

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

АНЧУГОВ Алексей Владимирович

**АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗУЧЕНИЯ
АКУСТО-СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ КЕРНА**

Специальность 1.6.9 - Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
Решетова Галина Витальевна

НОВОСИБИРСК
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РАЗРАБОТОК, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ	14
Глава 2. РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	20
2.1 Особые требования к приборам и материалам для работы с образцами ..	20
2.2 Разработка блок-схемы аппаратуры для исследования упругих характеристик горных пород	21
2.3 Конструкция модуля сбора данных	23
2.3.1 Разработка ударно-резонансного генератора импульсов возбуждения пьезопреобразователя	23
2.3.2 Разработка усилителя акустического сигнала с цифровым интерфейсом управления	28
2.3.3 Разработка платы коммутации сигналов	29
2.3.4 Управляющий компьютер	32
2.3.5 Стандартные блоки.....	32
2.4 Проектирование, описание программной части и принцип работы прибора.....	35
2.5 Акустическая измерительная система	38
2.6 Определение скорости акустических волн в образцах	39
Глава 3. АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ИХ КОНСТРУКЦИЯ	42
3.1 Общие требования к источникам и приемникам колебаний для работы с образцами керна	42
3.2 Экспериментальный анализ различных способов демпфирования пластинчатых пьезопреобразователей	43
3.3 Работа пьезопреобразователя в режиме излучения.....	47
3.4 Работа пьезопреобразователя в режиме приема	48
3.5 Обоснование выбора рабочей полосы частот	49
3.6 Разработка акустической системы	51
3.7 Свойства применяемой в датчиках пьезокерамики.....	56
3.8 Способы соединения пьезокерамики с металлами.....	59
3.9 Клеевые соединения металлокерамических узлов	59

3.10 Способ получения паяного металлокерамического соединения	62
3.11 Конструкция акустического датчика для работы с керном.....	65
3.12 Эксплуатационные требования к пьезоэлектрическим датчикам и особенностям их конструкции для работы с керном	67
Глава 4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	74
4.1 Порядок проведения экспериментов по определению скоростей распространения акустических волн на образцах	75
4.1.1 Методика проведения и описание эксперимента	75
4.2 Определение величин скоростей распространения упругих колебаний в образцах.....	80
4.3 Определение модулей упругости	85
4.4 Регистрация сигналов акустической эмиссии и проверка выполнения закона Омори после слома образцов керна	86
4.5 Использование данных акустической эмиссии для управления ходом эксперимента при многостадийном нагружении образца. Эффект Кайзера ..	93
4.6 Примеры внедрения разработанного оборудования	95
Глава 5. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ	99
5.1 Моделирование акустической эмиссии	99
5.2 Численные эксперименты по моделированию акустической эмиссии ...	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	126

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования - аппаратура для сбора данных при проведении лабораторных петрофизических экспериментов по определению скорости прохождения акустических (ультразвуковых) волн через образцы горной породы (керна) и регистрации сигналов акустической (акусто-сейсмической) эмиссии в пластовых условиях, а именно при температуре до 170 °С и давлении до 100 МПа (и более), встречающихся в нефтяных и газовых месторождениях России и зарубежья.

Актуальность исследования

Современные требования к лабораторному оборудованию предусматривают обязательное проведения исследований в пластовых условиях при температуре, превышающей 150 °С. Например, температура в нефтяных залежах Мексиканского залива и приуроченных к глубинам 6,5 км достигают 200-230 °С. [Максимов и др., 1984]. Для месторождений нефти Западной Сибири в зонах АВПД, в частности Салымского, характерны пластовые температуры около 130 °С; а высокие значения пластовых давлений, приведённые к абсолютной отметке -2900 м, изменяются от 26,5 до 49,9 МПа. [Нестеров и др., 1985]. Соответственно датчики, возбуждающие и регистрирующие акустические волны должны быть работоспособны при этих условиях. Известные датчики, входящие в состав оборудования, в основном иностранного производства либо не выдерживает пластовых температур поскольку чувствительный пьезокерамический элемент отклеивается уже после достижения 120 °С, либо не выдерживает условий при разрушении образца. При этом вся компоновка пьезопреобразователей отслаивается от волновода в акустическом датчике.

