовых скоростей распространение сдвиговых волн совпадает с групповой скоростью

Вышеприведенные результаты доказывают второе научное положение.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНОГО ГЕНОТИПА С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СДВИГОВЫХ УПРУГИХ ВОЛН

4.1 Сведения об исследуемых образцах горных пород

В исследованиях, направленных на определение скоростей распространения сдвиговых волн с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01 в геоматериалах, было принято решение использовать образцы горных пород трех генотипов: магматические, метаморфические и осадочные горные породы. В табл. 4.1 приведен перечень исследуемых пород.

Таблица 4.1 – Перечень исследуемых горных пород

Генотип горной породы	Группа образцов	Наименование	Месторождение
Магматический	1	Базальт	Булатовское (Архангельская область)
	2	Долерит	Караканское (Кемеровская область)
Метаморфический	3	Шунгит	Зажогинское (Республика Карелия)
Осадочный	4	Аргиллит	Павловское (Архангельская область)
	5	Известняк	Афанасьевское (Московская область)

Были проведены исследования текстурных особенностей образцов каждой из выбранной горной породы: проведен микроскопический анализ подготовленных аншлифов с помощью растровой электронной микроскопии для отбора текстурно-однородных образцов (отсутствие явных систем несплошностей).

В качестве представителей магматических горных пород использовался базальт Булатовского месторождения и долериты Караканского месторождения.

Отобранные пробы базальта обладают массивной текстурой, неполнокристаллической структурой, полиминеральным составом. Породообразующие минералы представлены плагиоклазом (более 60 %) и пироксеном (20–30 %). В качестве примеси отмечаются оливин, включения бурового цвета рудного минерала (характерно для базальтов).

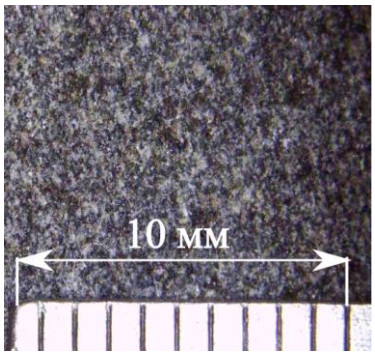
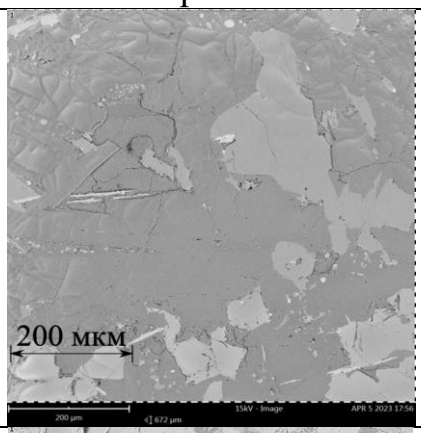
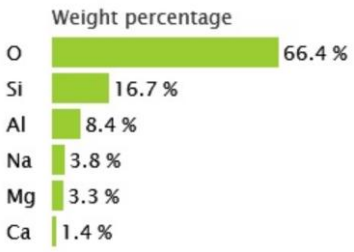
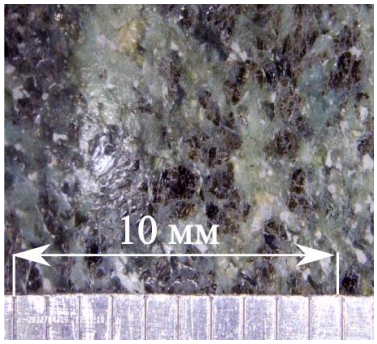
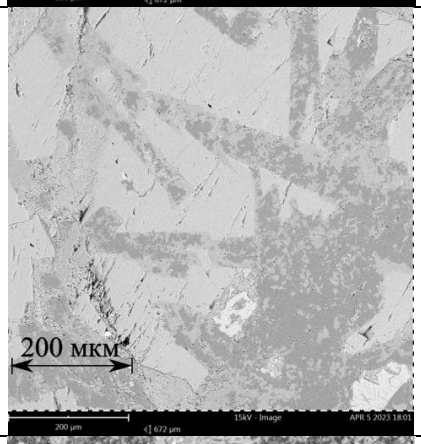
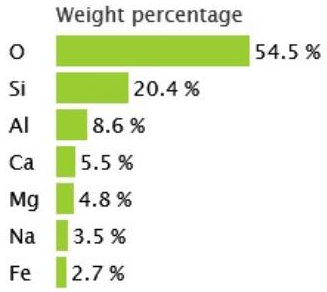
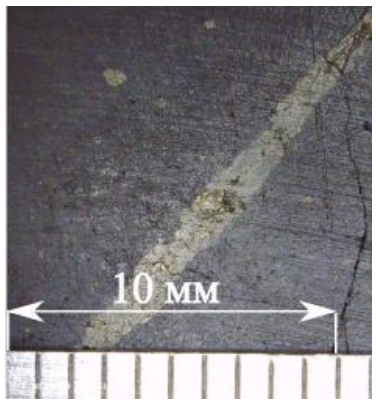
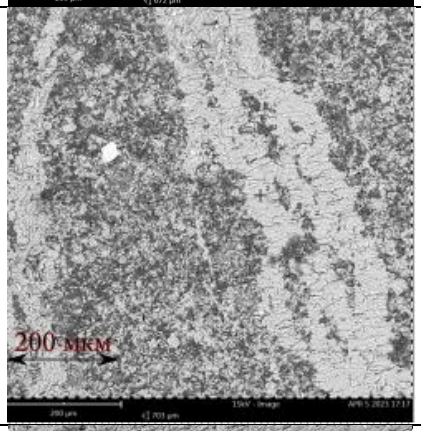
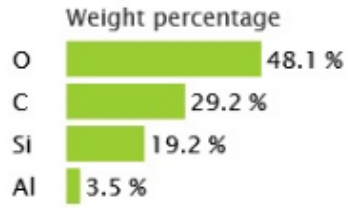
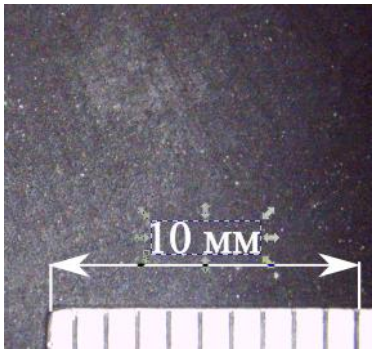
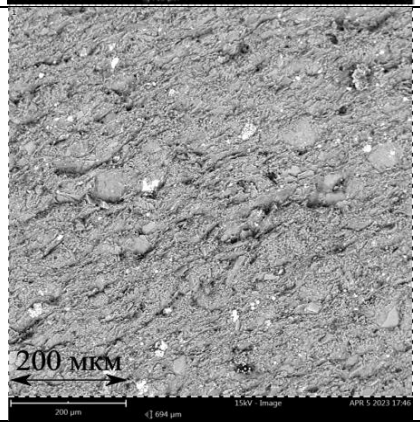
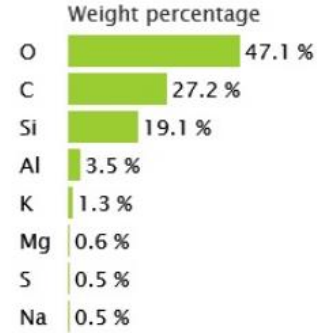
Исследования текстурных особенностей долеритов показали, что они представляют собой мелкозернистую поликристаллическую породу, сложенную микролитами плагиоклаза (более 80%), изометричными зернами пироксена (10%), рудными минералами – магнетитом в виде изометричных зерен и игольчатым ильменитом.

Исследования метаморфических горных пород проводилось на образцах шунгита Зажогинского месторождения. Исследования текстурных особенностей показали, что отобранные образцы обладают скрытокристаллической поверхностной структурой. Встречаются неравномерные вкрапления пирита и полевого шпата.

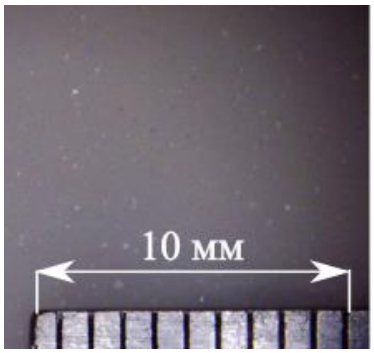
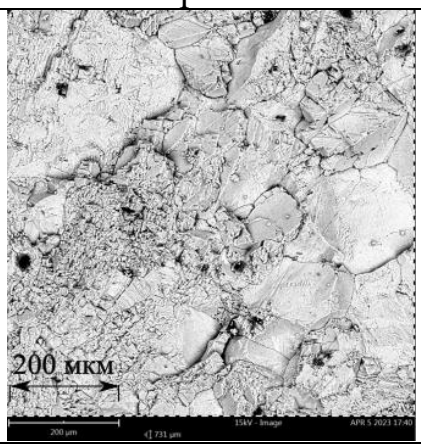
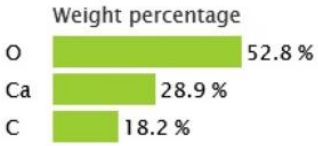
В качестве представителей осадочных горных пород были использованы образцы аргиллита Павловского месторождения и известняки Афанасьевского месторождения. Исследования текстурных особенностей показали, что порода обладает массивной текстурой и пелитовой (тонкозернистой) поверхностной структурой. Отмечены незначительные включения мусковита и биотита.

При анализе подготовленных аншлифов с помощью растрового электронного микроскопа Phenom ProX был определен элементный состав каждого аншлифа на основе энергодисперсионного спектрального анализа. В табл. 4.2 приведены сводные макро- и микроизображения вышеописанных образцов горных пород с приведенным элементным составом по поверхности.

Таблица 4.2 – Сводная таблица макро- и микроизображений поверхности исследуемых образцов горных пород с приведенным элементным составом

Горная порода	Макроскопическое изображение	Микроскопическое (электронное) изображение	Элементный состав
Базальт Группа 1			
Долерит Группа 2			
Шунгит Группа 3			
Аргиллит Группа 4			

Продолжение таблицы 4.2.

Горная порода	Макроскопическое изображение	Микроскопическое (электронное) изображение	Элементный состав
Известняк Группа 5			

На основе результатов макроскопического и микроскопического анализов аншлифов были отобраны образцы с относительно однородной поверхностной структурой без наличия явных расслоений и несплошностей.

4.2 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании классического преобразователя ПЛУ-6П-02

Аналогично исследованиям, проведенным в главе 3, была проведена оценка корректности измерений сдвиговых упругих волн в различных по генотипу горных породах с помощью классического преобразователя ПЛУ-6П-02.

Качество поверхности является основополагающим фактором для достижения наилучшего акустического контакта преобразователя и образца при проведении как классических ультразвуковых исследований, так и при лазерно-ультразвуковой диагностике. Таким образом, согласно требованиям к образцам для проведения на них лазерно-ультразвуковой диагностики, описанным в работе [122], из приведенных в подразделе 4.1 горных пород были отобраны однородные по текстуре фрагменты, из которых были подготовлены в соответствии с [123, 124] плоскопараллельные пластины произвольной формы в поперечном сечении с площадью не менее 100 мм^2. Образцы-пластины подготавливались с помощью

отрезного станка и шлифовально-полировальной машины фирмы «Struers» (Нидерланды), позволяющей добиться необходимой прецизионности пробоподготовки. Плоскопараллельность граней составляла не менее 0,01 мм при толщине образцов от 1,5 мм до 8,0 мм. Толщины образцов варьировались из условия, что они должны быть не менее, чем в 3 раза больше максимального размера видимой неоднородности каждой породы.

На рис. 4.1 приведена фотография части подготовленных образцов-пластин для проведения экспериментов.

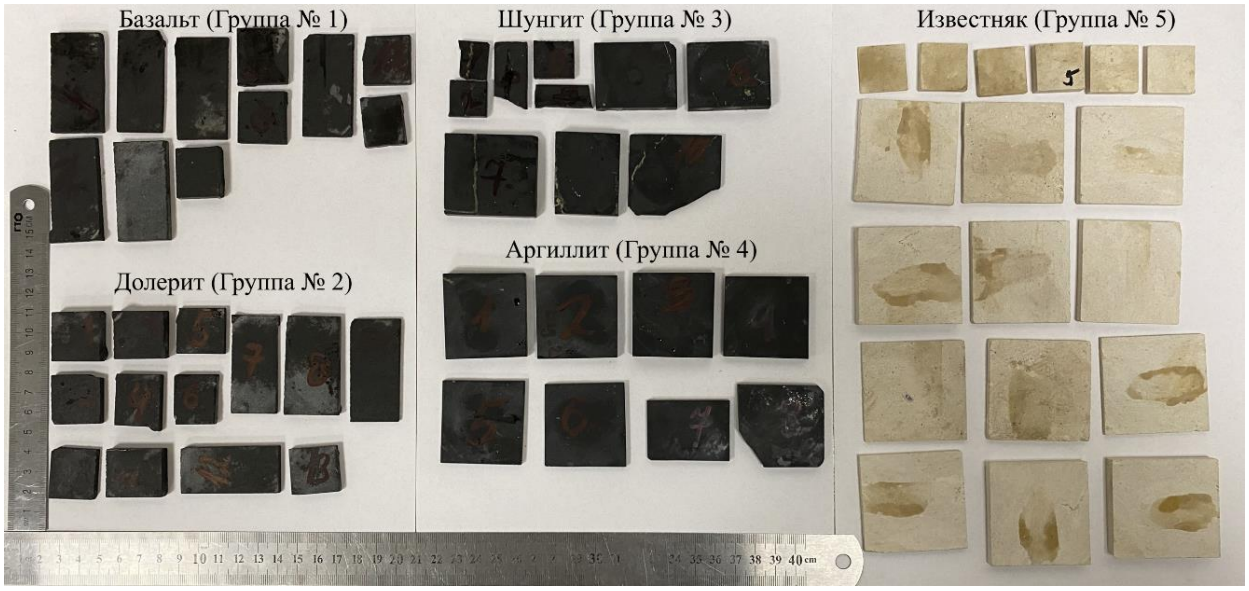


Рисунок 4.1 – Фотография исследуемых образцов горных пород

Были рассмотрены временные формы сигналов, полученные при исследовании обозначенных групп образцов горных пород. При этом до обработки итогового сигнала производилось его усреднение по пятистам импульсам. Так, на рис. 4.2 приведен пример волновой формы сигнала, полученной при сканировании образцов базальтов группы № 1. На акустическом треке видны все искомые полезные импульсы продольных и сдвиговых волн.

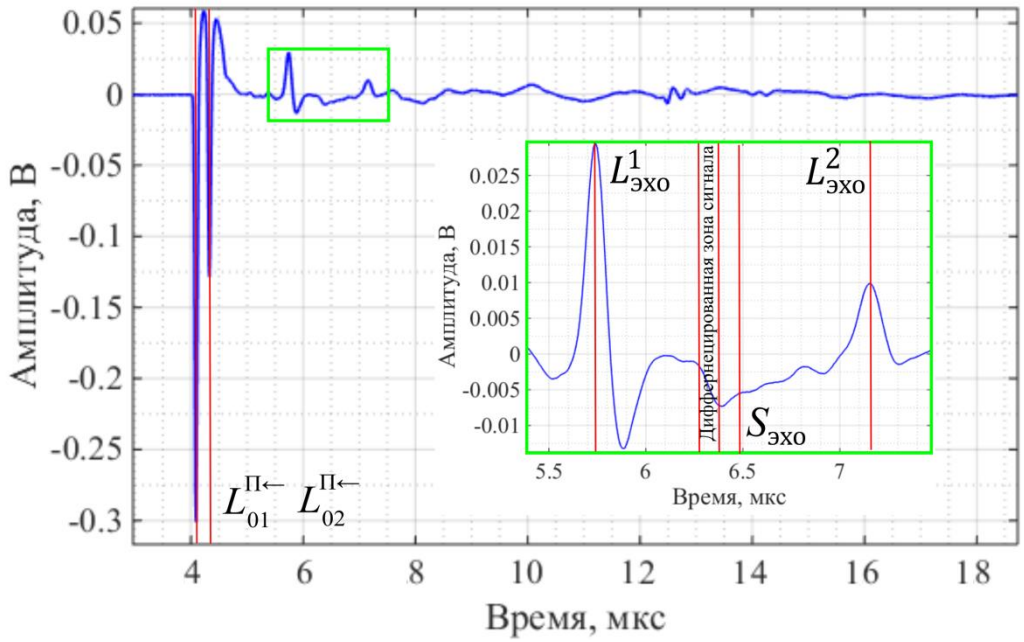


Рисунок 4.2 – Типичная временная форма сигнала, полученная при исследовании образцов базальта группы № 1

Обозначения зондирующего $L_{01}^{П\leftarrow}$ и опорного $L_{02}^{П\leftarrow}$ импульса, а также импульсов продольных $L_{эхо}^{1}$, $L_{эхо}^{2}$ (отраженных от тыльной поверхности образца), и сдвиговых $S_{эхо}$ волн и методика их регистрации аналогична описанию, приведенному в разделе 3.1 главы 3 диссертационной работы.

При исследовании образцов базальтов группы № 1 была отмечена зависимость степени качества регистрации полезных импульсов продольных и сдвиговых волн от толщины исследуемых образцов. Так, при толщине образцов от 3,30 до 5,05 мм наблюдаются отчетливые импульсы $L_{эхо}^{1}$, $L_{эхо}^{2}$ и $S_{эхо}$ с четко выраженными их максимумами и минимумами. При исследовании образцов толщиной от 1,70 до 2,60 мм было отмечено, что импульс сдвиговой волны $S_{эхо}$ «накладывается» на импульсы продольных волн $L_{эхо}^{1}$, $L_{эхо}^{2}$, что приводит к сложностям регистрации времени его прихода. На рис. 4.3 представлен пример временной формы при исследовании образца толщиной 2,20 мм (1_Baz_4).

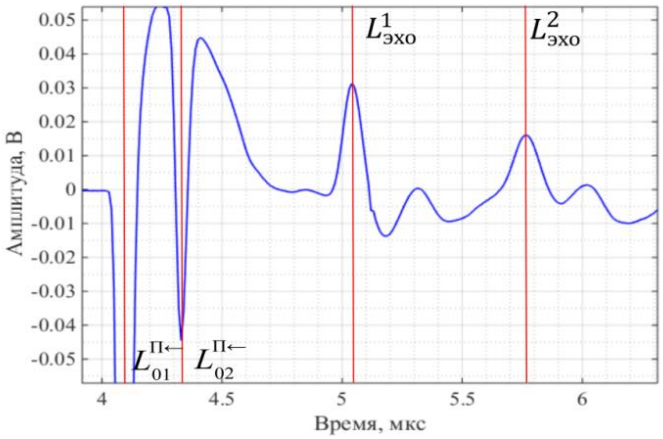


Рисунок 4.3 – Пример временной формы сигнала, на которой не удалось идентифицировать импульс сдвиговой волны $S_{эхо}$. Образец 1_Baz_4

Иная картина наблюдалась при исследовании образцов толщиной более 6,00 мм. Для данных образцов отчетливо возможно зарегистрировать только импульс первого донного отражения $L^1_{эхо}$, тогда как импульс, зарегистрированный в результате двойного пробега продольной волны $L^2_{эхо}$, а также импульс сдвиговой волны $S_{эхо}$ имеют малую амплитуду, сопоставимую с шумовыми сигналами, зарегистрированными от различных неоднородностей в структуре образца. Это обусловлено сильным затуханием ультразвуковых волн, в горных породах. Пример временной формы сигнала для данного случая приведен на рис. 4.4.

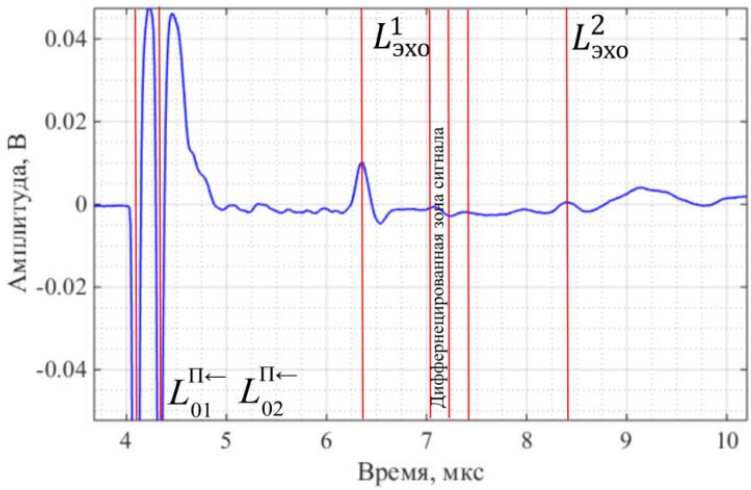


Рисунок 4.4 – Пример временной формы сигнала, при обработке которой возможно уменьшение точности регистрации импульса сдвиговой волны $S_{эхо}$ и импульса второго донного отражения $L^2_{эхо}$. Образец 1_Baz_7

При исследовании образцов долеритов группы № 2 было обнаружено, что высокое качество регистрации полезных импульсов продольных и сдвиговых волн достижимо и на образцах толщиной более 6,00 мм. Это связано с более однородной мелкозернистой структурой по сравнению с базальтами группы № 1. Так, на рис. 4.5 представлен пример временной формы сигнала, полученный при исследовании образца 2_Dol_2 толщиной 6,20 мм.

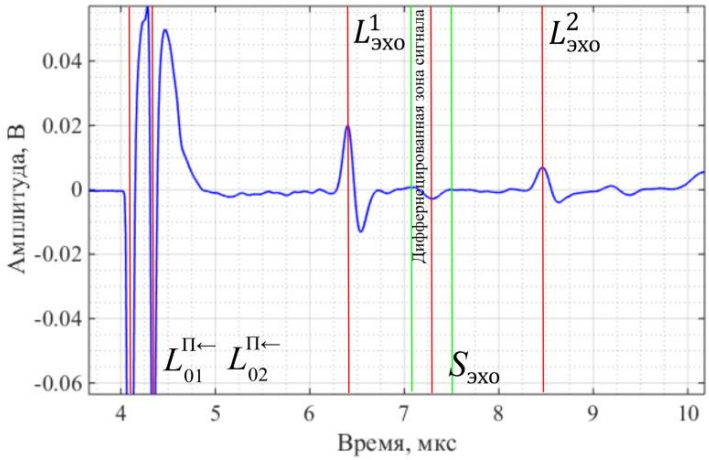


Рисунок 4.5 – Пример качественной временной формы сигнала, полученной при исследовании образцов долеритов группы № 2. Образец 2_Dol_2

Тем не менее, следует отметить, что проблема обнаружения импульса сдвиговой волны при исследовании образцов толщиной менее 3,00 мм также присутствует при рассмотрении данной группы геоматериалов. Результат аналогичен приведенному на рис. 4.3. Ввиду малой толщины образца импульс сдвиговой волны был наложен на импульсы продольных волн, что не позволяло зафиксировать время его прихода.

В случае применения лазерно-ультразвуковой диагностики при исследовании горных пород, обладающих значительной неоднородностью структуры, довольно часто встречаются сложности в определении времен прихода и, соответственно, скоростей распространения ультразвуковых волн обоих типов. Так, при исследовании образцов шунгитов группы № 3 было отмечено, что сложности в интерпретировании сигналов присутствовали при исследовании некоторых образцов вне зависимости от их толщины. Например, на

рис. 4.6 представлена временная форма сигнала, полученная при сканировании образца 4_Shun_1 толщиной 4,52 мм. Видно, что при сканировании был зарегистрирован только импульс $L^1_{\text{эхо}}$, тогда как импульс $L^2_{\text{эхо}}$, необходимый для корректного расчета скорости распространения продольной волны, и импульс сдвиговый волны $S_{\text{эхо}}$ не были идентифицированы.

Поэтому в случае, когда импульс $L^2_{\text{эхо}}$ не был обнаружен, скорость распространения продольной волны рассчитывалась с использованием времени задержки минимума амплитуды опорного сигнала $T^{min}_{L^{\text{п}\leftarrow}_{02}}$ по следующей формуле:

$$V_L = \frac{2h_{\text{обр}}}{T^{max}_{L^1_{\text{эхо}}} - T^{min}_{L^{\text{п}\leftarrow}_{02}}} \tag{4.1}$$

где $T^{max}_{L^1_{\text{эхо}}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L^1_{\text{эхо}}$, $h_{\text{обр}}$ – толщина образца.

Следует отметить, что расчет по формуле (4.1) является не совсем точным, поскольку при ее использовании большое влияние на регистрацию времени $T^{min}_{L^{\text{п}\leftarrow}_{02}}$ оказывают контактные условия и сила прижима преобразователя к образцу, что ввиду человеческого фактора приводят как к случайным, так и к систематическим погрешностям.

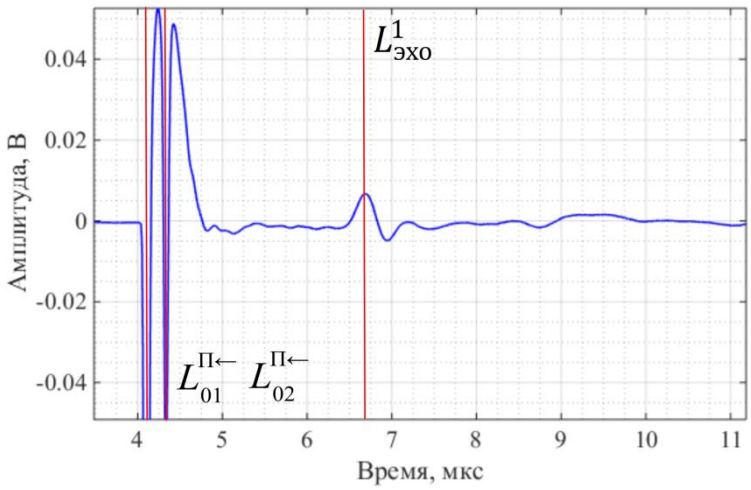


Рисунок 4.6 – Пример временной формы сигнала, полученный при исследовании образца шунгита группы № 3. Образец 4_Shun_1

Тем не менее, при исследовании образца 4_Shun_2 толщиной 4,20 мм были отчетливо обнаружены максимумы импульсов $L^1_{эхо}$, $L^2_{эхо}$ и минимум импульса $S_{эхо}$.

Таким образом, результаты определения времен прихода импульсов продольных и сдвиговых волн больше зависели от наличия неоднородностей в структуре образцов, нежели от его толщины.

Исследования образцов осадочных горных пород аргиллита и известняка групп № 4 и № 5 показали схожие с магматическими горными породами результаты. В образцах толщиной менее 3,00 мм не удалось зарегистрировать импульс сдвиговой волны. При этом в образцах аргиллита были получены высокие по качеству временные формы сигналов и на образцах большей толщины (6,00 – 8,00 мм).

На рис. 4.7 представлены результаты определения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах базальта группы № 1.

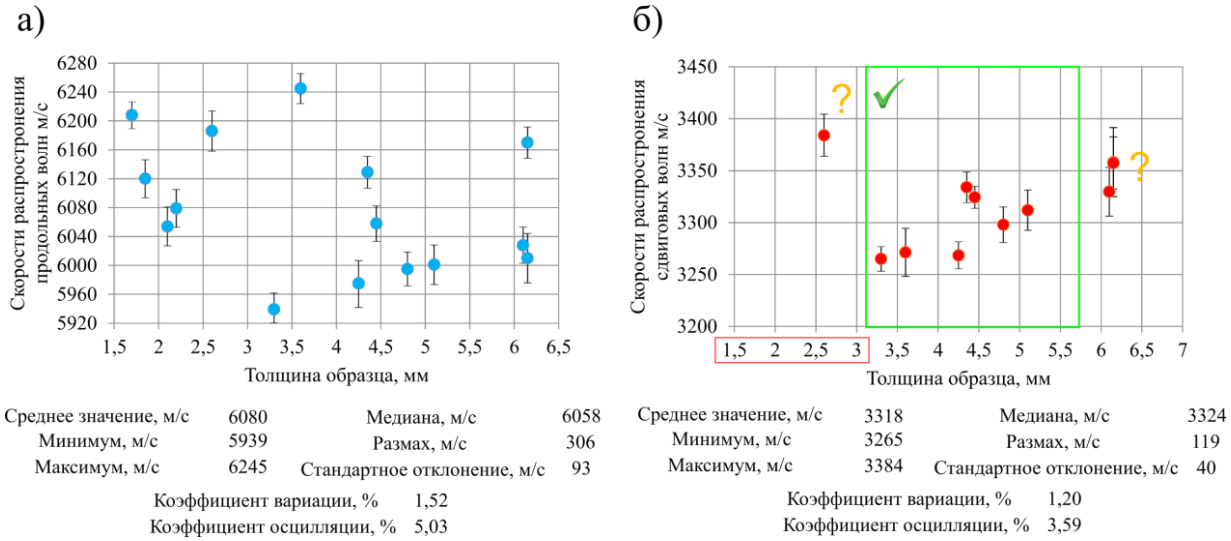
Для более наглядного представления рисунков были приняты следующие обозначения:

✓ - отчетливо идентифицируются максимумы импульсов $L^1_{эхо}$, $L^2_{эхо}$ и минимум импульса $S_{эхо}$;

? - отчетливо идентифицируется максимум импульса $L^1_{эхо}$. Импульс сдвиговой волны «расплыт» по временной форме или амплитуды импульсов $L^2_{эхо}$ и $S_{эхо}$ сопоставимы с шумовыми сигналами от неоднородностей образца или они расположены вблизи «паразитных сигналов». Возможно уменьшение точности регистрации.

Диапазон значений скоростей в образцах базальта составил V_L= 5939 – 6245 м/с, а V_S= 3265 – 3384 м/с. Относительно медианы, значения скоростей L-волн с 95 % вероятностью лежат в диапазоне 6079±93 м/с, значения скоростей S-волн в диапазоне 3324±44 м/с. Отмечено, что при использовании стандартного преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02 у большинства образцов не удалось определить значения скоростей в образцах, толщины которых лежали в диапазоне от 1,70 до 3,00 мм, а в случае определения импульса сдвиговой волны

по временной форме сигнала полученные значения скорости S-волны вызывали сомнения в корректности определения.

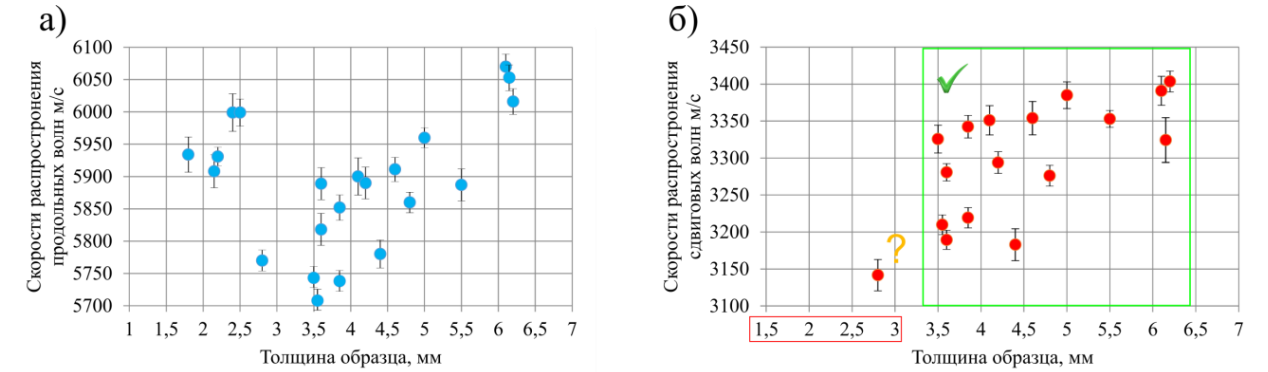


Среднее значение, м/с	6080	Медиана, м/с	6058
Минимум, м/с	5939	Размах, м/с	306
Максимум, м/с	6245	Стандартное отклонение, м/с	93
Коэффициент вариации, %	1,52		
Коэффициент осцилляции, %	5,03		

Среднее значение, м/с	3318	Медиана, м/с	3324
Минимум, м/с	3265	Размах, м/с	119
Максимум, м/с	3384	Стандартное отклонение, м/с	40
Коэффициент вариации, %	1,20		
Коэффициент осцилляции, %	3,59		

Рисунок 4.7 – Значения скоростей распространения продольных (а) и сдвиговых (б) волн в образцах базальта группы № 1

На рис. 4.8 представлены результаты определения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах долерита группы № 2.



Среднее значение, м/с	5895	Медиана, м/с	5908
Минимум, м/с	5708	Размах, м/с	362
Максимум, м/с	6070	Стандартное отклонение, м/с	120
Коэффициент вариации, %	2,03		
Коэффициент осцилляции, %	6,14		

Среднее значение, м/с	3283	Медиана, м/с	3303
Минимум, м/с	3142	Размах, м/с	262
Максимум, м/с	3404	Стандартное отклонение, м/с	89
Коэффициент вариации, %	2,71		
Коэффициент осцилляции, %	7,98		

Рисунок 4.8 Значения скоростей распространения продольных (а) и сдвиговых (б) волн в образцах долерита группы № 2

Диапазон значений скоростей в образцах долерита составил V_L= 5708 – 6070 м/с, а V_S= 3142 – 3404 м/с. Относительно медианы значения скоростей L-волн с 95 % вероятностью лежат в диапазоне 5908±120 м/с, значения скоростей S-волн в диапазоне 3303±89 м/с. Отмечено, что у большинства образцов долерита,

также как и у базальтов, не удалось определить значения скоростей в образцах, толщины которых лежали в диапазоне от 1,50 до 3,00 мм.

На рис. 4.9 представлены результаты определения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах шунгита группы № 3.

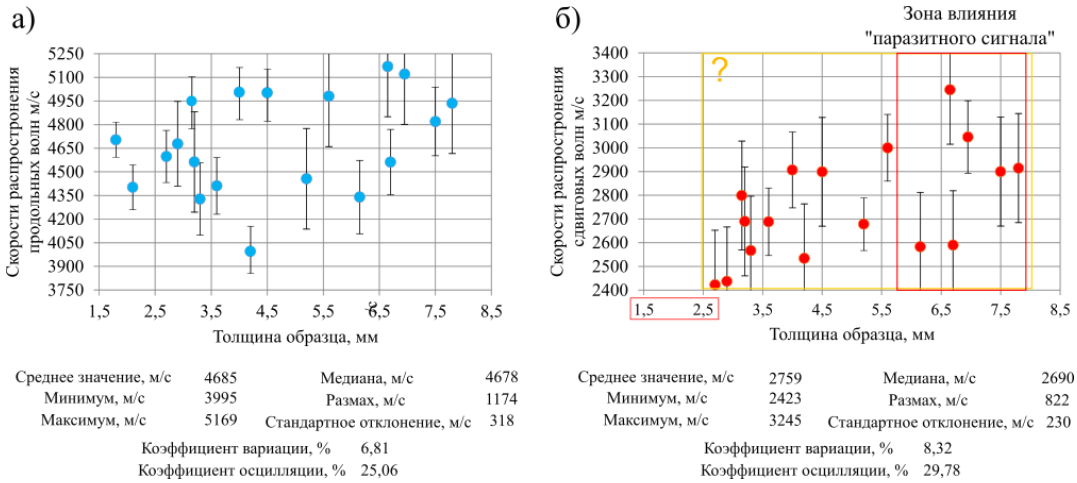


Рисунок 4.9 – Значения скоростей распространения продольных (а) и сдвиговых (б) волн в образцах шунгита группы № 3

При исследовании образцов шунгита был получен достаточно большой разброс значений скоростей продольных и сдвиговых волн. Так, диапазон значений скоростей составил V_L= 3995 – 5169 м/с, а V_S= 2423 – 3245 м/с. Относительно медианы, значения скоростей L-волн с 95 % вероятностью лежат в диапазоне 4678±318 м/с, значения скоростей S-волн в диапазоне 2690±230 м/с. Ввиду большого размаха полученные значения скоростей как продольных, так и сдвиговых волн вызывали сомнения в корректности их расчета. Такой разброс, с одной стороны, был связан с наличием неоднородностей и различных включений в объеме образцов, с другой стороны, существенное затухание ультразвуковых сигналов и дисперсии фазовой скорости в шунгите приводило к изменению времени распространения продольных и сдвиговых волн от точки к точке. Так, при исследовании образцов от 6,00 мм до 8,00 мм это привело к наложению полезных импульсов сдвиговых волн на один из паразитных сигналов, описанных в разделе 3.1 диссертационной работы.

На рис. 4.10 представлены результаты определения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах аргиллита группы №4.

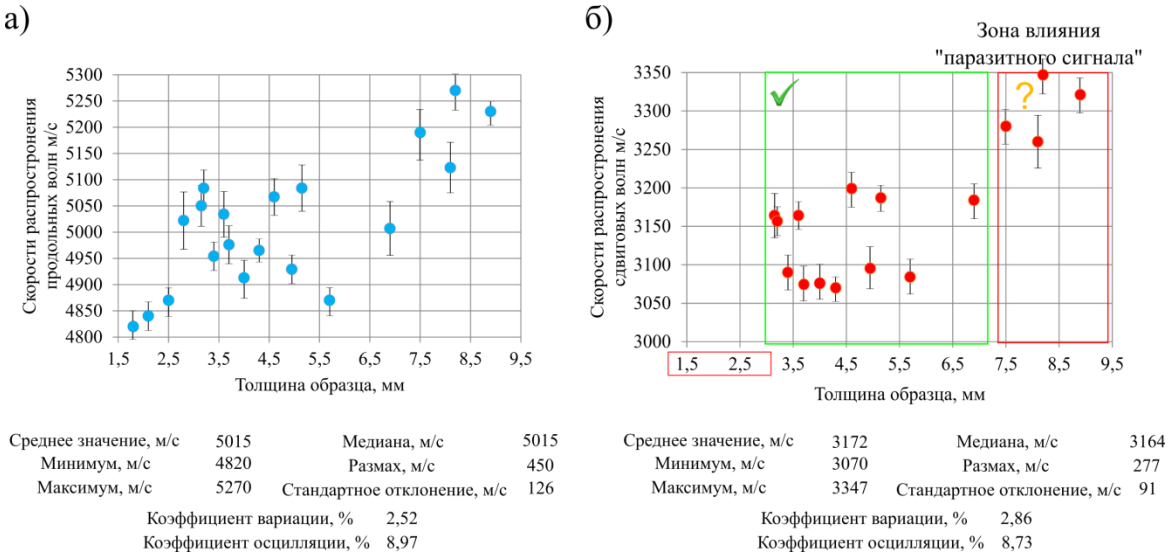


Рисунок 4.10 – Значения скоростей распространения продольных (а) и сдвиговых (б) волн в образцах аргиллита группы № 4

Диапазон значений скоростей составил V_L= 4820 – 5270 м/с, а V_S= 3070 – 3347 м/с. Относительно медианы, значения скоростей L-волн с 95 % вероятностью лежат в диапазоне 5015±126 м/с, значения скоростей S-волн в диапазоне 3164±91 м/с. Поскольку на временных формах сигналов достаточно отчетливо были зарегистрированы полезные импульсы $L^1_{эхо}$, $L^2_{эхо}$ и $S_{эхо}$ на диапазонах толщин от 3,00 до 5,80 мм, был сделан вывод, что скорости распространения сдвиговых волн были корректно рассчитаны, кроме образцов толщиной от 1,50 до 3,00 мм. При этом у образцов толщиной более 5,80 мм было получено, что полезные импульсы $S_{эхо}$ были наложены на паразитный сигнал, что мог повлиять на точность их определения.

На рис. 4.11 представлены результаты определения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах известняка группы № 5.