Цели исследования:

1. Экспериментально найти новое техническое решение (способ) крепления чувствительного пьезоэлемента к корпусу датчика так, чтобы при

температуре до 170 °С и давлении до 100 МПа он сохранял работоспособность и не разрушался при таких условиях при возбуждении и регистрации акустических волн.

2. Повысить информативность петрофизических исследований керна горных пород в лабораторных условиях приближенных к пластовым, разработав аппаратуру для определения скоростей акустических волн и экспериментального изучения акусто-сейсмической эмиссии в образцах.
3. Для локализации событий акустической эмиссии на образцах керна модифицировать метод зеркального обращения волнового поля, разработать и апробировать научно-исследовательскую версию соответствующего программного обеспечения.

С использованием разработанного датчика и системы регистрации данных определить петрофизические свойства образцов керна находящихся при пластовых условиях (давлениях до 100 МПа и температурах до 170 °С.), в частности время распространения через образец различных типов акустических волн: продольной и поперечной, как возбуждаемых искусственно внешним источником так и внутреннего происхождения (акустико-эмиссионные волны) возникающих вследствие разрушения образца под нагрузкой. Полученные данные могут использоваться для построения паспорта прочности горной породы при многостадийном исследовании с использованием акустической эмиссии.

Материалом для диссертационной работы послужили в том числе исследования, выполненные при поддержке РНФ (№22–21–00759) и РФФИ в рамках научного проекта № 19–01–00347 А.

Научно-технические задачи:

1. Разработать аппаратуру для регистрации акустических сигналов от датчиков, применяемых при нагружении образцов горных пород, включая сигналы акустической эмиссии в двухканальном непрерывном режиме.
2. Разработать датчики для возбуждения и регистрации акустических волн, не разрушающиеся в пластовых условиях с высокой температурой до 170 °С и давлением до 100 МПа и более в различных режимах механических нагружений, вплоть до разрушения образцов горных пород.
3. Модифицировать метод зеркального обращения волнового поля путём локализации суммарной упругой энергии акусто-сейсмической эмиссии.

Фактический материал методы исследования, аппаратура

Основной метод исследования – лабораторный эксперимент на образцах горной породы в случае геомеханического эксперимента в вертикальной ячейке – стабилометре, подкреплённый численным моделированием.

Исследовано более 50 образцов керна с Вертолётной площади Томской области с различными литологическими характеристиками и гранулометрическими составами. Эксперименты проводились с применением клеев различных типов (MG Chemicals 8331 Conductive Epoxy Adhesive, Duralco 124 Adhesive Epoxy) и их комбинаций, а также с использованием оловянно-свинцового припоя для крепления пьезочувствительных элементов датчика.

С помощью разработанного модуля сбора данных и датчиков выполнены лабораторные экспериментальные определения петрофизических свойств (скорости прохождения продольной и двух поперечных акустических волн) в процессе нагружения, а также проведены численные эксперименты для изучения сигналов акустической эмиссии с использованием зеркального обращения времени. Модуль сбора данных включал в себя блок аналого-цифрового

преобразования, двухканальный усилитель, источник возбуждения пьезоэлектрических преобразователей (датчиков) [Патент № RU 2810700 C1].

Для численных расчётов и анализа сигналов акусто-сейсмической эмиссии использовались решения уравнений динамической теории упругости, опирающиеся на закон Гука и соответствующие уравнения движения.

Теоретические основы решения поставленных задач:

- классическая теория обработки цифровых сигналов;
- конечно-разностные методы численного моделирования;
- метод наименьших квадратов.

Использовались данные, полученные в ходе исследования путем одноосного нагружения образцов вплоть до их разрушения (Uniaxial Compression Strength tests). Акустические сигналы при разрушении 55 образцов с различными литологическими характеристиками и гранулометрическими составами (материалы АО «Геологика» от 2018 г.) [Решетова, Анчугов, 2021; Цветков и др., 2022] регистрировались в двухканальном непрерывном режиме измерения с использованием двухканального усилителя сигнала на 40 Дб, и регистратора Аурис В320 с управляющим компьютером. Данные записывались в память компьютера специальным программным обеспечением (ПО) разработанным Романютой М.

Акустические сигналы регистрировались в непрерывном режиме с частотой дискретизации 1 МГц, при разрешении 10 бит. Разрушение образца происходило в этих условиях в течение первых минут.