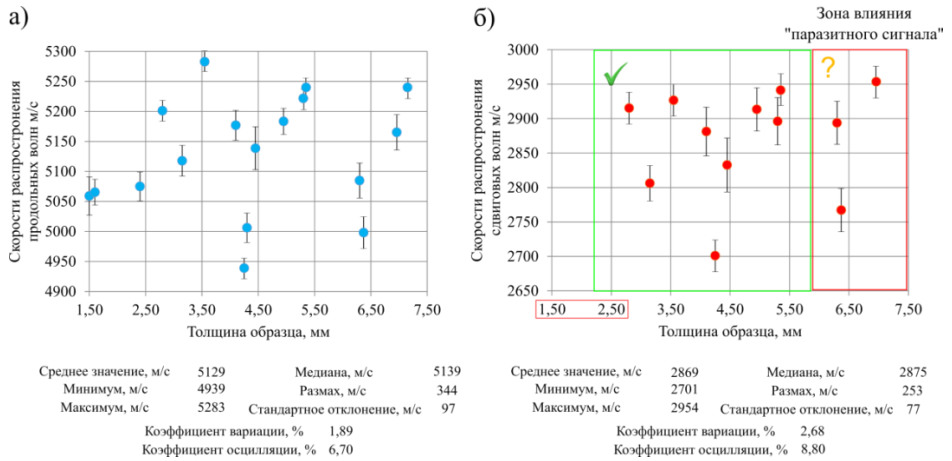


Рисунок 4.11 Значения скоростей распространения продольных (а) и сдвиговых (б) волн в образцах известняка группы № 5

Диапазон значений скоростей составил V_L= 4939 – 5283 м/с, а V_S= 2701 – 2954 м/с. Относительно медианы значения скоростей L-волн с 95 % вероятностью лежат в диапазоне 5139±120 м/с, значения скоростей S-волн в диапазоне 2875±77 м/с. При исследовании данной группы образцов также присутствует проблема определения сдвиговой волны в образцах толщиной менее 3,0 мм. Влияние паразитного сигнала на полезные импульсы присутствовало при исследовании образцов толщиной более 6,00 мм.

Таким образом, следует сделать вывод, что при исследовании образцов горных пород различных генотипов с использованием стандартного оптико-акустического преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02 присутствуют следующие проблемы:

1) Невозможность определения скоростей распространения сдвиговых волн в тонких (менее 3,00 мм) образцах в результате наложения импульса сдвиговой волны на импульсы первого и второго отражений продольной волны от тыльной поверхности образцов;

2) Паразитные сигналы, возникающие вследствие конструкционных особенностей классического преобразователя ПЛУ-6П-02, расположены вблизи полезных импульсов продольных и сдвиговых волн при исследовании образцов горных пород толщиной от 6,00 мм в зависимости от акустических свойств горных пород.

4.3 Исследование временных форм сигналов, получаемых при использовании преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

4.3.1 Исследование временных форм сигналов, регистрируемых на образцах магматических горных пород

На следующем этапе перечисленные в разделе 4.2 образцы горных пород были исследованы с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01 по алгоритму, описанному в разделе 3.2 настоящей диссертационной работы. В отличие от проведенных исследований изотропных материалов, описанных в главе 3, где в преобразователе ПЛУ-СВ-01 в качестве материала призмы использовалось бесцветное оптическое стекло, при исследовании горных пород была использована призма, выполненная из тяжелого флинта. Данное решение повлияло на время регистрации $L_1^{П\leftarrow}$, которое увеличилось. Таким образом, работа проводилась в «безопасной зоне №2» в соответствии с рис. 3.3.

На рис. 4.12, 4.13 приведены примеры временных форм сигналов, зарегистрированных при исследовании образцов базальта группы №1. Так, на рис. 4.12, а приведена временная форма при исследовании образца 1_Baz_4 толщиной 2,20 мм.

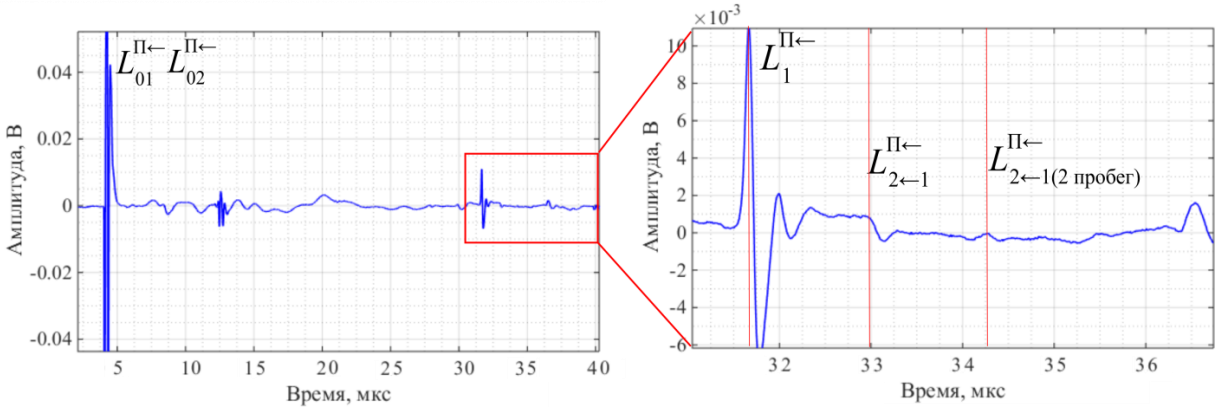


Рисунок 4.12 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании образца базальта 1_Baz_4 с расставленными стробами регистрации времен прихода полезных импульсов

На акустическом треке (рис. 4.12) отчетливо регистрируется первое $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ и второе отражение сдвиговой волны от тыльной поверхности образца, что позволяет измерять скорость ее распространения по формулам 3.2 и 3.3. Следует отметить, что при исследовании данного образца с помощью классической методики, на временной форме сигнала не удалось идентифицировать импульс сдвиговой волны и, соответственно, рассчитать ее скорость (рис. 4.3). Качественные результаты были получены и для образцов базальта больших по толщине. Так, на рис. 4.13 приведена временная форма сигнала, полученная при исследовании образца 1_Baz_7 толщиной 6,15 мм. Однако здесь скорость сдвиговой волны определялась по опорному сигналу в соответствии с формулой (3.3).

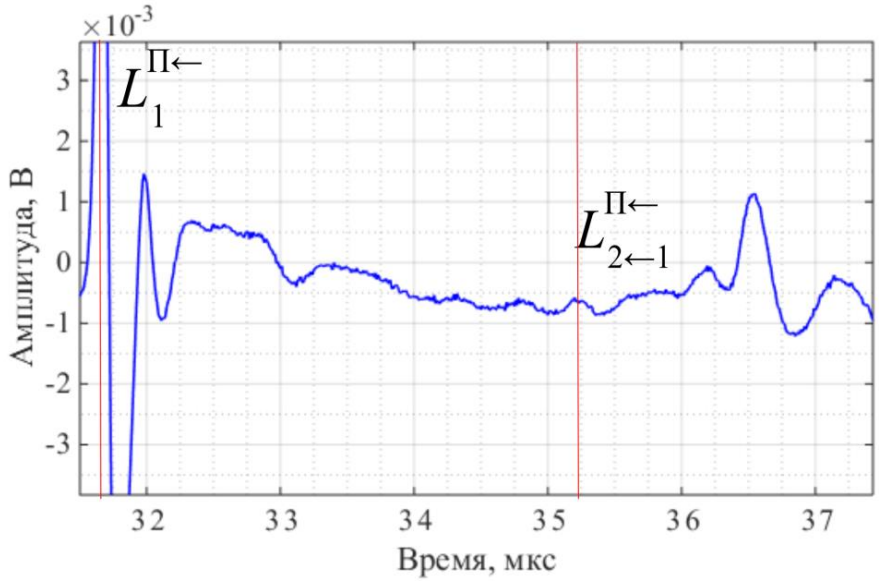
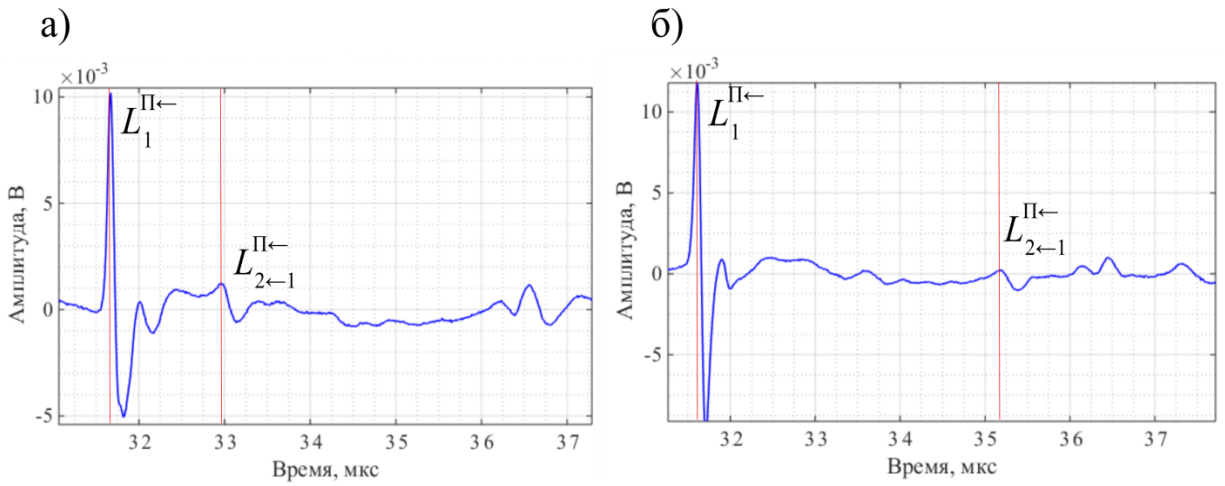


Рисунок 4.13 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании образца базальта 1_Baz_7

Аналогичные результаты были получены при исследовании образцов долеритов группы № 2. Для всех образцов, имеющих толщину менее 3,00 мм, были зарегистрированы искомые полезные импульсы сдвиговых волн, и не возникло проблем при исследовании образцов большей толщины. Примеры временных форм сигналов приведены на рис. 4.14.



а) Образец 2_Dol_10 толщиной 2,2 мм; б) Образец 2_Dol_11 толщиной 6,1 мм
Рисунок 4.14 – Примеры временных форм сигналов, полученные при исследовании образцов долерита группы № 2

4.3.2 Обнаруженные проблемы при работе с разработанным преобразователем сдвиговых волн при исследовании образцов метаморфических пород и возможные пути их решения

Как было описано в разделе 4.2, при исследовании образцов метаморфических горных пород на примере образцов шунгита с помощью классической методики были отмечены сложности в интерпретации получаемых сигналов в части выделения полезных импульсов для прецизионного расчёта скоростей сдвиговых волн независимо от толщины образцов. Данная проблема не возникала при использовании преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01. Так, на рис. 4.15 приведена временная форма сигнала, полученная при исследовании образца 4_Shun_9 толщиной 4,00 мм, где наблюдается отчетливый импульс сдвиговой волны $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$.

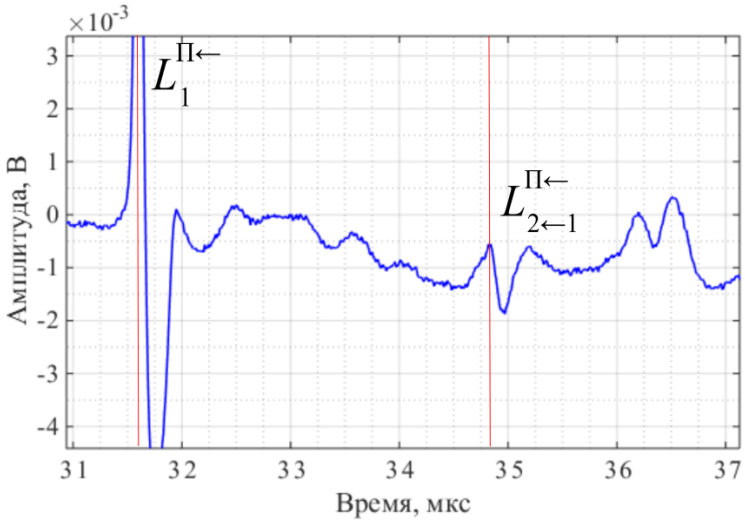


Рисунок 4.15 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании образца шунгита 4_Shun_9

Однако при исследовании данной группы образцов была обнаружена следующая проблема. Как было описано в разделе 3.1, у классического преобразователя ПЛУ-6П-02 присутствуют паразитные сигналы, которые возникают вследствие его конструкционных особенностей, что ограничивает «безопасную рабочую зону» изготовленного преобразователя ПЛУ-СВ-01. Также присутствует проблема переотражений в самой изготовленной призме. Их можно наблюдать на всех вышеприведенных формах сигналов на временном диапазоне от 36 до 38 мкс. Это приводит к наложению полезных импульсов сдвиговых волн на паразитные сигналы при исследовании образцов толщиной от 6,00 мм до 8,00 мм. Пример данной ситуации приведен на рис. 4.16, а (образец 4_Shun_7 толщиной 6,65 мм). Данная проблема устранялась двумя методами.

Первое решение заключалось в замене призмы из тяжелого флинта на бесцветное оптическое стекло. Временной интервал «безопасной зоны» в случае использования данной призмы составлял 10 мкс (от 20 мкс до 30 мкс), что было существенно больше 6 мкс (от 31 мкс до 37 мкс) для тяжелого флинта. Данного временного интервала хватало для исследования образцов больших по толщине (до 8,0 мм). При ее использовании импульс $L_1^{П\leftarrow}$ не накладывался на паразитные сигналы (рис. 4.16,б).

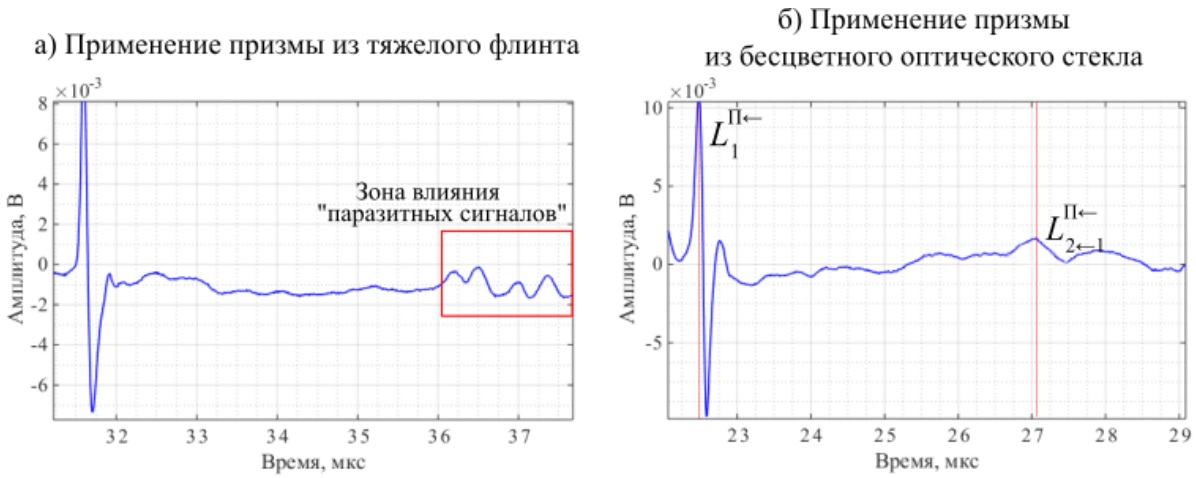
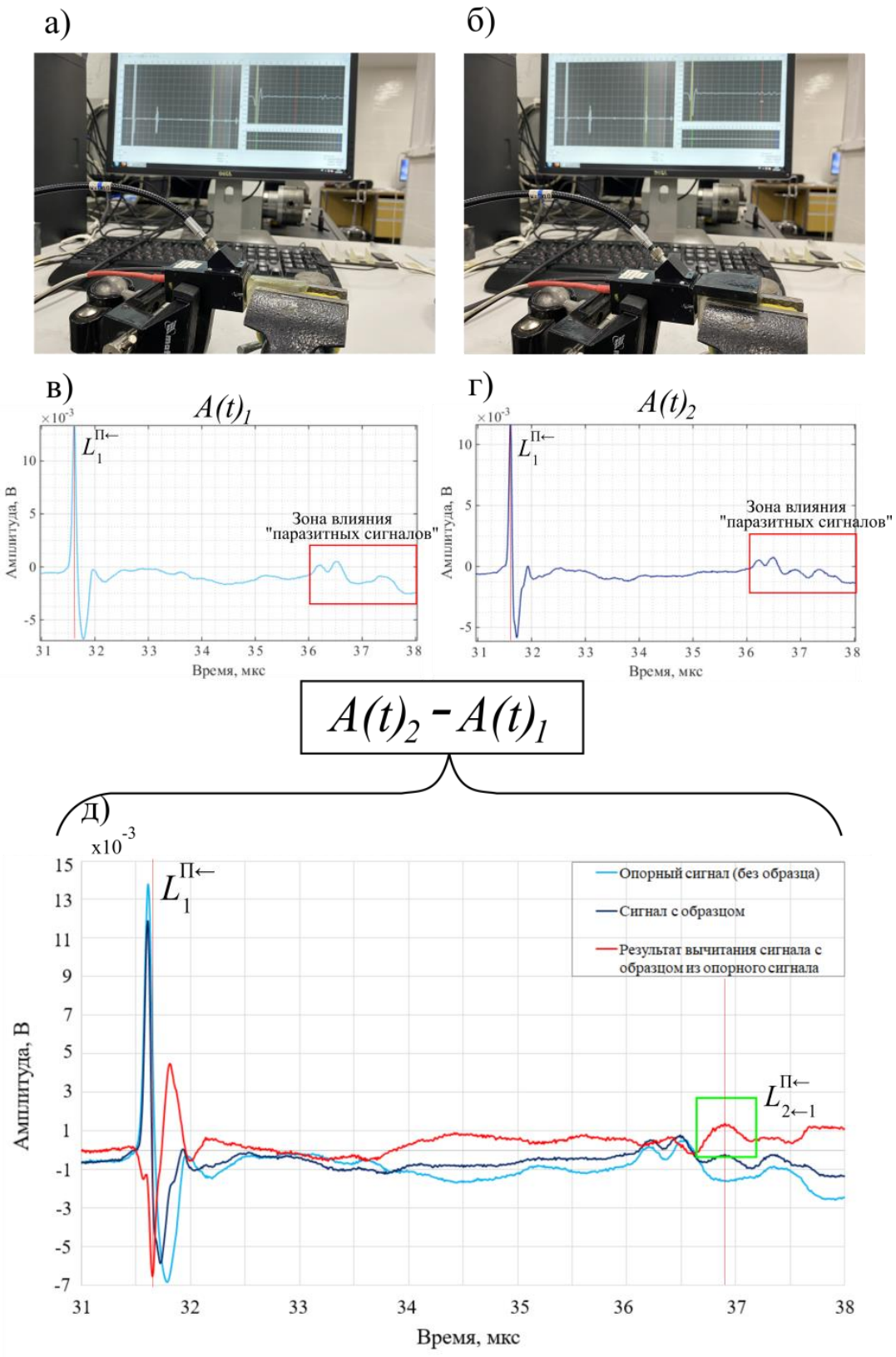


Рисунок 4.16 – Временные формы сигналов, полученные при использовании в качестве материала призмы тяжелого флинта (а) и бесцветного оптического стекла (б) для исследования образца 4_Shun_7, толщиной 6,65 мм

Второе решение описанной проблемы заключалось в следующем. Поскольку для выделения полезного импульса сдвиговых волн необходимо обеспечить отсутствие влияния паразитного сигнала для исключения ошибки определения максимума импульса $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$, была произведена дополнительная обработка полученных сигналов. Для этого вначале был зафиксирован опорный сигнал $A(t)_1$, при случае отсутствия на рабочей грани призмы образца (рис. 4.17, а, в). На рис. 4.17, в, г, красным прямоугольником выделены зоны влияния паразитных сигналов. Затем при непосредственном контакте рабочей грани призмы с образцом (рис. 4.17, б, г) была получена временная форма $A(t)_2$. Для того, чтобы отсеять паразитные сигналы, было произведено вычитание $A(t)_2$- $A(t)_1$, результат которого приведен на рис. 4.17, д. На данном сигнале уже достаточно отчетливо регистрируется искомый импульс $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$, который впоследствии использовался для расчета скорости распространения сдвиговой волны.



а) Получение опорного сигнала; б) Получение сигнала с образцом; в) Опорный сигнал; г) Сигнал с образцом; д) Результат вычитания сигнала с образцом из опорного сигнала

Рисунок 4.17 – Процесс дополнительной обработки временных форм сигналов для улучшения качества регистрации импульса сдвиговой волны

4.3.3 Исследование временных форм сигналов, регистрируемых на образцах осадочных горных пород

На рис. 4.18, 4.19 приведены примеры временных форм сигналов, зарегистрированных при исследовании образцов аргиллита группы № 4. Так, на рис. 4.18 приведена временная форма образца 4_Arg_5 толщиной 4,15 мм.