Защищаемые научные результаты:

1. Разработана аппаратура в виде модуля, включающего в себя различные блоки (АЦП, усилитель, источник возбуждения, плата коммутации) для сбора и регистрации акустических волн во время проведения

геомеханического или фильтрационного эксперимента на образцах керна при пластовых условиях.

2. Разработаны датчики и способ их изготовления с помощью пайки для возбуждения и регистрации акустических продольной и поперечных волн на образцах керна и последующего измерения времени прохождения таких типов волн и расчёта их скорости прохождения через образец, а также регистрации сигналов акустической эмиссии.
3. С использованием суммарной энергии полного волнового поля при полномасштабном численном моделировании предложен, разработан и верифицирован подход к локализации событий акусто-сейсмической эмиссии.

Высокая степень достоверности найденных решений определяется:

- применением при разработке программно-аппаратного комплекса открытой операционной системы Linux Debian, существенно упрощающей процесс написания ПО, обеспечивающего выполнение высокоточных измерений с использованием самого современного измерительного оборудования, такого как цифровые блоки регистрации данных комплекса Alma Meter производства НПК «Аурис»;
- из сопоставления результатов расчётов и результатов лабораторных физических экспериментов на образцах горных пород с результатами численного моделирования следует что результаты совпадают в пределах погрешностей измерительной аппаратуры;
- обеспечением требований ГОСТ по точности измерения при межлабораторных экспериментах по определению скоростей прохождения акустических волн через стандартные калибровочные образцы, в том числе внесённые в государственный реестр средств измерений: калибры скорости типа СО-1, СО-2, ГОСТ Р 55724–2013;

- полученные с использованием аппаратуры экспериментальные данные подтверждаются результатами расчётов с использованием закона Омори, что позволило значительно снизить неопределенность ключевых параметров геомеханических моделей среды.

Личный вклад

- Спроектированы, разработаны и изготовлены акустические датчики для проведения лабораторных экспериментов во всём диапазоне нагрузки на образец керна, от нулевой до вызывающей его разрушение (совместно с Юркевич Н. В.) [Патент № RU 2810700 C1]. В отличие от известных решений в аналогичном оборудовании корпус датчика может разрушать образец керна при пластовых условиях (при достижении значений в 600 кН и более). Соединением пьезокерамики с титановым плунжером способом пайки обеспечивается максимально возможная механическая связь перехода титан - пьезопластина. Прочность паяного соединения (усилие на отрыв) превышает $4.9 \cdot 10^4$ Н/м².
- Непосредственное участие в разработке и тестировании предварительного усилителя и коммутатора сигналов. Для цифрового интерфейса управления усилителем разработана система команд;
- Разработана и апробирована в симуляторе электронных схем работа схемы источника ультразвуковых акустических колебаний для возбуждения активных пьезокерамических излучателей.
- Создано специализированное ПО для управления сбором данных, а также разработаны драйверы для блоков АЦП Аурис В386 и В322 с поддержкой интерфейса Ethernet для ОС Linux Debian. Дополнительно создано консольное приложение для автоматизированной регистрации акустических волн в экспериментах с образцами.
- В составе коллектива авторов (Баракат Н. Р., Юркевич Н. В., Золотухин Р. В., Кучер Д. О.) разработан гидравлический насос для создания

пластовых давлений при проведении петрофизических экспериментов [Патент № RU 2808325 C1], а также электротомографическая система контроля текущей водонасыщенности образцов керна при пластовых условиях, которую можно применять совместно с исследованием его акустических свойств [Патент № RU 2778498 C1].

- По результатам представительной серии численных экспериментов предложен и верифицирован метод локализации упругой акусто-сейсмической энергии для надёжного определения её источников.

Научно-техническая новизна:

- Для лабораторных экспериментов на образцах керна в пластовых условиях (до 100 МПа и выше и температуре до 170 °С) разработан и изготовлен датчик, отличающийся от аналогов тем, что вместо традиционных способов склеивания чувствительного пьезоэлемента использованы мягкие припои на основе олова. [Патент № RU 2810700 C1].
- С использованием аналогового источника акустических волн, формирующего импульс, близкий по форме к импульсу Берлаге, разработан модуль сбора данных. Дополнительно он включает, кроме основного регистратора сигналов, высокочастотный регистратор с разрядностью 16 бит и частотой дискретизации до 10 МГц для непрерывной регистрации сигналов акустической эмиссии.
- Дополнительно блок сбора данных содержит коммутационный узел, чтобы использовать его соединительные провода для подключения к датчикам и корпус самого датчика в цепи для измерения электрического сопротивления образца керна с помощью внешнего измерителя импеданса и расчёта удельного электрического сопротивления образца.

- С использованием суммарной энергии волнового поля, полученной методом зеркального обращения времени, осуществляется пространственная локализация событий акустической эмиссии в образце.

Практическая значимость результатов:

1. Найденный способ крепления пьезопластин в датчиках предназначен для использования при разработке акустических датчиков для экспериментов на образцах керна, а также для разработки акустических датчиков в скважинном варианте при пластовых температурах и давлениях для проведения промысловых работ при исследованиях скважин.
2. С использованием разработанного датчика и системы регистрации акустических волн определяются петрофизические свойства образцов, находящихся при пластовых условиях. В частности, время прохождения через образец продольной и поперечной акустических волн, возбуждаемых искусственно внешним источником либо естественного происхождения (волны акустической эмиссии), возникающими при разрушении образца под нагрузкой.
3. Во время геомеханического эксперимента получены значения максимальных касательных напряжений. Они используются для построения паспорта прочности горной породы при многостадийном исследовании с применением акустической эмиссии. Разработка будет востребована при промысловых работах (ГИС), при поиске и достоверной оценке запасов углеводородов, а также для геологического обоснования оптимального освоения месторождений нефти и газа.
4. Для локализации событий и восстановления механизма образования трещин и разрушения образца с использованием данных многоканальной системы регистрации акусто-сейсмической эмиссии при проведении

петрофизического эксперимента в условиях, приближенных к пластовым. Что значимо для моделирования трещиноватости, оценке напряжённно-деформированного состояния среды и проектировании гидроразрыва пласта.

Реализация результатов

В диссертации приводятся примеры реализации разработанной системы для проведения различных лабораторных экспериментов.

Разработанная аппаратура, ПО и датчики используются в исследовательском центре ГПН «Геосфера», (г. Тюмень). Оборудование разработано, изготовлено и поставлено ООО «Ситен Технологии» в рамках контракта с АО «Цифровые закупочные сервисы» – дочерней компанией ПАО «Газпром нефть» в 2023 году. На этом оборудовании проводятся петрофизические исследования скоростей прохождения акустических волн через образцы горной породы. Институт физики Земли РАН (г. Москва) использует ультразвуковые датчики и модуль сбора данных, изготовленные и поставленные в рамках контракта в 2022 г., для установки по исследованию геомеханических свойств образцов производства компании GCTS. Для Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН разработан и поставлен в рамках контракта в 2022 г. рентгенопрозрачный кернодержатель с акустическими датчиками для проведения геомеханических исследований на керне размером 10x20 мм. Он входит в составе экспериментальной установки сбора данных, а также для создания и поддержания пластовых условий для эксплуатации совместно с источником синхротронного излучения СКИФ.

Апробация результатов и публикации

Результаты работы и материалы, использованные в работе, докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: конференция

“Геомодель-2019” (9–13 сентября 2019, г. Геленджик. Россия.)), научный конгресс “Интерэкспо Гео-Сибирь”, (24–26 апреля 2019, г. Новосибирск. Россия.), научный конгресс “Интерэкспо Гео-Сибирь”, (18–20 мая 2022, г. Новосибирск. Россия.), научный конгресс “Интерэкспо Гео-Сибирь” (15–19 мая 2023, г. Новосибирск. Россия.), XII Российско-Китайский симпозиум (25–29 сентября 2023, г. Сочи. Россия.), 24 международная конференция “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (25–27 сентября 2023, г. Москва, 29 сентября 2023, Борок. Россия.), “Технологический форум по петрофизике, геомеханике, лабораторным исследованиям керна и пластовых флюидов изучение сложных коллекторов: вчера, сегодня, завтра” (24–25 октября 2023, г. Тюмень. Россия.), научный конгресс “Интерэкспо Гео-Сибирь”, (19–23 мая 2025, г. Новосибирск. Россия.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано три работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов диссертаций на соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика». На основании результатов, полученных за время подготовки диссертации, зарегистрировано три патента Российской Федерации.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов по каждой главе и заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, включает 65 иллюстраций, 1 таблицу, библиографический список из 86 наименований.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она представлена к защите

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.6.9 «Геофизика» по техническим наукам по пункту 21: Измерительная техника, средства, технологии, системы наблюдения и сбора геофизических данных; геофизические излучающие и измерительные системы, так как посвящена разработке и применению акустических датчиков для пластовых условий эксперимента, а также созданию для них измерительной системы.