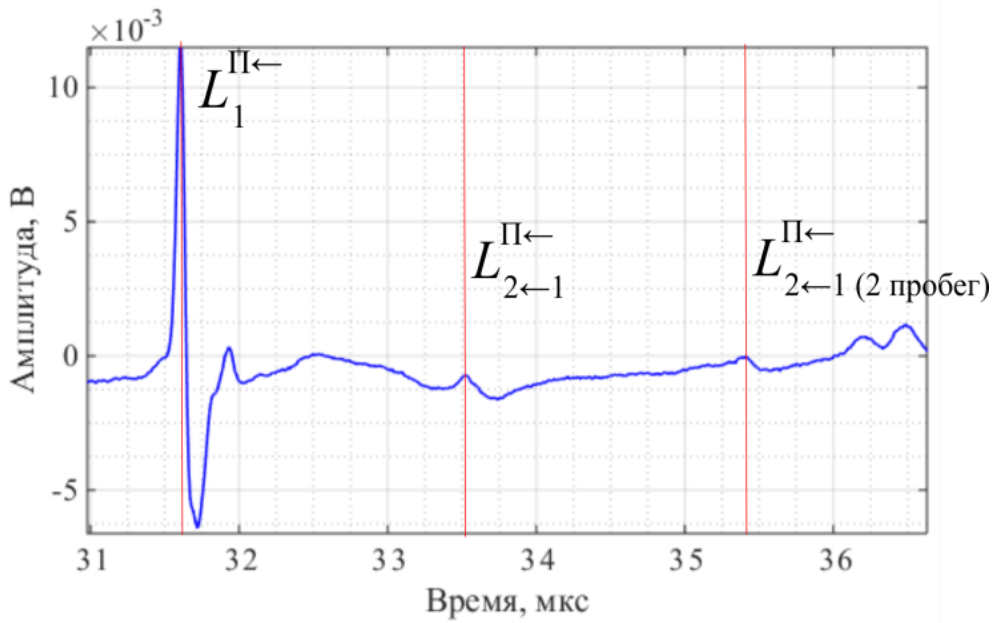


Рисунок 4.18 – Временная форма сигнала, полученная при исследовании образца аргиллита 4_Arg_5 с расставленными стропами регистрации времен прихода полезных импульсов

Из этой временной формы видно, что достаточно отчетливо регистрируется первое $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$ и второе $L_{2\rightarrow1(2П)}^{П\leftarrow}$отражение сдвиговой волны от тыльной поверхности образца.

Полезные импульсы присутствуют на каждой из временных форм сигналов, которые соответствуют диапазону толщин от 1,50 до 8,00 мм. При исследовании образцов толщиной более 8,00 мм для исключения паразитных сигналов была использована дополнительная обработка сигналов, алгоритм которой описан в подразделе 4.3.2. Один из результатов приведен на рис. 4.19, полученный при исследовании образца 4_Arg_3 толщиной 8,20 мм.

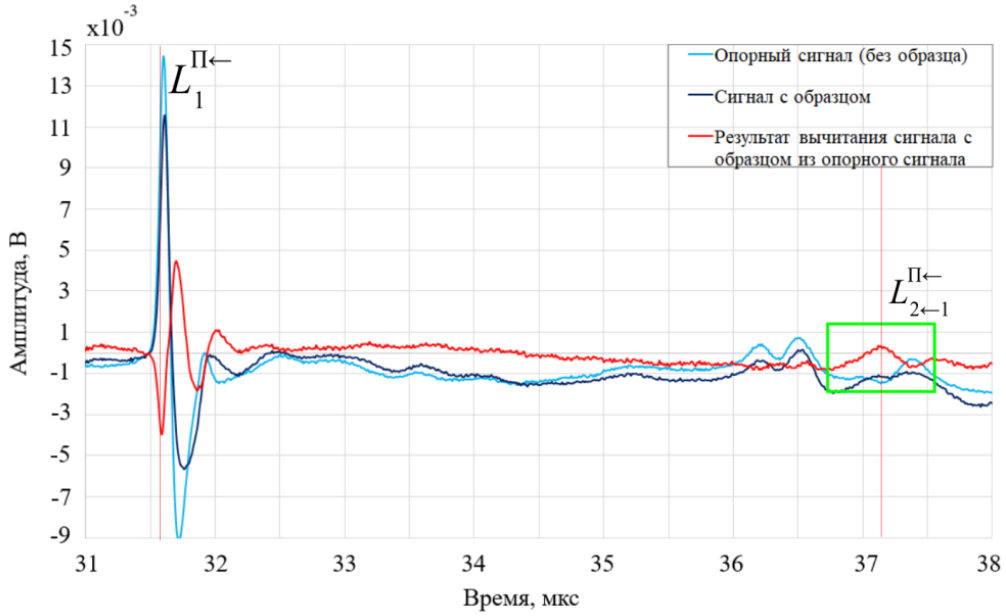
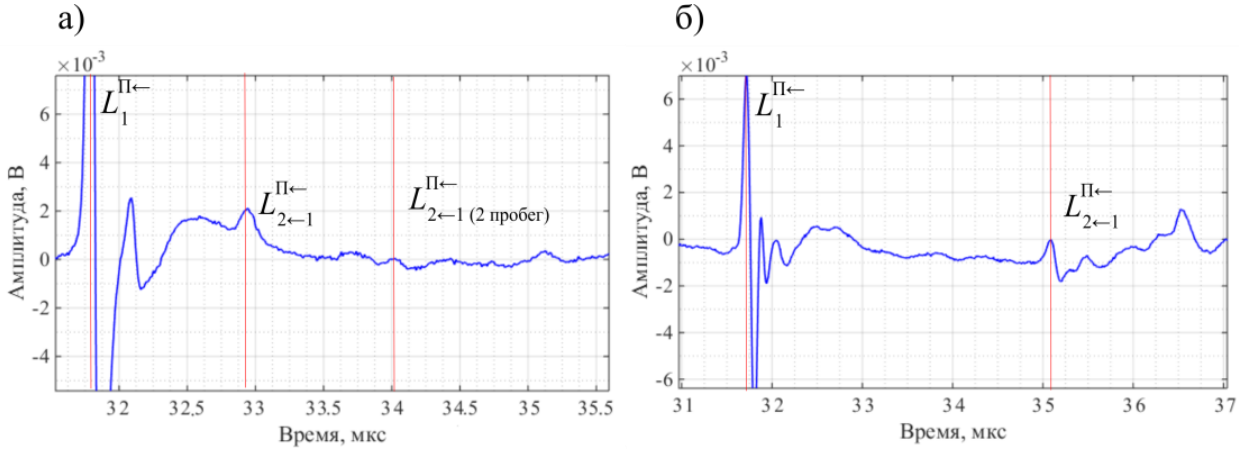


Рисунок 4.19 – Дополнительная обработка временных форм сигналов для улучшения качества регистрации импульса сдвиговой волны при исследовании образца аргиллита 4_Arg_3

Аналогичные результаты были получены при исследовании образцов известняка группы № 5. Для всех образцов, имеющих толщину менее 3,00 мм, были зарегистрированы полезные импульсы сдвиговых волн. Пример временной формы для образца 5_Izv_2 толщиной 1,60 мм приведен на рис. 4.20, а. Отчетливые временные формы были получены также для образцов, имеющих толщину от 3,00 до 6,00 мм. Пример временной формы для образца 5_Izv_15 толщиной 4,95 мм приведен на рис. 4.20, б.



а) Образец 5_Izv_2 толщиной 1,60 мм; б) Образец 5_Izv_15 толщиной 4,95 мм
Рисунок 4.20 – Примеры временных форм сигналов, полученные при исследовании образцов известняка группы № 5

Для образцов от 6,00 до 7,05 мм удалось зарегистрировать импульсы сдвиговой волны $L_{2\to1}^{П\leftarrow}$ с помощью выполнения процедуры дополнительной обработки. Один из результатов приведен на рис. 4.21, полученный при исследовании образца 5_Izv_17 толщиной 7,15 мм.

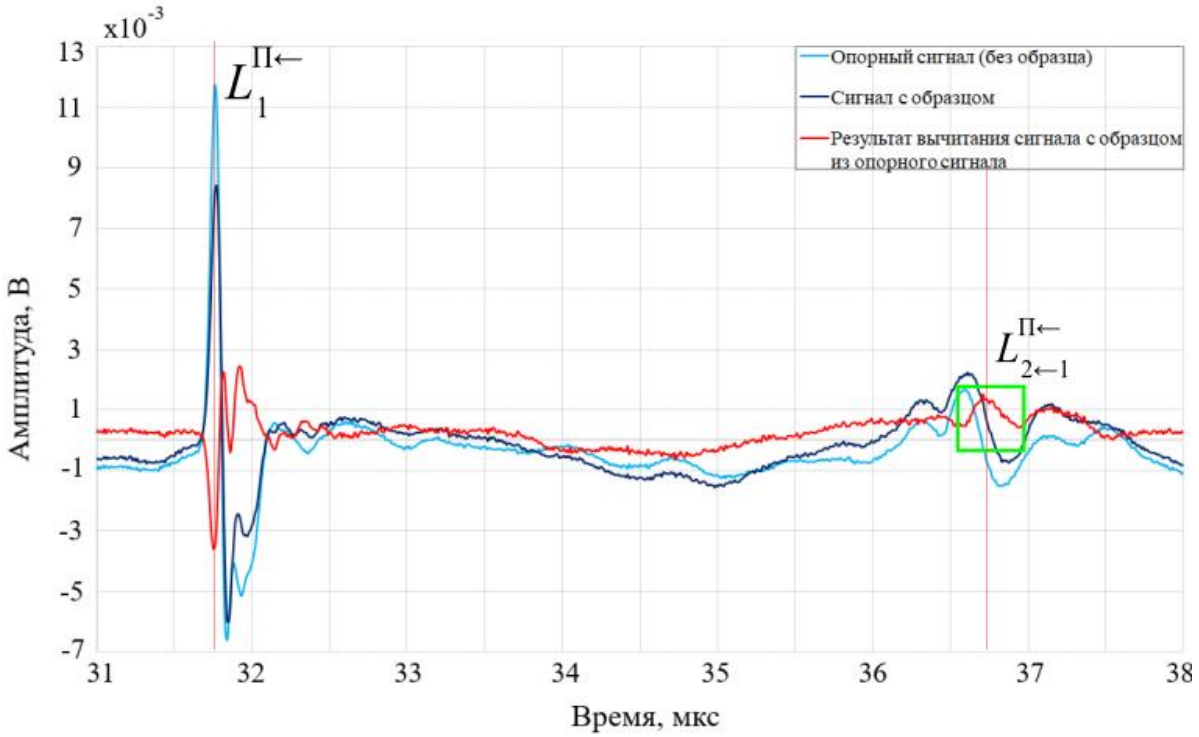


Рисунок 4.21 – Дополнительная обработка временных форм сигналов для улучшения качества регистрации импульса сдвиговой волны при исследовании образца аргиллита базальта 5_Izv_17

4.4 Результаты расчета скоростей распространения сдвиговых волн с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01

Скорости распространения сдвиговых волн рассчитывались по формулам (3.2) и (3.3) в зависимости от отсутствия/наличия на временной форме сигналов второго отражения сдвиговой волны от тыльной поверхности образцов. На рис. 4.22 приведены значения скоростей распространения сдвиговых волн, определенные в описанных выше образцах горных пород с помощью классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01.

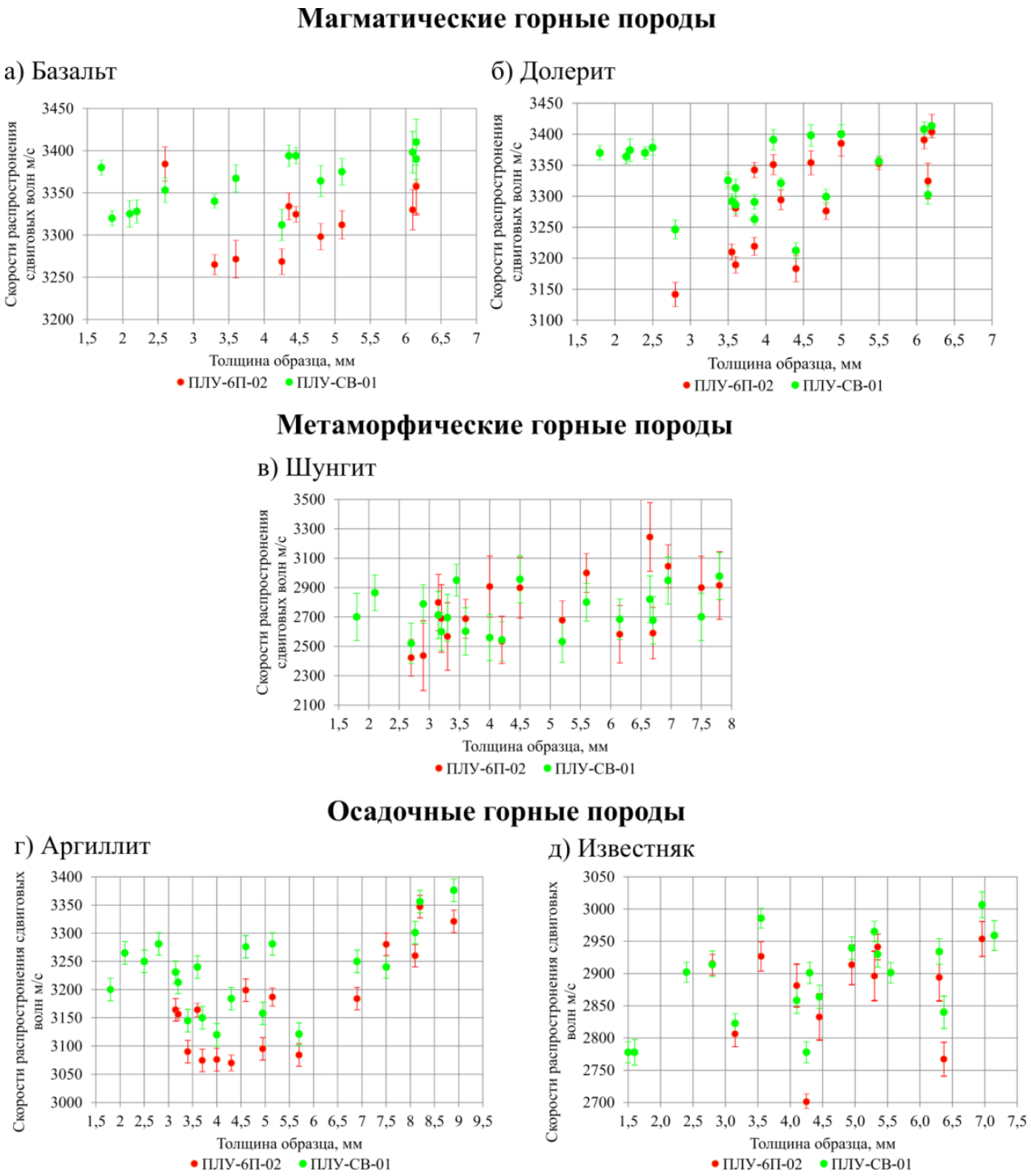


Рисунок 4.22 – Результаты расчёта скоростей распространения сдвиговых волн с помощью классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01

В табл. 4.3 приведены результаты математической обработки рассчитанных скоростей распространения сдвиговых волн.

Таблица 4.3 – Результаты математической обработки рассчитанных скоростей распространения сдвиговых волн, полученных с помощью классической методики (преобразователь продольных волн ПЛУ-6П-02) и с помощью разработанного преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Базальт		
	ПЛУ-6П-02	ПЛУ-СВ-01
Среднее значение, м/с	3318	3363
Минимальное значение, м/с	3265	3312
Максимальное значение, м/с	3384	3410
Медиана, м/с	3324	3367
Размах, м/с	119	98
Стандартное отклонение, м/с	40	33
Коэффициент вариации, %	1,20	0,97
Коэффициент осцилляции, м/с	3,59	2,91
Диапазон скоростей относительно медианы	3324±40	3367±33
Долерит		
	ПЛУ-6П-02	ПЛУ-СВ-01
Среднее значение, м/с	3283	3335
Минимальное значение, м/с	3142	3212
Максимальное значение, м/с	3404	3413
Медиана, м/с	3303	3341
Размах, м/с	262	201
Стандартное отклонение, м/с	89	57
Коэффициент вариации, %	2,71	1,70
Коэффициент осцилляции, м/с	7,98	6,03
Диапазон скоростей относительно медианы	3303±89	3341±57
Шунгит		
	ПЛУ-6П-02	ПЛУ-СВ-01
Среднее значение, м/с	2759	2732
Минимальное значение, м/с	2423	2521
Максимальное значение, м/с	3245	2978
Медиана, м/с	2690	2701
Размах, м/с	822	457
Стандартное отклонение, м/с	230	151
Коэффициент вариации, %	8,32	5,51
Коэффициент осцилляции, м/с	29,78	16,74
Диапазон скоростей относительно медианы	2690±230	2701±151

Продолжение таблицы 4.3.

Аргиллит		
	ПЛУ-6П-02	ПЛУ-СВ-01
Среднее значение, м/с	3172	3232
Минимальное значение, м/с	3070	3120
Максимальное значение, м/с	3347	3376
Медиана, м/с	3164	3240
Размах, м/с	277	256
Стандартное отклонение, м/с	91	72
Коэффициент вариации, %	2,86	2,22
Коэффициент осцилляции, м/с	8,73	7,92
Диапазон скоростей относительно медианы	3164±91	3240±72
Известняк		
	ПЛУ-6П-02	ПЛУ-СВ-01
Среднее значение, м/с	2869	2892
Минимальное значение, м/с	2701	2778
Максимальное значение, м/с	2954	3006
Медиана, м/с	2895	2902
Размах, м/с	253	229
Стандартное отклонение, м/с	77	67
Коэффициент вариации, %	2,68	2,33
Коэффициент осцилляции, м/с	8,80	7,91
Диапазон скоростей относительно медианы	2895±77	2902±67

Как видно из табл. 4.3, при измерении скоростей сдвиговых волн с использованием разработанного преобразователя разброс в значениях последних уменьшился, а также уменьшились стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции.

Кроме этого, для всех образцов горных пород различных генотипов толщиной менее 3,00 мм удалось рассчитать скорости распространения сдвиговых волн благодаря получению с помощью разработанного преобразователя качественных временных форм сигналов.

Из рис. 4.22 видно, что значения скоростей сдвиговых волн, полученных при использовании разработанного преобразователя, больше в среднем на 50 – 70 м/с, чем при использовании классической методики. Это можно объяснить тем, что при применении классического лазерно-ультразвукового преобразователя

продольных волн ПЛУ-6П-02 максимум диаграммы направленности возникающих на границе раздела «генератор - образец» сдвиговых волн не строго перпендикулярен к границе, а составляет некоторый достаточно малый угол (порядка 0,2°) с нормалью к поверхности образца. Это означает, что при условной толщине образцов 5,00 мм наблюдается увеличение акустического пути примерно на 60-80 мкм и, соответственно, времени распространения акустического импульса на несколько десятков наносекунд, что и приводит при расчете к уменьшению скорости сдвиговой волны на 50-70 м/с.

Также были уточнены те значения скоростей, которые вызывали сомнение при применении классической методики, благодаря замене призмы из тяжелого флинта на бесцветное оптическое стекло или проведению дополнительной математической обработки сигналов, процедура которой описана в подразделе 4.3.2.

4.5 Построение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты) исследуемых образцов горных пород

Были установлены границы частотных диапазонов и размеров образцов, при которых значения фазовых и групповых скоростей, измеряемых разработанным широкополосным преобразователем ультразвуковых импульсов сдвиговых волн, будут отличаться менее чем на 1 %. Определение фазовых скоростей сдвиговых волн проводилось в соответствии с алгоритмом, приведенным в разделе 3.4 диссертационной работы. Образцы каждого типа горных пород были разделены на три группы в зависимости от их толщины: 1) до 3,00 мм; 2) от 3,00 до 6,00 мм; 3) более 6,00 мм.

На рис. 4.23 – 4.25 приведены примеры построенных дисперсионных кривых образцов горных пород для каждой из выше обозначенных групп толщин.