Глава 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РАЗРАБОТОК, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

1.1 Свойства основных породообразующих минералов и минеральный состав горных пород.

Оборудование для лабораторных исследований работает с образцами керна горной породы. Горные породы как правило состоят из различных минералов в зависимости от их происхождения. Осадочные горные породы — это такие горные породы, существующие в термодинамических условиях, характерных для поверхностной части земной коры и образующиеся в процессе переотложения продуктов выветривания и разрушения различных горных пород, химического и механического выпадения осадка из воды, жизнедеятельности организмов или всех трех процессов одновременно. Большая часть площади материков покрыта осадочным чехлом, поэтому осадочные горные породы являются наиболее распространёнными при геологических работах. Также, с осадочными породами связана основная часть разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. Таким образом одним из важных типов пород — коллекторов являются осадочные породы, состоящие из песчаников, глин, аргиллитов и алевролитов. Обломки и другие составляющие осадочных типов

горных пород в свою очередь могут состоять из магматических или метаморфических горных пород. Магматические горные породы образуются при застывании и кристаллизации магмы.

Существует связь акустических параметров горных пород с их петрофизическими свойствами. Акустические свойства тесно связаны с физико-механическими свойствами, термодинамическим состоянием и структурными особенностями среды. Так, для скальных пород коэффициент затухания приблизительно пропорционален первой степени частоты, для пористых и слабо сцементированных её квадрату. Скорости распространения волн возрастают с увеличением модулей упругости и плотности пород и давления (глубины залегания); коэффициент затухания уменьшается с глубиной. Акустические свойства горных пород зависят также от температуры: при её увеличении скорость упругих волн уменьшается, а коэффициент затухания возрастает.

Для определения акустических характеристик горных пород можно применять:

1. Метод ультразвуковых волн: Этот метод использует высокочастотные звуковые волны для определения скорости распространения звука в твердом теле. Звуковые волны генерируются и регистрируются с помощью ультразвуковых датчиков, для определения акустических свойств материала, такие как скорость звука и поглощение. При этом используется время-импульсный метод измерения скорости звука.
2. Акустическая эмиссия: Этот метод используется для обнаружения и анализа акустических сигналов, возникающих при внутренних дефектах или деформациях материала. При этом измеряются параметры сигналов, такие как частота, амплитуда и продолжительность, для оценки состояния материала.

1.2 Время-импульсный метод измерения скорости волн

Время-импульсный метод измерения скорости волн основан на измерении времени, за которое акустический импульс распространяется через образец материала. Описание метода:

1. Формирование импульса генератором: сначала генерируется короткий звуковой импульс, например, с помощью удара по поверхности образца или использованием ультразвукового генератора либо луча лазера. Этот импульс является начальным возмущением, который будет распространяться через материал.

2. Измерение времени распространения: затем с помощью датчиков измеряется время, за которое акустическая волна проходит через материал от точки генерации до точки регистрации. Это время даёт возможность рассчитать скорость звука в материале с учетом известного расстояния между датчиками.

3. Расчет скорости звука: зная время распространения звука и расстояние между датчиками, можно рассчитать скорость звука в материале по формуле $v = d / t$, где v - скорость звука, d - расстояние между датчиками, t - время распространения звука.

Этот метод широко используется для измерения скорости волн в различных материалах, так как он относительно прост в реализации и обеспечивает точные результаты.

1.3 Акустико-эмиссионные методы исследования

1.3.1 Акустическая эмиссия

Акустическая эмиссия является надёжным свидетельством процессов разрушения в твёрдом упругом теле и лежит в основе разнообразных методов неразрушающего контроля целостности объектов. Акустическая эмиссия возникает вследствие спонтанного выделения накопленной в некотором объекте

энергии деформаций в результате необратимых процессов разрушения, обусловленных внешними воздействиями. Выделение энергии действует как источник возбуждения для распространения упругих волн, которые могут быть зарегистрированы на поверхности изучаемого объекта и подвергнуты анализу.

Преимущество метода акустической эмиссии состоит в возможности проведения неразрушающего контроля образца керна за один цикл нагружения, при этом не требуется дорогой и трудоемкой процедуры томографического сканирования всего объекта. Достаточно специальным образом расположить датчики на поверхности керна и записать колебания, обусловленные процессами разрушения внутри образца. Эти колебания порождаются появлением и развитием микро- и макротрещин, схлопыванием микропор, трением уже существующих и возникающих новых поверхностей разлома друг о друга, другими локальными динамическими перестройками структуры образца. Принцип исследования остается тем же: образец горной породы подвергается различным механическим воздействиям. В результате такого воздействия, в образце возникает напряженно-деформированное состояние, сопровождаемое частичным или полным разрушением, что и приводит к акустической эмиссии.

Широкое распространение методов акустической эмиссии для изучения керна обусловлено наличием современных установок для лабораторных исследований, снабженных многоканальными системами регистрации.

Характерной особенностью проведения лабораторного петрофизического эксперимента является необходимость исследования акустических и прочностных свойств образца именно в пластовых условиях, соответствующих условиям залегания на глубине. Существующее оборудование иностранного производства GCTS, MTS, TerraTek, Autolab, которое закупалось в предыдущие десятилетия для нужд исследовательских центров нефтяных и сервисных компаний, в основном рассчитано на создание пластовых условий по давлению до 70 МПа и по температуре до 130 °С. Несмотря на то что некоторые

производители в своих рекламных материалах заявляют о возможности эксплуатации разных компонентов данного оборудования до 150 °С или даже до 200 °С, опыт работы с оборудованием в эксплуатирующих организациях показал, что зачастую, уже после 120 °С при пластовых давлениях, акустические датчики выходят из строя из-за потери прочности клеевого соединения между пьезопластиной и корпусом датчика. Кроме того, при попытке использовать акустические плунжера на которые крепятся пьезопластины, снабжённые массивным керамическим демпфером, для слома образца происходит отрыв демпфера массы от пьезопластин, по клеевому соединению. Демпфер массы укорачивает цуг колебания, и поднимает амплитуду первого вступления. Но плунжерами, оборудованными демпфером массы, нельзя ломать образцы при одноосном нагружении без риска выхода из строя. Ещё одним существенным недостатком оборудования GCTS, в частности, является то, что сам плунжер непосредственно контактирующий с образцом и выполняющий функции волновода выполнен из закалённой стали, что во первых ухудшает коэффициент передачи энергии от пьезокерамики в материал плунжера из за несоответствия акустического импеданса, во вторых ухудшает передачу энергии уже из материала плунжера в исследуемый образец по той же причине. В конце концов закалённый плунжер может треснуть под нагрузкой что автор и наблюдал на одной из установок с оборудованием GCTS. Конструкционным недостатком акустических плунжеров некоторых производителей является их негерметичность к обжимному давлению, при котором гидравлическое обжимное масло, в качестве которого может использоваться трансформаторное либо силиконовое масло ПМС, проникают в сам плунжер непосредственно контактируя с пьезокерамикой. В конечном счёте это приводит к разрушению клеевого соединения и отслаиванию пьезопластины от плунжера.

Несомненным достоинством подобного иностранного оборудования является возможность комплектации производителем многоканальной системой

регистрации акустической эмиссии, до 16 и более каналов с быстрыми скоростными аналого-цифровыми преобразователями с высокой частотой дискретизации от 15 МГц и выше и разрешением в канале от 16 до 24 бит. Так оборудование компании MTS установленное в Сколково имеет подобную систему многоканальной регистрации, включающую в себя датчики акустической эмиссии, специальную манжету для образца керна диаметром 50 мм с местами для крепления датчиков, комплект коаксиальных маслостойких и термостойких проводов для подключения внутри ячейки стабилметра, необходимое количество аналоговых предусилителей, находящихся вблизи ячейки и многоканальную систему регистрации данных. Однако из-за санкционных ограничений конкретно данная измерительная система в составе гидравлического прессы и ячейки стабилметра была поставлена заказчику иностранным поставщиком без системы нагрева для создания пластовых условий.