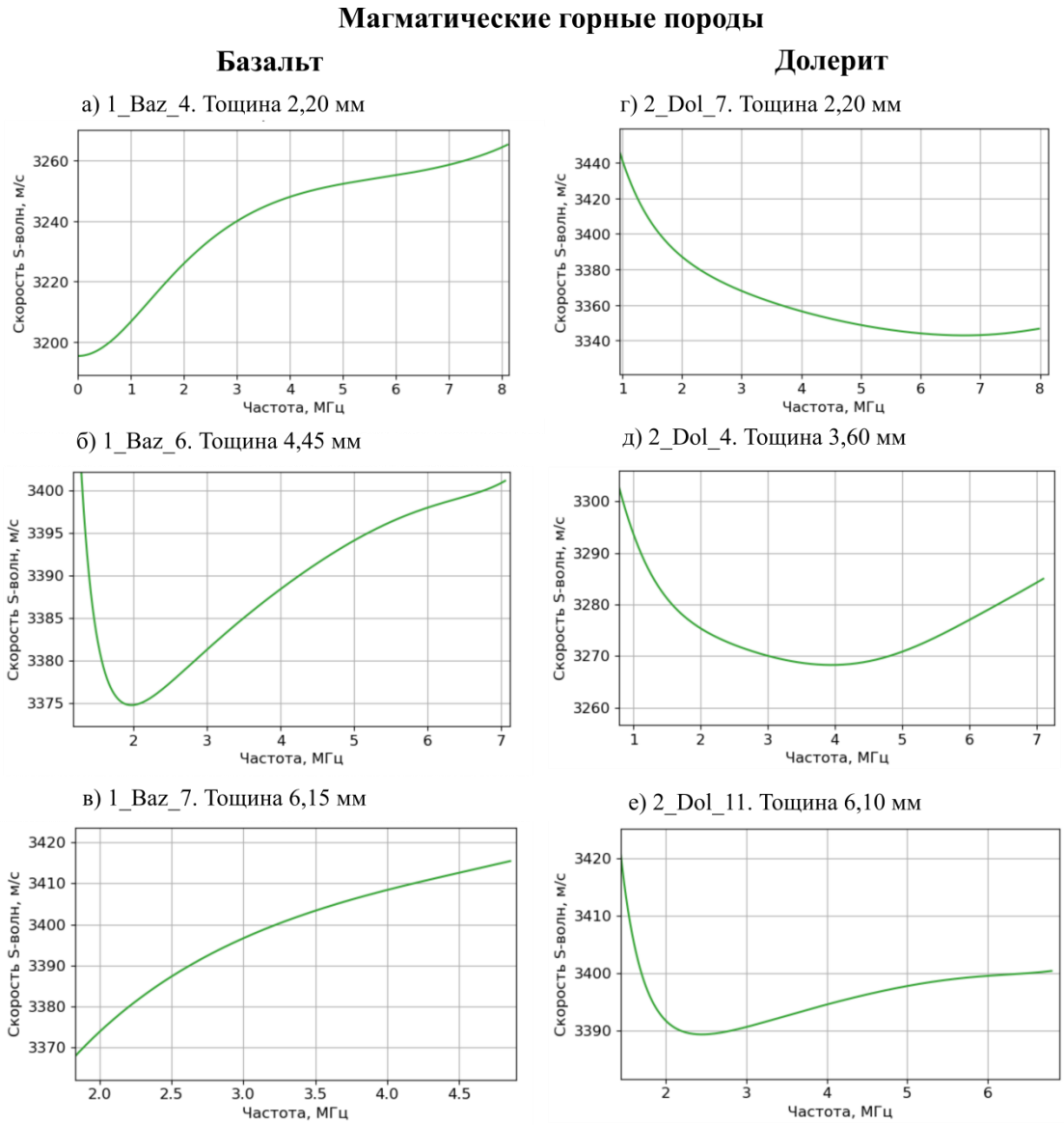


Рисунок 4.23 – Дисперсионные кривые образцов базальта и долерита

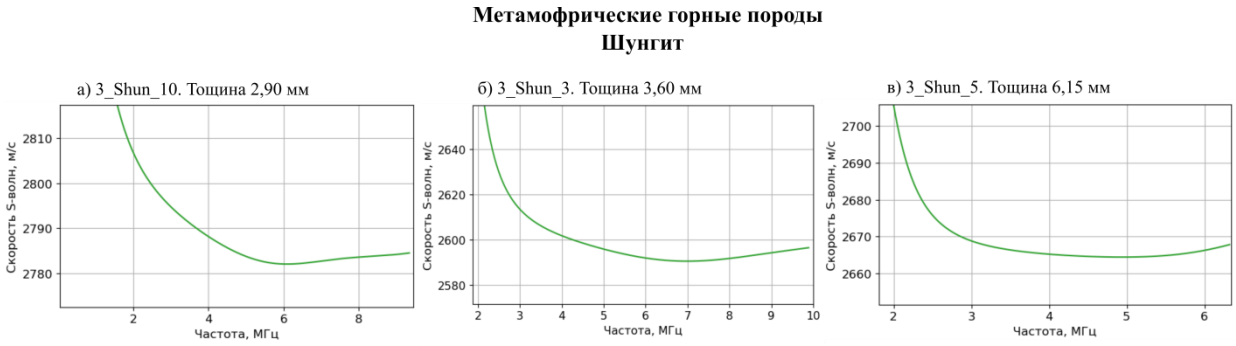


Рисунок 4.24 – Дисперсионные кривые образцов шунгита

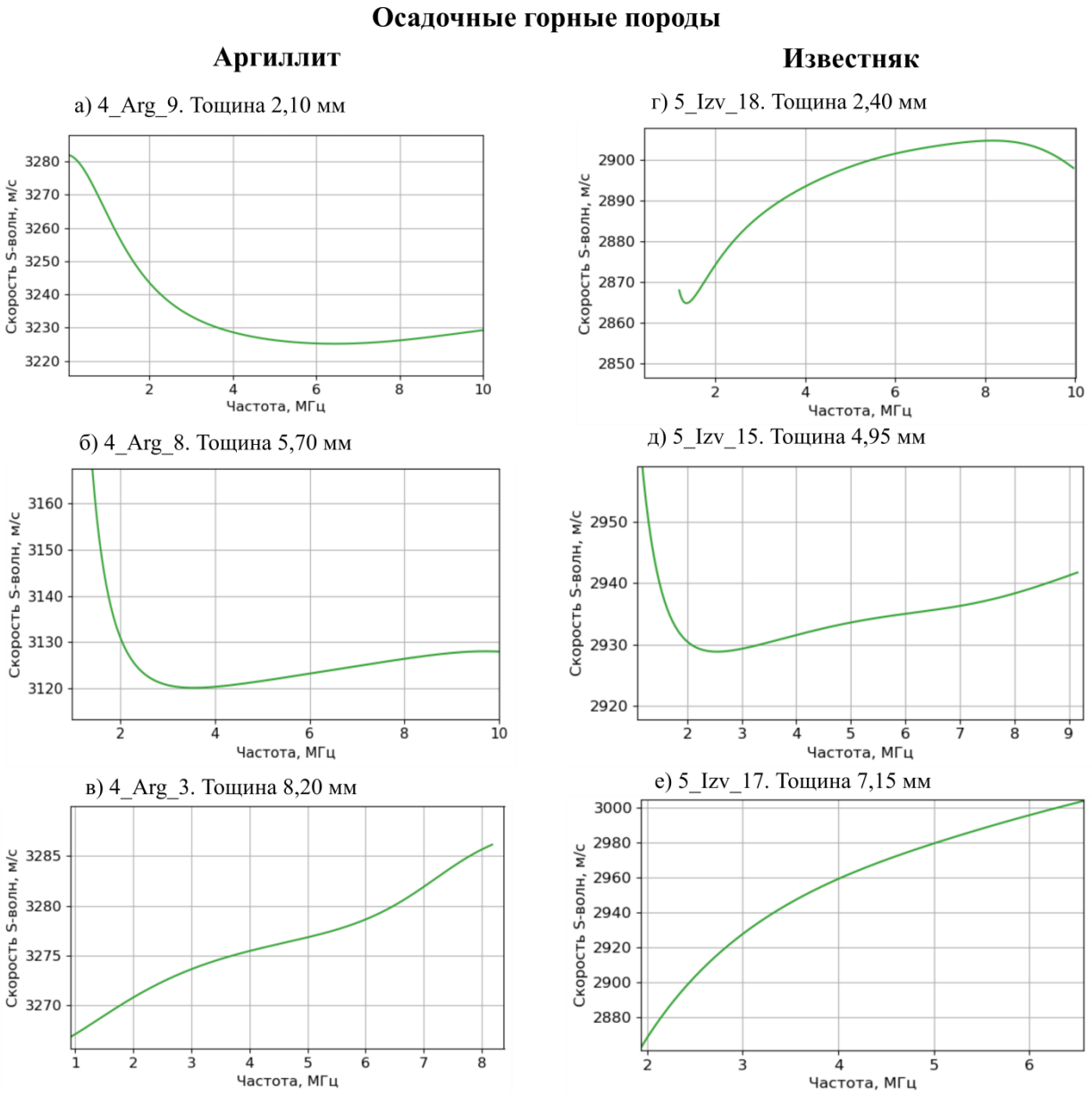


Рисунок 4.25 – Дисперсионные кривые образцов аргиллита и известняка

В табл. 4.4 представлены полученные для каждой группы горных пород усредненные частотные диапазоны в зависимости от толщины образцов.

Таблица 4.4 – Частотные диапазоны в зависимости от типа горной породы и толщины исследуемых образцов, при которых значения фазовых и групповых скоростей отличаются менее чем на 1 %

	До 3,00 мм	От 3,00 до 6,00 мм	От 6,00 до 8,50 мм
Базальт	0,6 – 8,15 МГц	1,15 – 6,5 МГц	1,5 – 4,7 МГц
Долерит	0,9 – 8,2 МГц	1,1 – 6,7 МГц	1,15 – 6,95 МГц
Шунгит	1,5 – 8,85 МГц	2,0 – 8,5 МГц	2,1 – 6,15 МГц
Антрацит	0,1 – 10,0 МГц	1,15 – 8,3 МГц	1,35 – 8,1 МГц
Известняк	0,9 – 9,1 МГц	1,0 – 8,5 МГц	1,52 – 6,4 МГц

Из табл. 4.4. следует вывод, что при исследовании магматических горных пород (базальтов и долеритов) выделяются следующие частотные диапазоны, при которых значения фазовых и групповых скоростей различны менее чем на 1 %: при толщине менее 3,00 мм - в частотном диапазоне 0,75 – 8,15 МГц; от 3,00 до 6,00 мм - в частотном диапазоне 1,1 – 6,6 МГц; от 6,00 до 8,50 мм - в частотном диапазоне 1,3 – 5,8 МГц.

На образцах шунгита были получены следующие частотные диапазоны, при которых значения фазовых и групповых скоростей различны менее чем на 1 %: при толщине менее 3,00 мм - в частотном диапазоне 1,5 – 8,85 МГц; от 3,00 до 6,00 мм - в частотном диапазоне 2,0 – 8,5 МГц; от 6,00 до 8,50 мм - в частотном диапазоне 2,1 – 6,15 МГц.

При исследовании осадочных горных пород (аргиллит, известняк) получены следующие частотные диапазоны, при которых значения фазовых и групповых скоростей различны менее чем на 1 %: при толщине менее 3,00 мм - в частотном диапазоне 0,9 – 9,5 МГц; от 3,00 до 6,00 мм - в частотном диапазоне 1,1 – 8,4 МГц; от 6,00 до 8,50 мм - в частотном диапазоне 1,43 – 7,25 МГц.

Резюмируя полученные результаты и усредняя частотные диапазоны по толщинам, можно сделать вывод о том, что для рассматриваемых в настоящей диссертации образцов горных пород значения фазовых и групповых скоростей отличаются менее чем на 1 % при толщинах образцов рассматриваемых горных пород: менее 3,00 мм - в частотном диапазоне 0,8 – 8,85 МГц; от 3,00 до 6,00 мм - в частотном диапазоне 1,3 – 7,7 МГц; от 6,00 до 8,50 мм - в частотном диапазоне 1,6 – 6,5 МГц.

4.6 Анализ результатов сравнения динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона образцов горных пород, рассчитанных на основе применения классической методики и разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01

Для расчёта упругих свойств были использованы следующие формулы:

$$E = \rho V_S^2 (3 - \frac{1}{\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 1}) \quad (4.2)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 2}{2(\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 1)} \quad (4.3)$$

$$G = \rho V_S^2 \quad (4.4)$$

где E – динамический модуль упругости, ГПа; μ – коэффициент Пуассона; G – динамический модуль сдвига, ГПа; ρ – плотность горной породы, кг/м^3.

Проведено сравнение результатов расчетов, полученных на основе применения классической методики и с помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01: в первом случае использовалась скорость сдвиговой волны, полученная с помощью ПЛУ-6П-02, во втором – с помощью разработанного ПЛУ-СВ-01.

Математическая обработка полученных результатов для каждой горной породы приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты математической обработки рассчитанных динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона

Базальт						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	E_1, ГПа	G_1, ГПа	μ_1	E_2, ГПа	G_2, ГПа	μ_2
Среднее значение, ГПа	81,08	31,44	0,29	83,48	32,63	0,28
Медиана, ГПа	81,09	31,49	0,29	84,04	32,76	0,28
Размах, ГПа	7,34	3,14	0,04	5,07	2,19	0,03
СКО, ГПа	2,23	0,98	0,01	1,71	0,72	0,01
Коэффициент вариации, %	2,75	3,10	3,95	2,05	2,20	3,77
Коэффициент осцилляции, %	9,05	9,98	13,24	6,07	6,72	11,64
Долерит						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	E_1, ГПа	G_1, ГПа	μ_1	E_2, ГПа	G_2, ГПа	μ_2
Среднее значение, ГПа	81,92	32,26	0,27	83,57	33,06	0,26
Медиана, ГПа	81,96	32,74	0,27	84,18	33,10	0,26
Размах, ГПа	13,50	6,51	0,04	10,22	4,28	0,04

Продолжение таблицы 4.5.

СКО, ГПа	4,88	2,68	0,01	2,97	1,22	0,01
Коэффициент вариации, %	5,74	6,19	4,10	3,56	3,70	3,46
Коэффициент осцилляции, %	16,27	18,09	16,40	12,23	12,96	15,29
Шунгит						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	E_1, ГПа	G_1, ГПа	μ_1	E_2, ГПа	G_2, ГПа	μ_2
Среднее значение, ГПа	41,86	17,00	0,23	40,80	16,47	0,24
Медиана, ГПа	39,30	16,21	0,23	40,29	16,51	0,25
Размах, ГПа	22,58	11,10	0,15	16,31	6,27	0,12
СКО, ГПа	6,85	3,02	0,04	4,73	1,92	0,03
Коэффициент вариации, %	16,35	17,74	16,65	11,60	11,64	14,15
Коэффициент осцилляции, %	53,95	65,29	64,25	35,97	35,07	49,72
Аргиллит						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	E_1, ГПа	G_1, ГПа	μ_1	E_2, ГПа	G_2, ГПа	μ_2
Среднее значение, ГПа	60,90	25,94	0,17	60,50	25,92	0,17
Медиана, ГПа	61,34	25,82	0,18	60,11	25,87	0,17
Размах, ГПа	10,16	4,64	0,05	9,04	4,16	0,04
СКО, ГПа	3,16	1,53	0,02	2,92	1,28	0,01
Коэффициент вариации, %	5,18	5,90	8,62	4,82	4,92	3,93
Коэффициент осцилляции, %	18,68	18,90	30,16	17,91	17,11	20,96
Известняк						
	ПЛУ-6П-02			ПЛУ-СВ-01		
	E_1, ГПа	G_1, ГПа	μ_1	E_2, ГПа	G_2, ГПа	μ_2
Среднее значение, ГПа	49,27	19,34	0,27	49,48	19,50	0,27
Медиана, ГПа	49,87	19,72	0,28	48,76	19,22	0,27
Размах, ГПа	9,15	3,82	0,03	8,71	3,49	0,03
СКО, ГПа	2,85	1,20	0,01	2,70	1,13	0,01
Коэффициент вариации, %	5,79	6,21	3,34	5,46	5,82	3,66
Коэффициент осцилляции, %	18,57	19,77	10,78	17,61	17,90	9,08

Как видно из табл. 4.5, разброс значений динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона, рассчитанных с помощью ПЛУ-СВ-01, уменьшился по сравнению с результатами, полученными с помощью классической методики (преобразователь ПЛУ-6П-02), также уменьшились стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции.

Поскольку с помощью разработанного ПЛУ-СВ-01 удалось измерить скорости распространения сдвиговых волн и в образцах толщиной менее 3,00 мм, и в образцах с сильным затуханием, в которых невозможно было идентифицировать импульс сдвиговой волны классической методикой, то динамические модули упругости и коэффициент Пуассона удалось рассчитать даже для них.

4.7 Модернизация разработанного преобразователя и поиск конструктивных решений для повышения его эргономичности

Поскольку лабораторные исследования с помощью разработанного преобразователя показали перспективность его дальнейшего использования при проведении лазерно-ультразвуковой диагностики, целесообразным являлось повысить его эргономичность. Как было описано в главе 2, преобразователь сдвиговых волн состоит из существующего оптико-акустического преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02, к генератору которого примыкает призма из бесцветного оптического стекла с углами призмы $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ или из тяжелого флинта с углами сторон $\alpha_1 = 59{,}11°, \beta_1 = 28{,}82°$. При данной схеме импульсы продольных волн за счет лазерного излучения возбуждаются в преобразователе ПЛУ-6П-02 и направляются через среду призмы в образец. Следует отметить, что при такой сборке необходимо контролировать акустические контакты на двух границах сред: «генератор-призма» и «призма-образец». Вся конструкция закреплялась в штативе, как показано на рис. 3.5, что осложняло контроль акустического контакта между генератором и призмой. Поэтому было принято решение провести модернизацию преобразователя, а именно, исключить из схемы преобразователь ПЛУ-6П-02, то есть необходимо оснастить преобразователь ПЛУ-СВ-01 собственным генератором и приемником.

Известно, что у лазерно-ультразвуковых преобразователей, имеющих различные конструктивные решения, можно выделить три основных структурных компоненты:

1) Систему доставки лазерного излучения;

2) Оптико-акустические генераторы и широкополосные пьезоприемники;

3) Систему подачи электрических сигналов в блок обработки.

В качестве оптико-акустического генератора была применена плоскопараллельная пластина сине-зеленого стекла СЗС-22. Как было описано в [126], применение данного материала позволяет возбуждать мощные широкополосные акустические импульсы, способные распространяться в горных породах. Перед генератором расположена нагрузка, выполненная из стекла, через которую проходило лазерное излучение. Нагрузка была необходима для обеспечения прохождения лазерного импульса через СЗС-22. В случае ее отсутствия происходило бы отражение от свободной границы СЗС-22.

Широкополосный акустический приемник был выполнен из ПВДФ-пленки (пленка на основе полиэтилена высокого давления) толщиной 50 мкм, обеспечивающий регистрацию полезных импульсов полосой частот 0,1 – 16 МГц. Приемник электродами соединяется с передающей платой усилителя импульсов, которая оснащена BNC-разъемом для передачи сигналов в блок обработки сигналов дефектоскопа УДЛ-2М. Составные элементы преобразователя приведены на рис. 4.26.

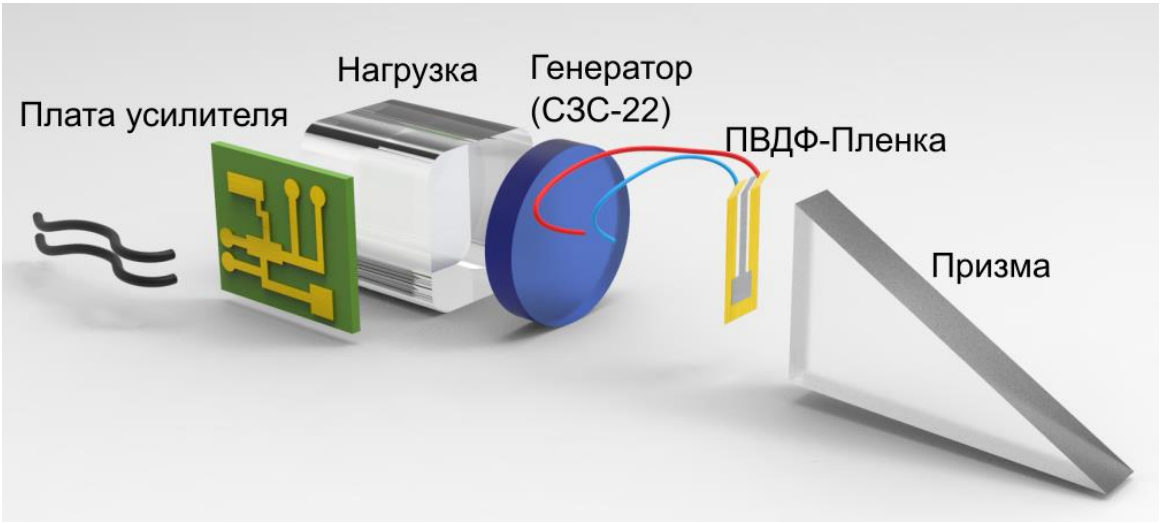
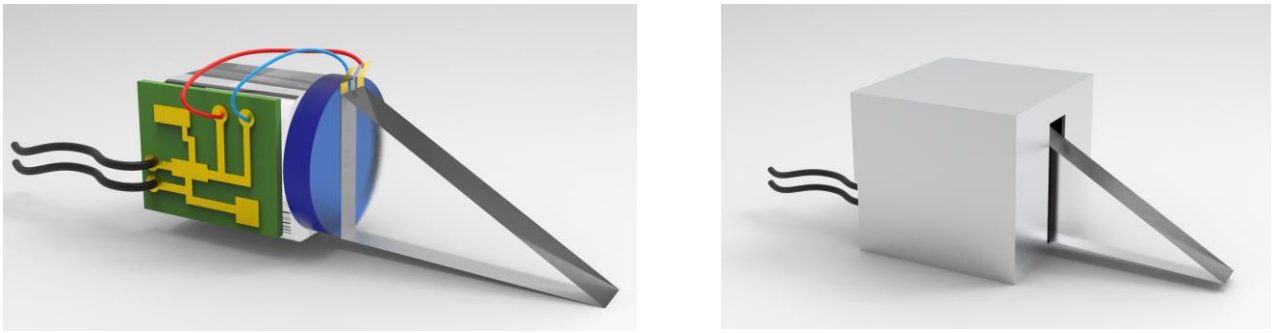


Рисунок 4.26 – Составные элементы преобразователя сдвиговых волн

Далее все составные элементы, приведенные на рис. 4.26, были склеены между собой с помощью эпоксидной смолы для обеспечения жесткого контакта. В процессе склейки важно было не допустить образования воздушных пузырьков, которые могут повлиять на распространение ультразвуковых импульсов. Собранная схема была помещена в металлический корпус, выполняющий функцию заземления. 3D-модель и фотография модернизированного преобразователя сдвиговых волн, которому был присвоен шифр – ПЛУ-СВ-02 – «Преобразователь Лазерно-Ультразвуковой – Сдвиговые Волны – Версия №2», приведены на рис. 4.27 и 4.28.

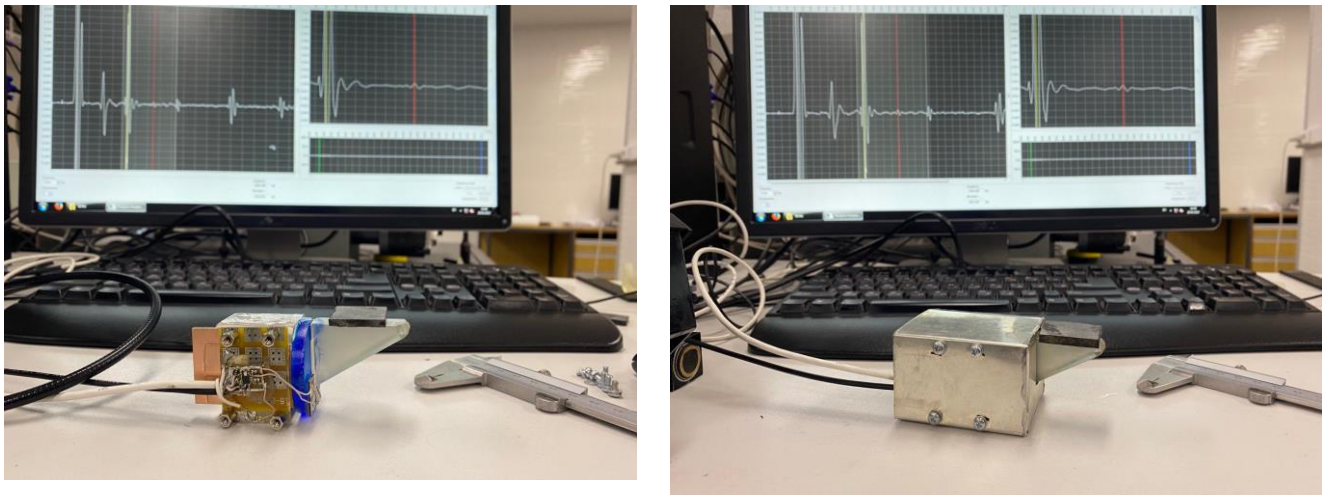
а) б)



а) Модель преобразователя ПЛУ-СВ-02 в сборке; б) Преобразователь ПЛУ-СВ-02 в металлическом корпусе

Рисунок 4.27 – 3D-модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-02

а) б)



а) Преобразователь ПЛУ-СВ-02 в сборке; б) Преобразователь ПЛУ-СВ-02 в металлическом корпусе

Рисунок 4.28 – Фотография преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-02

Выводы

Основными результатами четвертой главы таковы:

- С помощью разработанного преобразователя ПЛУ-СВ-01 возможно проводить измерения скоростей сдвиговых волн на рассматриваемых образцах горных пород толщиной менее 3,00 мм, что невозможно сделать с использованием стандартного преобразователя ПЛУ-6П-02 и классической методики вследствие наложения импульсов сдвиговых и продольных волн;
- На всех исследованных образцах горных толщиной менее 3,00 мм вне зависимости от генотипа удалось зарегистрировать первое и второе отражения сдвиговой волны от тыльной поверхности образцов;
- Установлена возможность регистрировать достаточно отчетливые импульсы первого отражения сдвиговых волн от тыльной поверхности на всех рассматриваемых образцах горных пород толщиной от 3,00 до 6,00 мм;
- Для получения полезных импульсов сдвиговых волн при исследованиях образцов горных пород толщиной от 6,00 до 8,00 мм необходимо использовать призму из бесцветного оптического стекла или проводить дополнительную обработку сигналов, алгоритм которой изложен в подразделе 4.3.2;
- При измерении скоростей сдвиговых волн с использованием разработанного преобразователя по сравнению с классической методикой разброс в значениях уменьшился, а также уменьшились стандартное отклонение, коэффициенты вариации и осцилляции;
- Выявлены частотные диапазоны преобразователя ПЛУ-СВ-01, в котором при различных толщинах образцов значения фазовых скоростей распространения сдвиговых волн отличны от групповых менее чем на 1 %;
- Вследствие уменьшения разброса значений скоростей распространения сдвиговых волн разброс значений динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона, рассчитанных с помощью ПЛУ-СВ-01,

уменьшился по сравнению с результатами, полученными с помощью классической методики;

– Выполнена модернизация разработанного преобразователя и предложены конструктивные решения для повышения его эргономичности.

Полученные результаты подтверждают третье научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи разработки метода генерации широкополосных лазерно-ультразвуковых импульсов сдвиговых волн с целью осуществления прецизионного расчета скоростей данного типа волн в образцах горных пород, что имеет существенное значение для правильного определения динамических упругих параметров горных пород.

Основные научные и практические результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1) Проведены анализ и систематизация отечественного и зарубежного опыта по созданию преобразователей сдвиговых волн;

2) В программном пакете COMSOL Multiphysics выполнено компьютерное моделирование процесса распространения широкополосных импульсов продольной упругой волны в среде преобразователя и полной ее трансформации в сдвиговую на границе «изотропное твердое тело – воздух»;

3) На основе результатов численных расчетов и компьютерного моделирования спроектирован и изготовлен лазерно-ультразвуковой преобразователь широкополосных импульсов сдвиговых упругих волн, проведена апробация его работы на модельных образцах стекла, нержавеющей стали и алюминия;

4) Построены дисперсионные кривые зависимости фазовых скоростей от частоты в исследованных модельных образцах. Определен частотный диапазон работы преобразователя, при котором значения фазовых и групповых скоростей совпадают;

5) Выявлены ограничения в работе классического лазерно-ультразвукового преобразователя продольных волн при исследовании образцов горных пород;

6) Выполнена серия измерений распространения скоростей сдвиговых волн в образцах горных пород различного генотипа с помощью разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн;

7) Определены частотные диапазоны работы разработанного преобразователя при исследовании горных пород различной толщины, при котором значения фазовых и групповых скоростей различаются менее чем на 1 %;

8) Определены значения динамических модулей упругости и коэффициента Пуассона для исследованных горных пород;

9) Выполнена модернизация разработанного преобразователя и предложены конструктивные решения для повышения его эргономичности.

Полученные результаты показывают перспективность комплексирования измерений с помощью классических методов ЛУД и разработанного широкополосного преобразователя сдвиговых упругих волн при исследовании гетерогенных материалов.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. *Иванов П. Н.*, Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021, № 4-1, с. 26-40. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_26.

2. *Иванов П.* Н. Разработка широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн и его апробация на изотропных материалах и образцах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023, № 4, с. 35–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_35.

В изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus:

3. Shibaev I.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Zarubin V.P., *Ivanov P.N.* Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser

ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, Volume 9, Issue 9, pp. 84-92.

4. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin, D., *Ivanov P*, Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone // Remote Sensing12 (24). – 2020 г., статья № 4036, pp. 1-14 DOI: 10.3390/rs12244036.

5. Blokhin D.I., *Ivanov P.N.*, Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation // Journal of Mining Institute. – 2021, 247(1), pp. 3–11. DOI:10.31897/PMI.2021.1.1.

В прочих изданиях:

6. *Иванов П.Н.* Прецизионное измерение скоростей распространения сдвиговых волн в изотропных материалах и образцах горных пород на основе лазерно-ультразвуковой диагностики // Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика. Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции (30 мая 2023 г., г. Уфа) – 2023, Ч.1, с. 123-129.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бауков Ю.Н. Горная геофизика. Сейсмические методы в горной геофизике: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГГУ, 2000.
2. Геофизика: учебник / Под. Ред. В. К. Хмелевского. – 2-е изд. – М.: КДУ, 2009. – 320 с.
3. Иванов М.К., Бурлин Ю.К., Калмыков Г.А., Карнюшина Е.Е., Коробова Н.И. Петрофизические методы исследования кернового материала. (Терригенные отложения). Учебное пособие в 2-х книгах. Кн. 1. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 112 стр.
4. А. К. Битнер, Е. В. Прокатень. Методы исследования пород-коллекторов и флюидов: Учебное пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. – 224 с.
5. Lama R.D., Vutukuri V.S. Handbook on mechanical properties of rocks: Testing techniques andresults, Volume II. − Trans tech publications, 1974. −481 p.
6. Lama R.D., Vutukuri V.S. Handbook on mechanical properties of rocks: Testing techniques andresults, Volume III. − Trans tech publications, 1974. −406 p.
7. Жуков В.С. Лабораторное моделирование снижения пластового давления при разработке месторождений нефти и газа // Бурение & нефть. – 2006, №1, с. 8 – 9.
8. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. - М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 262 с.
9. Мец Ю.С. Исследование влияния взрывных нагрузок различной интенсивности на сопротивляемость механическому разрушению крепких магнетитовых кварцитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1982, № 3, с. 58 – 61.
10. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Салов Б.Г. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. - М.: Изд-во «Наука», 1991, с.156 – 162.
11. Bérest P., Bergues, J., Brouard B., Durup J.G., Guerber B. A. Salt cavern abandonment test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2001, Volume 38, pp. 357-368. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00004-1.
12. Ma H.L., Yang C.H., Li Y.P., Shi X.L., Liu J.F., Wang T.T. Stability evaluation of the underground gas storage in rock salts based on new partitions of the surrounding rock // Environmental Earth Sciences. – 2015, Volume 73, pp. 6911–6925. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4019-1.
13. Schulze O., Popp T., Kern H. Development of damage and permeability in deforming rock salt // Engineering Geology. – 2001, Volume 61, pp. 163–180.
14. Yang C.H., Daemen J.J.K., Yin J.H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1999, Volume 36, pp. 233–242. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00187-9
15. Руководство пользователя. Fidesys. Интернет-ресурс. URL: https://cae-fidesys.com/documentations, дата обращения 17.05.2023.

16. Пособие по расчётам. Midas GTS NX. Интернет-ресурс. URL: http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65, дата обращения 08.06.2023.
17. Guide Ansys. Интернет-ресурс. URL: https://www.ansys.com/, дата обращения 08.06.2023.
18. Научное пособие. Plaxis CE V20. ООО «НИП-Информатика». Интернет-ресурс. URL: https://www.plaxis.ru/support/manual_supplement/, дата обращения 20.01.2023.
19. Edwin T. Brown. Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods // Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. – 1981, p. 211.
20. E. Lloyd, M.G. Hall. Application of scanning electron microscopy to the study of deformed rocks // Tectonophysics – 1981, Volume 78, Issues 1–4, pp. 687-698. https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90037-8.
21. V. A. Kuzmin, N. A. Skibitskaya, Use of scanning electron microscopy for the classification of rocks of oil and gas reservoirs // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2017, Volume 11, pp.160–166. DOI:10.1134/S1027451016050542.
22. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ul'yanenkov A.G. The scanning electronic microscopy and the X-ray spectral microanalysis in examples of practical application // Tekhnosfera. – 2009, 208 p.
23. Pratama Istiadi Guntoro, Yousef Ghorbani, Pierre-Henri Koch and Jan Rosenkranz, X-ray Microcomputed Tomography (μCT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods // Minerals. – 2019, Volume 9, p. 183. doi:10.3390/min9030183.
24. Галунин А. А., Степанов Г. Д., Безруков В. И., Свобода П., Кравцов А. Н. Исследование внутренней структуры образцов диабаза с помощью оптико-акустической и компьютерной рентгеновской томографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021, № 4-1, с. 16—25. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.
25. Madadi M., Jones A.C., Arns C.H., Knackstedt M.A. 3D Imaging and Simulation of Elastic Properties of Porous Materials // Computing in Science and Engineering – 2009, Volume 11, Issue 4, pp. 65–73. DOI:10.1109/MCSE.2009.110.
26. E. Grinzato, S. Marinetti, P.G. Bison, M. Concas, S. Fais. Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones // Infrared Physics & Technology. – 2004, Volume 46, Issues 1-2, pp. 63-68 https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.009.
27. Blokhin D.I., *Ivanov P.N.*, Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation // Journal of Mining Institute. – 2021, 247(1), pp. 3–11. DOI:10.31897/PMI.2021.1.1.
28. Arman H, Paramban S. Correlating natural, dry, and saturated ultrasonic pulse velocities with the mechanical properties of rock for various sample diameters // Applied Sciences. – 2020, 10(24):9134. https://doi.org/10.3390/app10249134.

29. Kahraman S., Soylemez M., Fener M. Determination of fracture depth of rock blocks from p-wave velocity // Bulletin of Engineering Geology and the Environment – 2008, 67, pp. 11–16. DOI:10.1007/s10064-007-0110-5.
30. E. Tudisco, M. Etxegarai, S. A. Hall, E.-M. Charalampidou, G. D. Couples, H. Lewis, A. Tengattini, N. Kardjilov. Fast 4-D Imaging of Fluid Flow in Rock by High-Speed Neutron Tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2019, Volume124, Issue 4. Pp. 3557-3569. https://doi.org/10.1029/2018JB016522.
31. Дарьин А. В., Ракшун Я. В. Методика выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 // Научный вестник НГТУ – 2013- №2(31) с.112.
32. В.А. Вавилин, А.А. Кунакасов, Т.Р. Галиев, Е.В. Сорокина. Эффективность применения метода ядерно-магнитного резонанса при лабораторных петрофизических исследованиях керна и шлама. // Нефтяное хозяйство. – 2011, №8, с. 21- 23.
33. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Morozov D.V., Shibaev I.A. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiberreinforced plastics // Key Engineering Materials. – 2017, Volume 722, pp. 267—272 DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.722.267.
34. Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б., Теоретическая оценка параметров ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в геоматериалах лазерным излучением, ФТПРПИ, — 2003, № 4, с. 11-18.
35. Пашкин А. И., Винников В. А., Черепецкая Е. Б. Метод определения внутренней структуры геосреды с использованием ABCD -матриц в теневом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022, № 8, с. 14–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_14.
36. Кравцов А., *Иванов П. Н*., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Гапеев А. А. Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковойспектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019, № 6, с. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.
37. Винников В. А., Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б. Исследование структуры и упругих свойств геоматериалов с помощью контактной широкополосной ультразвуковой структуроскопии // Горный журнал. – 2017, № 4. с. 29—32. 10.17580/gzh.2017.04.05.
38. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. – 2016, № 5, с. 48 – 53.
39. E.A. Eissa, A. Kazi. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &

Geomechanics Abstracts. – 1988, Volume 25, Issue 6, pp. 479-482 https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)90987-4.
40. Ali Shakouri, Oveis Farzay, Mohsen Masihi, M. H. Ghazanfari, A. M. Al-Ajmi. An experimental investigation of dynamic elastic moduli and acoustic velocities in heterogeneous carbonate oil reservoirs. SN Applied Sciences // Volume, Issue 9, № 1023. DOI:10.1007/s42452-019-1010-6.
41. J. Martínez-Martínez, D. Benavente, M. A. García-del-Cura. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2011, Volume 71, pp. 263-268. DOI:10.1007/s10064-011-0399-y.
42. Шибаев И.А., Винников В.А., Степанов Г.Д. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020, №7, с. 125–134, DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.
43. *Иванов П. Н.*, Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021, № 4-1, с. 26—40. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_26.
44. M. R. J. Wyllie, G. H. F. Gardner, A. R. Gregory. Studies of elastic wave attenuation in porous media // Geophysics. – 1962, Volume 27, Issue 5, pp. 569-589 https://doi.org/10.1190/1.1439063.
45. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing inlimestone // Remote Sensing. – 2020, Volume 12, № 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.
46. J.M. Carcione, K. Helbig, H.B. Helle. Effects of pressure and saturating fluid on wave velocity and attenuation in anisotropic rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003, Volume 40, Issue 3, pp. 389-403 https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00016-9.
47. Byun J. H., Lee J. S., Park K., Yoon H. K. Prediction of crack density in porous-cracked rocks from elastic wave velocities // Journal of Applied Geophysics. – 2015, Volime 115, № 2, pp. 110—119. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.020.
48. Heng Zhang, Fanchang Zhang, Yawei Lu Frequency-dependent energy attenuation and velocity dispersion in periodic layered media // Acta Geophysica. – 2019, Volume 67, pp. 799—811. DOI: 10.1007/s11600-019-00294-2.
49. Бреховских Л.М., Иванов И.Д. Об одном особом виде затухания при распространении волн в слоисто-неоднородных средах // Акустический журнал. – 1955, 1, выпуск 1, с. 23-30.
50. O'connell, R.J., Budiansky, B. Seismic veloctities in dry and saturated cracked solid // Journal of Geophysical Research. – 1974, Volume 79, pp. 5412–5425. https://doi.org/10.1029/JB079i035p05412.

51. Budiansky, B., O'connell, R.J. Elastic moduli of a cracked solid // International Journal of Solids and Structures. – 1976, Volume 12, Issue 2, pp. 81–97. https://doi.org/10.1016/0020-7683(76)90044-5.
52. Bellanger, M., Remy, J.M., Homand, F. Ultrasonic wave attenuation as a tool for estimating frost action on limestone rocks // Materials and Structures. – 1996, Volume 29, pp. 552–561.
53. Falls, S.D., Young, R.P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock // Tectonophysics. – 1998, Volume 289, Issue 1-3, pp, 1–15. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00303-X.
54. Q. Dong, X. P. Li, H. Zhao. Experimental research on ultrasonic P-wave velocity variation of fractured rock mass under different stress paths // Advanced Materials Research. – 2014. Volume 1069, pp. 35–39. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.35.
55. O. Uyanık, N. Sabbag, N. A. Uyanık. Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019, Volume 78, № 8, pp. 6003–6016. DOI:10.1007/s10064-019-01501-6.
56. M. Heidari, R. Ajalloeian, A. Ghazifard, M. Hashemi Isfahanian. Evaluation of P and S wave velocities and their return energy of rock specimen at various lateral and axial stresses // Geotechnical and Geological Engineering. – 2020. Volume 38, № 3, pp. 3253–3270. DOI:10.1007/s10706-020-01221-9.
57. S. Wenpeng, Y. Qinyong, W. Huiming. Experimental analysis of the influence of coupling methods on rock samples acoustic velocity measurement // Progress in Geophysics. – 2018. Volume 33, № 5, pp. 1951–1955.
58. C. Cerrillo, A. Jiménez , M. Rufo, J. Paniagua, F.T. Pachón. New contributions to granite characterization by ultrasonic testing // Ultrasonics. – 2014, Volume 54, Issue 1, pp. 156-167, https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.06.006.
59. Yang Liu, Lan Qiao, Yuan Li, Guodong Ma, Andrei M. Golosov, Ultrasonic spectrum analysis of granite damage evolution based on dry-coupled ultrasonic monitoring technology // Advances in Civil Engineering. – 2020, Volume 2020, Article ID 8881800, 13 pages https://doi.org/10.1155/2020/8881800.
60. Ai H.R.A., Ahrens T.J. Effects of shock-induced cracks on the ultrasonic velocity and attenuation in granite // Journal of Geophysical Research Solid Earth. – 2007, 112, b01201. https://doi.org/10.1029/2006JB004353.
61. Chaki, S., Takarli, M., Agbodjan, W.P. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions // Construction and Building Materials. – 2008. Volume 22, Issue 7, pp. 1456–1461. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.04.002.
62. Vasconcelos G., Lourenco P.B., Alves C.A.S., Pamplona J. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites // Ultrasonics. – 2008, Volume 48, Issue 5, pp. 453–466. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.03.008.
63. Fengxia Sun, Ying Li, Qiang He, Lei Liu, Zhigang Wang, Chaowen Xu, Yueju Cui, Yi Zhang, Qingjie Gong & Jianguo Du. Sound velocity anomalies of limestone at high pressure and implications for the mantle wedge // High Pressure

Research. – 2022, Volume 42, Issue 4, pp. 336-348, DOI: 10.1080/08957959.2022.2145562.
64. Gonzalez, J., Saldafia, M., Arzua, J. Analytical model for predicting the UCS from P-wave velocity, density, and porosity on saturated limestone // Applied Sciences. – 2019, Volume 9, Issue 3, 5265. https://doi.org/10.3390/app9235265.
65. Ercikdi, B., Karaman, K., Cihangir, F., Yilmaz, T., Aliyazicioglu, S., Kesimal, A. Core size effect on the dry and saturated ultrasonic pulse velocity of limestone samples // Ultrasonics. – 2016, Volume 72, pp. 143–149. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.006.
66. Aldeeky, H., Al Hattamleh, O. Prediction of engineering properties of basalt rock in Jordan using ultrasonic pulse velocity test // Geotechnical and Geological Engineering. – 2018, Volume 36, pp. 3511–3525. DOI:10.1007/s10706-018-0551-6.
67. T. Vanorio, M. Prasad, D. Patella, A. Nur, Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks: correlation with microtexture // Geophysical Journal International. – 2022, Volume 149, Issue 1, pp. 22–36, https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01580.x.
68. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Митрофанов Э. Р. Аппаратурное обеспечение и результаты измерения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в образцах угля при их одноосном механическом нагружении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016, № 11, с. 341 – 348.
69. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С., Эпштейн С.А. Закономерности криотермического разрушения углей по данным спектрального анализа результатов ультразвукового прозвучивания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. № 1. с. 3-12.
70. В. М. Сарнацкий, А. И. Недбай, В. В. Сарнацкий. Высокочастотные широкополосные преобразователи ультразвуковых колебаний // Акустический журнал. – 2009, том 55, №1, с.129-131.
71. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Влияние электрической нагрузки на длительность электрического импульса на пьезоприемнике // Акустический журнал. – 2001, том 47, №6, с. 856-857.
72. Алешин Н.П. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989, 456 с.
73. Каневский И.И. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие / И.И. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
74. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
75. Опыт использования пьезопреобразователя нового типа для контроля литья. Интернет-ресурс.URL: https://www.ndt.com.ua/ru/component/content/article?id=83:kontrol%E2%80%93litya, дата обращения 08.06.2023.

76. Буденков Г.А. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 135 с.
77. Сучков Г.М. О главном преимуществе ЭМА–способа // Дефектоскопия. – 2000, № 10, с. 67.
78. Сучков Г.М. А.В. Донченко, А.В. Десятниченко и др. Повышение чувствительности ЭМА приборов // Дефектоскопия.– 2008, № 2, с. 15–22.
79. Сучков Г.М., Донченко А.В. Реальная чувствительность ЭМА–приборов // Дефектоскопия. – 2007, № 6, с. 43–50.
80. Сучков Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2005, № 12, 23-29.
81. Комаров В.А. Моделирование проявлений электромагнитно–акустического преобразования в металлах I. Преобразование квазистационарного неоднородного электромагнитного поля в упругие сдвиговые колебания // Контроль. Диагностика. — 2013, № 3, с. 17–25.
82. Комаров В.А., Бабкин С.Э. Ильясов Р.С. ЭМА преобразование волн горизонтальной поляризации в магнитоупругих материалах // Дефектоскопия. – 1993, № 2, с. 11–17.
83. Ivan Pelivanov, Takashi Buma, Jinjun Xia, Chen-Wei Wei, Matthew O'Donnell, NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump–probe laser-ultrasound system // Photoacoustics, Volume 2, Issue 2, 2014, Pages 63-74, https://doi.org/10.1016/j.pacs.2014.01.001.
84. A. L. Glazov, K. L. Muratikov. Laser ultrasound imaging of mechanical stresses near holes and indented areas: Experimental results and theoretical model // Journal of Applied Physics. – 2022, Volume 131, Issue 24, 245104. https://doi.org/10.1063/5.0088327.
85. Huabin He, Kaihua Sun, Chaoming Sun, Jianguo He, Enfu Liang, Qian Liu, Suppressing artifacts in the total focusing method using the directivity of laser ultrasound // Photoacoustics. – 2023, Volume 31, 100490, https://doi.org/10.1016/j.pacs.2023.100490.
86. D. Thompson, J.R. Nagel, D.B. Gasteau, S. Manohar. Laser-induced ultrasound transmitters for large-volume ultrasound tomography // Photoacoustics. – 2022, Volume 25, 100312,https://doi.org/10.1016/j.pacs.2021.100312.
87. Bychkov A.S., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Makarov V.A. Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // Laser Physics Letters. – 2016, Volume 13, Issue 8, № 085401 DOI 10.1088/1612-2011/13/8/085401.
88. Черепецкая Е.Б. Разработка лазерного ультразвукового метода диагностики структуры и свойств горных пород на образцах: дис. доктор технических. – М.: МГГУ, 2005. – 266 с.
89. Jakub Spytek, Lukasz Ambrozinski, Ivan Pelivanov. Non-contact detection of ultrasound with light – Review of recent progress // Photoacoustics. – 2023, Volume 29, № 100440. https://doi.org/10.1016/j.pacs.2022.100440.
90. Simpson, Jonathan & Wijk, Kasper & Adam, Ludmila & Smith, Caitlin. Laser ultrasonic measurements to estimate the elastic properties of rock samples under

in situ conditions // Review of Scientific Instruments. – 2019, Volume 90, Issue 11, № 114503. https://doi.org/10.1063/1.5120078.
91. Черепецкая Е. Б., Иньков В. Н. Экспериментальные исследования анизотропии горных пород с помощью аппаратуры лазерного ультразвукового структуроскопа «Геоскан-02М» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. №1, с. 53-55.
92. Ян Прушка, Кравцов А., Сас И. Е., Черепецкая Е. Б., Виего Жозе Викторина, Борисов Н. Г. Образование дефектов в синтетических кристаллах кварца при однососном сжатии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021, № 4-1, с. 73—80. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_73.
93. Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A., Mironova E. A., Shibaev I. A., Vysotin N. G., Morozov D. V. Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy // Key Engineering Materials. – 2017, Volume 755, pp. 242-247.
94. Шибаев И.А. Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021, № 4-1, с. 138—147. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138.
95. Shibaev I.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Zarubin V.P., *Ivanov P.N.* Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018, Volume 9, Issue 9 pp. 84-92.
96. D. Benavente, J.J. Galiana-Merino, C. Pla, J. Martinez-Martinez, D. Crespo-Jimenez, Automatic detection and characterisation of the first P- and S-wave pulse in rocks using ultrasonic transmission method // Engineering Geology. – 2020, Volume 266, № 105474,https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105474.
97. Шибаев И.А. Разработка и обоснование метода определения динамических модулей упругости образцов горных пород с применением лазерной ультразвуковой диагностики: дис. канд. техн. наук. – М.: НИТУ МИСИС, 2021. – 176 с.
98. Шибаев И. А., Бычков А. С. Обоснование генерации сдвиговой упругой волны с помощью лазерного ультразвука в режиме эхо-импульсов в геоматериале // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021, № 4-1, с. 108-117. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_108.
99. Beatriz Quintal, Holger Steeb, Marcel Frehner, Erik H Saenger. Pore fluid effects on S-wave attenuation caused by wave-induced fluid flow // The Leading Edge. – 2012, Volume 77, Issue 3, pp. 13-23. DOI: 10.1190/GEO2011-0233.1.
100. H. Yang, Huan-feng Duan, Jianbo Zhu. Effects of filling fluid type and composition and joint orientation on acoustic wave propagation across individual fluid-filled rock joints // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2020, Volume 128, № 104248. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104248.

101. Rupeng Ma, Jing Ba , Maxim Lebedev , Boris Gurevich, Yongyang Sun. Effect of pore fluid on ultrasonic S-wave attenuation in partially saturated tight rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021, Volume 147, № 104910 https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104910.
102. V. G. Andreev, V. N. Dmitriev, O. V. Rudenko, A. P. Sarvazyan. Remote generation of shear wave in soft tissue by pulsed radiation pressure // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1997, Volume 102, 3155 https://doi.org/10.1121/1.420726.
103. A P. Sarvazyan 1, O. V. Rudenko, S. D. Swanson, J. B. Fowlkes, S. Y. Emelianov. Shear wave elasticity imaging: a new ultrasonic technology of medical diagnostics. Ultrasound in Medicine & Biology. – 1998, Volume 24, Issue 9, pp. 1419-1435. doi: 10.1016/s0301-5629(98)00110-0.
104. Gui Chen, Jinjun Xia. Non-contact shear wave generation and detection using high frequency air-coupled focused transducer and fiber optic based sagnac interferometer for mechanical characterization // Sensors. – 2022, Volume 22, Issue 15, № 5824. https://doi.org/10.3390/ s22155824.
105. Inping Dong, Jingwen Zhao, Xinyi Liu, Wei-Ning Lee. Nondestructive ultrasound evaluation of microstructure-related material parameters of skeletal muscle: an in silico and in vitro study // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023, Volume 142, № 105807 https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105807.
106. Подымова Н.Б., Карабутов А.А. Преобразование термооптически возбуждаемых широкополосных импульсов продольных акустических волн в импульсы сдвиговых волн в изотропной твердотельной пластине в жидкости // Акустический журнал. – 2021, 67, 5, с. 482-492. DOI: 10.31857/S0320791921040110
107. Patrycja Pyzik, Aleksandra Ziaja-Sujdak, Jakub Spytek, Matthew O'Donnell, Ivan Pelivanov, Lukasz Ambrozinski. Detection of disbonds in adhesively bonded aluminum plates using laser-generated shear acoustic waves // Photoacoustics. – 2021, Volume 21, № 100226 https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100226.
108. Карабутов А.А., Матросов М.П., Подымова Н.Б. Термооптический генератор широкополосных импульсов сдвиговых волн // Акустический журнал. – 1993, том 39, номер 2, М.:Наука, с. 373-375.
109. B. Christaras, F. Auger, E. Mosse. Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods // Materials and Structures. – 1994, Volume 27, pp. 222-228.
110. O.O. Blake a b, D.R. Faulkner b, D.J. Tatham. The role of fractures, effective pressure and loading on the difference between the static and dynamic Poisson's ratio and Young's modulus of Westerly granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019, Volume 116, pp. 97-98 https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.001.
111. Ali Reza Najibi, Mohammad Ghafoori, Gholam Reza Lashkaripour, Mohammad Reza Asef. Empirical relations between strength and static and dynamic elastic

properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015, Volume 126, pp. 78-82. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.010.
112. M.S. King. Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1983, Volume 20, Issue 5, pp. 237-241, https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90004-9.
113. W.L. Van Heerden. General relations between static and dynamic moduli of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1978, Volume 24, Issue 6, pp. 381-385. https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)92262-5.
114. Juan Ramón Baeza, Víctor Compán, Germán Castillo, Margarita Cámara, Pablo Pachón. Determining static elastic modulus of weak sandstone in Andalusian historical constructions from non-destructive tests: San Cristóbal's stone // Journal of Building Engineering. – 2022, Volume 57, Issue 1, № 104864. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104864.
115. G. Pappalardo, S. Mineo. Static elastic modulus of rocks predicted through regression models and Artificial Neural Network // Engineering Geology. – 2022, Volume 308, № 106829. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106829.
116. Yuliang Zhang, GaoFeng Zhao, Xindong Wei, Haibo Li. A multifrequency ultrasonic approach to extracting static modulus and damage characteristics of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021, Volume 148, 104925. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104925.
117. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. Монография. - М.: Наука, 1965. - 388 с. - УДК 534.1.
118. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1957. - 503 с.
119. Aki K., Richards P. G Quantitative Seismology. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980. – 932 P.
120. Учебное пособие и руководство пользователя COMSOL Multiphysics . Интернет-ресурс. URL: https://www.comsol.ru/documentation , дата обращения 17.05.2023.
121. Мильков М.Г. Подбор состава акустической склейки для пропускания сдвиговых ультразвуковых волн // Труды 24-й Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2021, с. 76-80.
122. Белов М.А. Обоснование и разработка метода определения параметров зернистой структуры и пористости горных пород на основе принципов ультразвуковой спектроскопии: дис. канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2021. – 150 с.
123. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 8 с.
124. ASTM D2845-08. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic, Elastic Constants of Rock, 2008. – 7 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.
РАЗРАБОТАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН И РАСЧЕТА НА ИХ ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СДВИГОВЫХ ВОЛН

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля

УДК 622.611.4:620.179.16

УТВЕРЖДАЮ
Проректор НИТУ МИСИС
по науке и инновациям,
_____ М.Р. Филонов
«____» _____2023 г.

МЕТОДИКА

определения скоростей распространения ультразвуковых волн и расчета на их основе динамических модулей упругости с помощью широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн

Автор:
Аспирант каф. ФизГео НИТУ МИСИС
_____ П.Н. Иванов

Методика рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры ФизГео НИТУ МИСИС
Протокол № 9 от «26» мая 2023 г.
_____ д.ф.-м.н., зав. каф. ФизГео, В.А. Винников
«26» мая 2023 г.

Москва, 2023

Рисунок А.1 – Титульный лист разработанной методики

Содержание

1. Физические основы и область применения методики 3
2. Требования к подготавливаемым образцам 4
3. Описание дефектоскопа УДЛ-2М и расчета скоростей ультразвуковых волн 4
4. Измерение временных форм и скоростей распространения широкополосных ультразвуковых импульсов сдвиговых волн 9
4.1. Алгоритм работы с преобразователем ПЛУ-СВ-01 11
4.2. Построение дисперсионных кривых. 12
5. Определение динамических модулей упругости 13
6. Список использованных источников 15

Рисунок А.2 – Разработанная методика

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Настоящая методика предназначена для определения динамических модулей упругости образцов горных пород на основе широкополосной лазерно-ультразвуковой диагностики [1-4]. Последняя предполагает генерацию коротких акустических импульсов продольных волн, возбуждаемых лазерным излучением.

В основе генерации широкополосных импульсов сдвиговых волн лежат следующие физические закономерности, установленные в ходе теоретических исследований, численного моделирования и экспериментов:

1. При термооптическом возбуждении коротких широкополосных импульсов продольных волн длительностью порядка 70-100 нс для прецизионного определения их скоростей распространения необходимо учитывать дифракцию, дисперсию фазовой скорости и частотнозависимый коэффициент затухания. Для корректного определения в дальнейшем динамических модулей упругости в зависимости от толщины образцов и их структурных особенностей необходимо выбирать такой частотный диапазон, в котором фазовая и групповая скорости продольных волн будут различаться менее чем на 1%;

2. Наиболее эффективным способом получения широкополосных импульсов сдвиговых волн является использование процесса трансформации широкополосных импульсов продольных волн в сдвиговые, когда продольная волна падает на свободную поверхность изотропного твердого тела [5-7]. Установлено, что для достижения максимальной трансформации энергии широкополосного импульса продольной волны в сдвиговую необходимо использовать в качестве материала призмы преобразователя сдвиговых волн бесцветное оптическое стекло или тяжелый флинт с геометрическими характеристиками, обеспечивающими углы падения продольной волны 61,44° и 59,11° и отражения сдвиговой волны 30,35° и 28,82° соответственно.

Рассматриваемая ниже методика, базирующаяся на широкополосной лазерно-ультразвуковой диагностике, позволяет:

Рисунок А.3 – Разработанная методика

- проводить измерения скоростей распространения продольных и сдвиговых волн в образцах малых размеров толщиной от 1,5 мм до 8,5 мм и площадью поперечного сечения от 1 $см^2$;

- находить дисперсию фазовой скорости в зависимости от затухания и геометрических параметров образца, определяющих дифракцию акустического пучка;

- определять частотный диапазон, в котором фазовая и групповая скорости близки по значению; рассчитывать на этой основе динамические модули упругости с погрешностью менее 1%.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТАВЛИВАЕМЫМ ОБРАЗЦАМ

Для проведения исследований могут использоваться образцы с произвольной формой поперечного сечения площадью от 1 $см^2$ и толщиной от 1,5 мм до 8,0 мм. Плоскопараллельность торцевых поверхностей должна быть не менее 0,01 мм, что обеспечивает, что обеспечивает высокую точность в определении скоростей распространения упругих волн. Рекомендуется использовать образцы без крупных единичных зерен, и, по возможности, стремиться к тому, чтобы толщина образца не менее чем в 3 раза превосходила размер зерна.

3. ОПИСАНИЕ ДЕФЕКТОСКОПА УДЛ-2М И РАСЧЕТА СКОРОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Для возбуждения мощных коротких импульсов продольных волн настоящей методикой предполагается использование лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М [8-12] со стандартным оптико-акустическим преобразователем ПЛУ-6П-02, работающий в эхо-режиме лазерно-ультразвуковой диагностики (рисунок 1).

Рисунок А.4 – Разработанная методика



Рисунок 1 – Принципиальная схема проведения лазерно-ультразвуковой диагностики

Принцип действия эхо-режима ЛУД основан на том, что короткий наносекундный импульс ND:YAG лазера через оптоволокно направляется к генератору преобразователя через призму, выполненную из бесцветного оптического стекла. Вследствие поглощения лазерного излучения и возникновения термоупругого эффекта, возбуждается ультразвуковой импульс продольных волн, с гауссовым распределением давления по поперечному сечению, длительностью порядка 70 нс и амплитудой давления 0,1 МПа, который направляется в исследуемый образец. В результате явлений отражения и преломления на границе раздела «генератор-образец» возникают три волны: первая продольная волна отражается от границы раздела и направляется к приемнику, сигнал от которой является опорным $L_{02}^{\text{П}_{\leftarrow}}$; вторая продольная волна и образовавшиеся сдвиговая волны направляются в исследуемый образец, частично рассеиваются на различных неоднородностях, отражаются от тыльной стороны образца и также регистрируются приемником. Сигналы, зарегистрированные приемником, после усиления обрабатываются с помощью ПК на специализированном программном обеспечении.

Скорости распространения упругих волн рассчитываются согласно следующему алгоритму, описание которого соответствует рисунку 2:

1) После получения временной формы сигнала фиксируются времена прихода по максимумам импульсов первого $L_{\text{эхо}}^{1}$ и второго $L_{\text{эхо}}^{2}$ отражений от

5

Рисунок А.5 – Разработанная методика

тыльной поверхности исследуемого образца. Данные импульсы будут идентифицированы как две продольные волны;

2) Скорость распространения продольной волны V_L рассчитывается по формуле:

$$V_L = \frac{2h_{обр}}{T^{max}_{L^2_{эхо}} - T^{max}_{L^1_{эхо}}} \quad (1)$$

где $T^{max}_{L^1_{эхо}}$ – зарегистрированное время прихода импульса первого отражения от тыльной поверхности образца, $T^{max}_{L^2_{эхо}}$ – зарегистрированное время прихода импульса второго отражения от тыльной поверхности образца, $h_{обр}$ – толщина образца.

3) Время регистрации импульса сдвиговой волны $S_{эхо}$ идентифицируется после дифференцирования полученных сигналов. В точках максимума производная обращалась в нуль, положение которого и регистрируется. Отмечается, при использовании преобразователя ПЛУ-6П-02 в некоторых случаях импульс сдвиговой волны может быть не обнаружен вследствие затухания и дифракции.

4) Скорость распространения сдвиговой волны V_S рассчитывается по формуле:

$$V_S = \frac{h_{обр}}{(T^{min}_{S_{эхо}} - T^{max}_{L^1_{эхо}}) + \frac{h_{обр}}{V_L}} \quad (2)$$

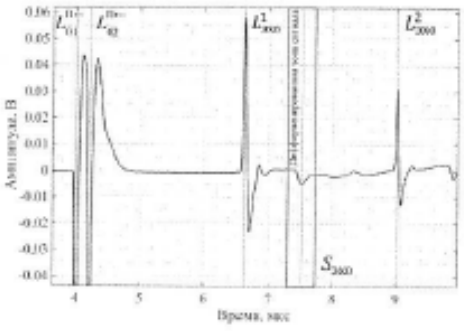


Рисунок 2 – Пример временной формы сигнала, по которой производится расчёт скоростей прохождения продольной и сдвиговой волн

Рисунок А.6 – Разработанная методика

Для повышения качества регистрации импульса сдвиговой волны, а также для исследования образцов толщиной менее 3,0 мм и образцов горных пород с сильным затуханием, в настоящей методике предполагается использование специально разработанного широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01. Основная идея при разработке данного преобразователя заключалась в том, что при определенном угле падения продольной волны на свободную границу изотропного твердого тела, при отражении она полностью трансформируется в сдвиговую.

3 сечения и 3D модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 приведены на рисунке 3.

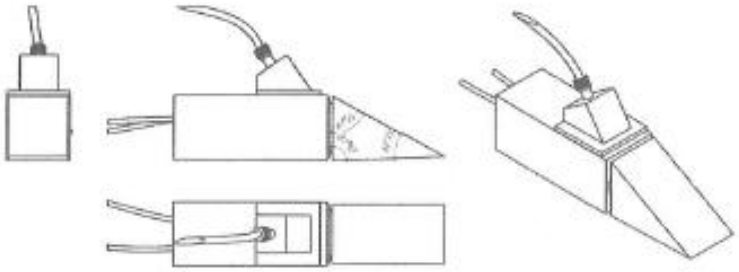


Рисунок 3– 3 сечения и 3D модель преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Внешний вид разработанного преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01 приведен на рисунке 4.

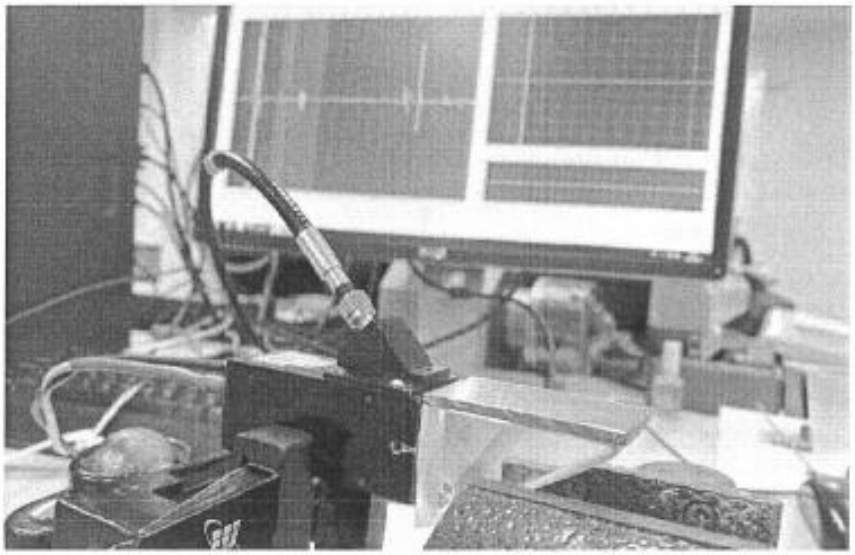


Рисунок 4 –Преобразователь сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Рисунок А.7 – Разработанная методика

Согласно разработанной схеме, изготовленная из бесцветного оптического стекла или тяжелого флинта призма одной из сторон примыкает к генератору преобразователя ПЛУ-6П-02, а на другую сторону устанавливается исследуемый образец, как показано на рисунке 4. В начале приемником будут зарегистрированы зондирующий $L_{01}^{П\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{П\leftarrow}$ импульсы, возникшие в результате переотражений в преобразователе ПЛУ-6П-02. Затем, будет зарегистрирован импульс продольной волны $L_1^{П\leftarrow}$, возникший в результате отражения сдвиговой волны $S_1^{Г\rightarrow}$ от границы раздела «призма-образец» (рисунок 5, а). В соответствии с рисунком 5, б, большая часть энергии сдвиговой волны $S_1^{Г\rightarrow}$ также будет направлена в исследуемую среду, отразится от тыльной стороны образца в волну $S_2^{П\leftarrow}$, пройдет в среду призмы как волна $S_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$ и в результате трансформации на свободной границе будет зарегистрирована приемником как продольная волна $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$.

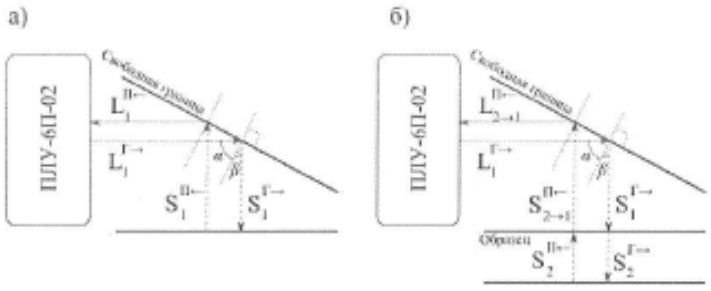


Рисунок 5 – Схематическое изображение распространения импульса продольной волны в среде призмы при отсутствии (а) и наличии (б) образца

Таким образом, при наличии исследуемого образца, условием корректной работы преобразователя ПЛУ-СВ-01 является наличие на временной форме сигнала импульса $L_{2\rightarrow1}^{П\leftarrow}$. Для этого необходимо обеспечить прохождение в среду образца импульса сдвиговой волны $S_1^{Г\rightarrow}$.

При прохождении упругих волн через границы раздела твердых тел важную роль играют контактные среды. Акустический контакт между преобразователем ПЛУ-6П-02 и призмой обеспечивает вода.

8

Рисунок А.8 – Разработанная методика

Для обеспечения прохождения сдвиговой волны в исследуемый образец необходимо учитывать, что ее коэффициент прохождения через границу раздела двух твердых тел зависит от множества факторов, начиная от типа акустического контакта, заканчивая шероховатостью поверхности. При этом энергия, амплитуда и фаза прошедшей в образец сдвиговой волны напрямую будут зависеть от качества обработки контактирующих поверхностей призмы и образца и силы их прижима.

Контакт между образцом и призмой обеспечивается специальной акустической склейкой на основе глицерина и высокой концентрации сахара

Результаты, которые были приведены в работе [13] показали, что коэффициент пропускания ультразвука данной склейкой растет с течением времени и может увеличиться более чем вдвое. Поэтому в экспериментах, в частности на горных породах, измерения скоростей сдвиговых волн проводились после выдерживания склеенного с призмой образцы до обнаружения отчетливого импульса сдвиговой волны.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ФОРМ И СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ СДВИГОВЫХ ВОЛН

В качестве примера на рисунке 6 приведена типичная временная форма сигнала, получаемая при использовании преобразователя ПЛУ-СВ-01. На сигнале обозначены зондирующий $L_{01}^{\text{П}\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{\text{П}\leftarrow}$ импульсы. При этом отчетливо наблюдается импульс сдвиговой волны $L_{1}^{\text{П}\leftarrow}$, зарегистрированный в результате отражения продольной волны от грани призмы, примыкающей к исследуемому образцу в соответствии с рисунком 5. В правой части рисунка в увеличенном масштабе приведена временная форма зарегистрированного искомого импульса сдвиговой волны $L_{2\rightarrow1}^{\text{П}\leftarrow}$. Также отчетливо регистрируется второе отражение сдвиговой волны $L_{2\rightarrow1(2\text{П})}^{\text{П}\leftarrow}$ от тыльной стороны исследуемого образца.

9

Рисунок А.9 – Разработанная методика

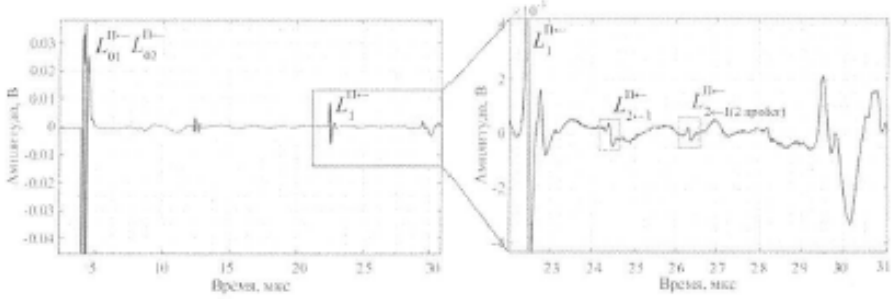


Рисунок 6 – Типичная временная форма сигнала, получаемая при использовании преобразователя ПЛУ-СВ-01

Поскольку на данной временной форме отчетливо наблюдается импульс, зарегистрированный в результате двойного пробега сдвиговой волны в образце, была рассчитана разница времен регистрации данных импульсов по положительной фазе (согласно классической методике регистрации продольных волн это обеспечивает наиболее точное определение скоростей распространения продольных волн). В данном случае она составила $\Delta T_1 = T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1}(2\text{ пробег})} - T^{min}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1}} =$ 1,91 мкс. Тогда, для расчёта скоростей распространения сдвиговых волн с помощью импульсов $L_1^{П\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{П\leftarrow}$ (в случае отсутствия второго переотражения) необходимо, чтобы разница времен их регистрации ΔT_2 была равна ΔT_1. Это условие выполняется если время регистрации импульса $L_1^{П\leftarrow}$ принимать по его максимуму положительной фазы.

Скорость распространения сдвиговой волны $L_{2\to1}^{П\leftarrow}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{S2} = \frac{2h_{\text{обр}}}{(T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1}} - T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{1}})} \quad (3)$$

где $T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L_{2\to1}^{П\leftarrow}$; $T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{1}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L_1^{П\leftarrow}$; $h_{\text{обр}}$ – толщина образца.

Рисунок А.10 – Разработанная методика

При наличии на временной форме сигнала второго отражения сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемых образцов $L^{П\leftarrow}_{2\to1(2П)}$, скорость распространения сдвиговой волны возможно рассчитать по формуле:

$$V_{S2} = \frac{2h_{обр}}{(T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1(2П)}} - T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1}})} \quad (4)$$

где $T^{max}_{L^{П\leftarrow}_{2\to1(2П)}}$ – время задержки максимума амплитуды импульса $L^{П\leftarrow}_{2\to1(2П)}$.

4.1. Алгоритм работы с преобразователем ПЛУ-СВ-01

1) Из исследуемого материала подготавливается плоскопараллельный образец, рабочие поверхности которого должны быть отшлифованы и отполированы;

2) К генератору классического преобразователя ПЛУ-6П-02 прикладывается разработанная призма (в соответствии с рис. 4) из бесцветного оптического стекла с углами между гранями $\alpha_1 = 61{,}74°, \beta_1 = 30{,}33°$ или из тяжелого флинта с углами между гранями $\alpha_2 = 59{,}11°, \beta_2 = 28{,}82°$. Акустический контакт между генератором и призмой обеспечивается водой. Сборная конструкция устанавливается в зажимное устройство;

3) На рабочую грань призмы наносится тонкий слой акустической смеси на основе сахара и глицерина, на который «приклеивается» исследуемый образец.

4) Производится запуск дефектоскопа УДЛ-2М и ПО для обработки сигналов;

5) При статичном положении генератора производится юстировка призмы таким образом, чтобы импульс $L^{П\leftarrow}_1$ был максимальным по амплитуде;

6) Образец перемещается вручную по рабочей грани призмы до тех пор, пока на временной форме сигнала не будет проявляться импульс сдвиговой волны $L^{П\leftarrow}_{2\to1}$ максимальной амплитуды;

Рисунок А.11 – Разработанная методика

7) Регистрируются времена прихода импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$, по которым производится расчет скоростей распространения сдвиговых волн по формуле (4) или по формуле (3) в случае отсутствия на временной форме сигнала второго отражения сдвиговой волны от тыльной стороны исследуемого образца. Время регистрации импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$ $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ и последующих отражений от тыльной стороны образца производится по максимуму амплитуд.

4.2. Построение дисперсионных кривых

Построение дисперсионных кривых проводится на основе разработанного в работе [14] алгоритма со следующими поправками.

На первом этапе выбирается импульс $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$, зарегистрированный в результате отражения от донной поверхности образца. Данный импульс умножается на оконную функцию гауссовой формы, для того чтобы отфильтровать шумовые помехи и выделить пик импульса. Затем с помощью быстрого Фурье-преобразования вычисляется комплексный спектр данного сигнала.

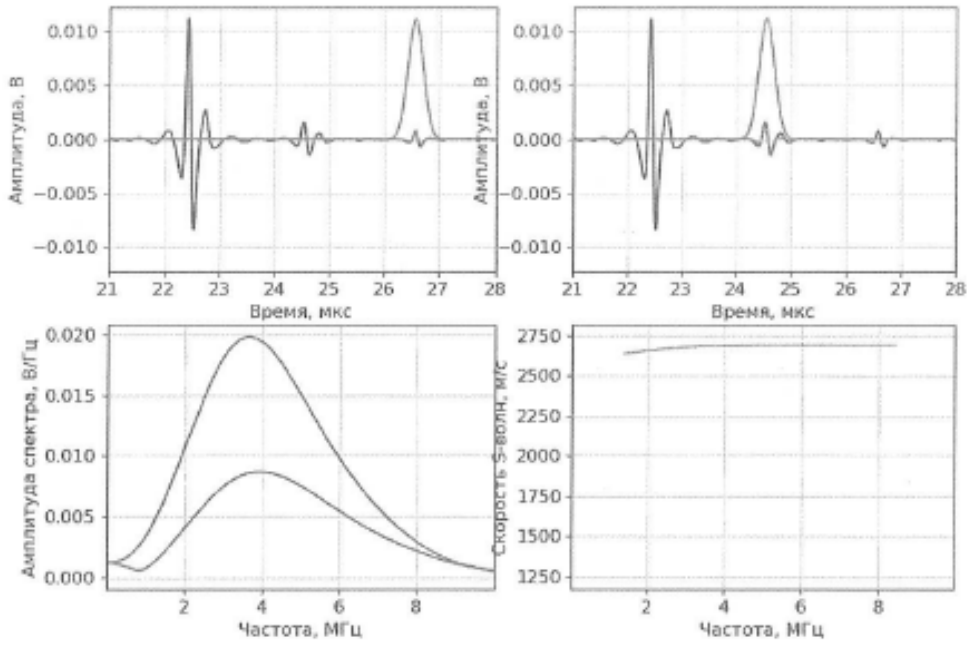
На втором этапе выделяется импульс сдвиговой волны $L_{2\to1(2\Pi)}^{\Pi\leftarrow}$, полученный в результате второго донного отражения, который также умножается на оконную функцию.

Далее из обоих комплексных спектров сигналов выделяются действительные части, которые соответствуют амплитудным спектрам. А фазовые спектры определяются путем деления мнимой части сигнала $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ на его действительную часть.

Следует отметить, что также возможно провести обработку временной формы на основе выделения и умножения на оконную функцию импульсов $L_1^{\Pi\leftarrow}$ и $L_{2\to1}^{\Pi\leftarrow}$ в случае отсутствия сигнала от второго донного отражения.

Рисунок А.12 – Разработанная методика

На рисунке 7 приведен пример типовой обработки сигнала, полученный для образца сине-зеленого стекла СЗС-20.



а) Выделение с помощью оконной функции импульса $L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1(2П)}$; б) Выделение с помощью оконной функции импульса $L^{П\leftarrow}_{2\rightarrow1}$; в) построенные спектры сигналов первого и второго донных отражений; г) Зависимость скоростей сдвиговых волн от частоты

Рисунок 7 – Пример типовой обработки сигнала, полученного с помощью преобразователя ПЛУ-СВ-01

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ

Для расчёта упругих свойств рассматриваемых горных пород используются следующие формулы:

$$E = \rho V_S^2 \left(3 - \frac{1}{\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 1}\right) \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{V_L}{V_S}\right)^2 - 1\right)} \quad (6)$$

Рисунок А.13 – Разработанная методика

$$G = \rho V_S^2 \quad (7)$$

где E – динамический модуль упругости, ГПа; μ – коэффициент Пуассона; G – динамический модуль сдвига, ГПа.

Поскольку с помощью разработанного ПЛУ-СВ-01 удается измерить скорости распространения сдвиговых волн и в образцах толщиной менее 3,0 мм, и в образцах с сильным затуханием, в которых невозможно идентифицировать импульс сдвиговой волны с помощью преобразователя продольных волн ПЛУ-6П-02, то динамические модули упругости и коэффициент Пуассона удается рассчитать и для них.

Рисунок А.14 – Разработанная методика

6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Черепецкая Е.Б. Разработка лазерного ультразвукового метода диагностики структуры и свойств горных пород на образцах: дис. доктор технических. – М.: МГГУ, 2005. – 266 с.

2. *Иванов П. Н.*, Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. —№ 4-1. — С. 26—40. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_26.

3. Винников В. А., Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б. Исследование структуры и упругих свойств геоматериалов с помощью контактной широкополосной ультразвуковой структуроскопии // Горный журнал. — 2017. — № 4. — С. 29—32. 10.17580/gzh.2017.04.05

4. Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б., Теоретическая оценка параметров ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в геоматериалах лазерным излучением, ФТПРПИ, — 2003, — № 4, — с. 11-18.

5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1957. - 503 с.

6. Aki K., Richards P. G Quantitative Seismology. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980. – 932 P.

7. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. Монография. - М.: Наука, 1965. - 388 с. - УДК 534.1.

8. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., *Ivanov P.*, Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone // Remote Sensing. 2020, vol. 12, no. 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.

9. Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A., Mironova E. A., Shibaev I. A., Vysotin N. G., Morozov D. V., Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, 2017, pp. 242-247.

15

Рисунок А.15 – Разработанная методика

10. Кравцов А., *Иванов П. Н.*, Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Гапеев А. А. Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65

11. Руководство по эксплуатации лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ 2М. Москва. 2013.

12. Shibaev I.A., Cherepetskaya E.B., Bychkov A.S., Zarubin V.P., *Ivanov P.N.* Evaluation of the internal structure of dolerite specimens using X-ray and laser ultrasonic tomography // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, Vol. 9, Issue 9, PP. 84-92

13. Мильков М.Г. Подбор состава акустической склейки для пропускания сдвиговых ультразвуковых волн // Труды 24-й Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2021, с. 76-80.

14. Шибаев И.А. Разработка и обоснование метода определения динамических модулей упругости образцов горных пород с применением лазерной ультразвуковой диагностики: дис. канд. техн. наук. – М.: НИТУ МИСИС, 2021. – 176 с.

16

Рисунок А.16 – Разработанная методика