Выводы по Главе 1

1. Для изучения скоростей распространения акустических волн в образцах керна могут применяться время-импульсные методы исследования.
2. Акустическая эмиссия является надёжно свидетельствует о начале процессов разрушения в твёрдом упругом теле и лежит в основе разнообразных методов неразрушающего контроля целостности объектов.
3. Существующее лабораторное оборудование для проведения экспериментов на образцах керна в пластовых условиях имеет как достоинства, так и недостатки. Существенным недостатком является несоответствие современным требованиям по температуре проведения экспериментов.

Глава 2. РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Особые требования к приборам и материалам для работы с образцами

Как правило, лабораторные исследования на образцах керна горных проводятся при пластовых условиях по температуре и давлению, при этом сами образцы насыщаются пластовыми флюидами. В качестве пластовых флюидов используется минерализованная вода с добавлением соли NaCl до минерализации 30 г/л и выше. А в качестве модели нефти применяется керосин. Также можно использовать и саму нефть с месторождения, с целевой глубины, откуда был взят керн, из которого и были выбурены образцы, взятые для исследования. Таким образом все материалы и узлы оборудования, непосредственно контактирующие с пластовыми флюидами, должны удовлетворять требования маслобензостойкости и коррозионной стойкости. Металлические детали выполняются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т а акустические датчики из титана. Данные металлы обладают необходимой коррозионной стойкостью при работе с пластовыми флюидами, а также необходимой прочностью для передачи осевого усилия на образец керна. Обжимная манжета выполняется в случае проведения фильтрационных экспериментов из витоновой (фторкаучуковой и перфторкаучуковой) резины, либо фторопластовой термоусадки. Так как в качестве обжимной жидкости на большинстве установок используется не только силиконовое масло ПМС-20, но и трансформаторное, являющееся достаточно агрессивным к не маслобензостойким резинам, абсолютно оправдано применение именно фторкаучука и фторопласта. Фторопластовая цилиндрическая термоусаживающаяся плёнка применяется при проведении геомеханических экспериментов.

Лабораторный петрофизический эксперимент с образцами горной породы проводится на специально сконструированном оборудовании, которое создаёт

пластовые условия для исследуемого образца или колонки образцов. Под пластовыми условиями понимаются давление и температура характерные для условий естественного залегания горных пород на целевой глубине. Так для месторождений нефти Западной Сибири, в частности Салымского месторождения характерны пластовые температуры до 130 °С; а высокие значения пластовых давлений, приведенных к абсолютной отметке -2900 м, изменяются от 26,5 до 49,9 МПа. [Нестеров И. И. и др. 1985]. При проведении петрофизических экспериментов с образцами керна горной породы, поднятыми с целевой глубины, измеряются их различные физические характеристики, в том числе такие как скорость прохождения акустических волн через исследуемый образец. По полученным в ходе измерений скоростям рассчитываются модули Юнга и коэффициенты Пуассона динамическим методом. В дальнейшем модули упругости горных пород могут быть использованы для моделирования устойчивости ствола скважины, для моделирования направления распространения трещин при проведении гидроразрыва, для других задач в соответствии с целями эксперимента физического моделирования.

2.2 Разработка блок-схемы аппаратуры для исследования упругих характеристик горных пород

Разработанная аппаратура для исследования скоростных характеристик образцов горных пород построена по следующей схеме:

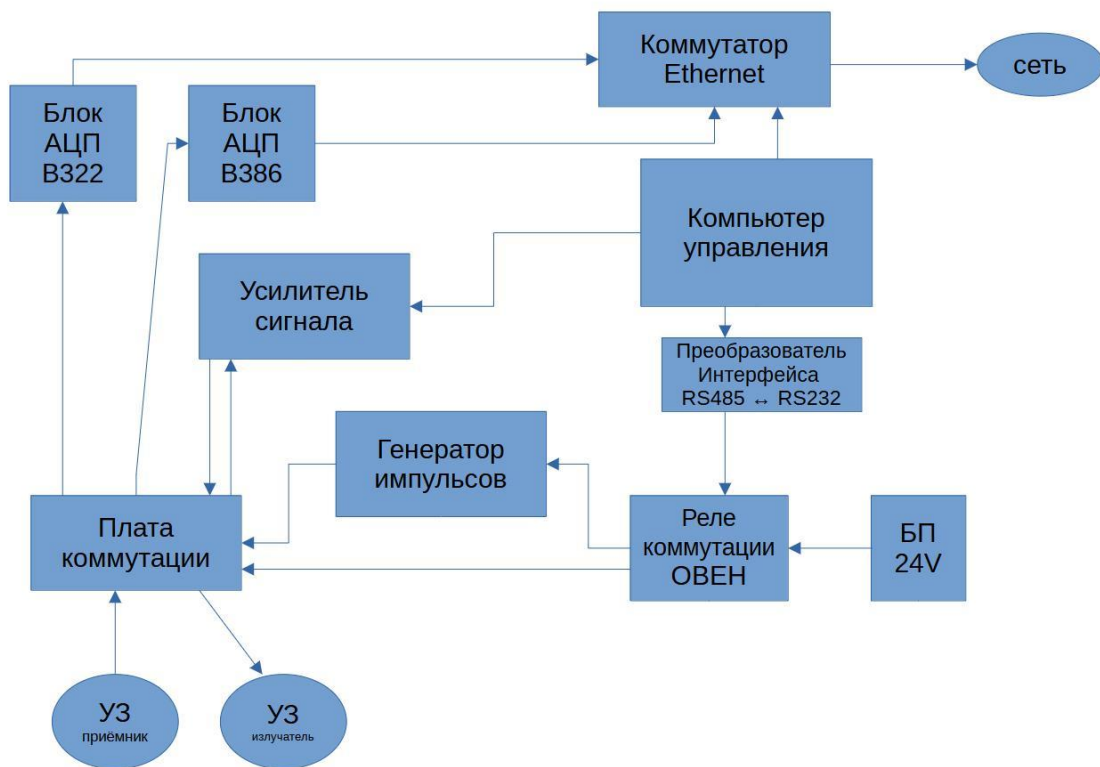


Рисунок 2.1 – Блок-схема измерительной системы.

Измерительный модуль содержит следующие узлы, обозначенные на блок-схеме:

1. Генератор импульсов
2. Плата коммутации
3. Реле коммутации ОВЕН
4. Преобразователь интерфейса RS232<->RS485 для реле ОВЕН
5. Управляющий компьютер
6. Усилитель сигнала
7. Блоки АЦП Аурис В386 и В322
8. Коммутатор Ethernet 1Gbit

Блок сбора данных выполнен в виде монтажного корпуса высотой в четыре юнита для размещения на стандартной 19-дюймовой телекоммуникационной стойки. Блок содержит разъём питания 220 вольт и разъём подключения к сети

Ethernet и два четырёхконтактных круглых разъёма Lemo для подключения к датчикам – излучателю и приёмнику акустических колебаний, размещаемых в испытательной ячейке. Рассмотрим подробнее устройство и характеристики каждого блока системы, из которых состоит модуль сбора данных.

2.3 Конструкция модуля сбора данных

2.3.1 Разработка ударно-резонансного генератора импульсов возбуждения пьезопреобразователя

Назначение источника питания, генерирующего высоковольтный импульс для питания пьезокерамического излучателя – передавать электрическую энергию для возбуждения механических колебаний в электромеханическом пьезокерамическом преобразователе. Энергия передаётся в виде электрического импульса наиболее схожего по форме с импульсом Берлаге (см. рис. 2.4). Источник можно выполнить по различным электрическим схемам для формирования импульсов различной формы, в частности известен источник формирующий прямоугольный однополярный импульс с длительностью равной половине периода возбуждения пьезопреобразователя на резонансной частоте. Известен источник формирующий двуполярный импульс на резонансной частоте пьезопреобразователя, а также ударный источник, возбуждающий остроконечный широкополосный импульс отрицательной полярности, в основном используемый для возбуждения высокочастотных излучателей от 10 МГц и более. Источник, разработанный автором совместно с подрядчиком, можно назвать ударно-резонансным, он формирует, как и ударный источник - затухающий импульс, но на резонансной частоте целевой моды излучения пьезопреобразователя, таким образом препятствуя возбуждению других паразитных резонансных мод. Схема источника приведена ниже, перед его проектированием была исследована работа данной схемы в двух программных пакетах для моделирования электросхем, и для сравнения с модельными

данными ниже на (рис. 3.6) приведена осциллограмма реального сигнала, формируемого данным источником колебаний.



Рисунок 2.2 – Источник питания пьезоэлектрического излучателя

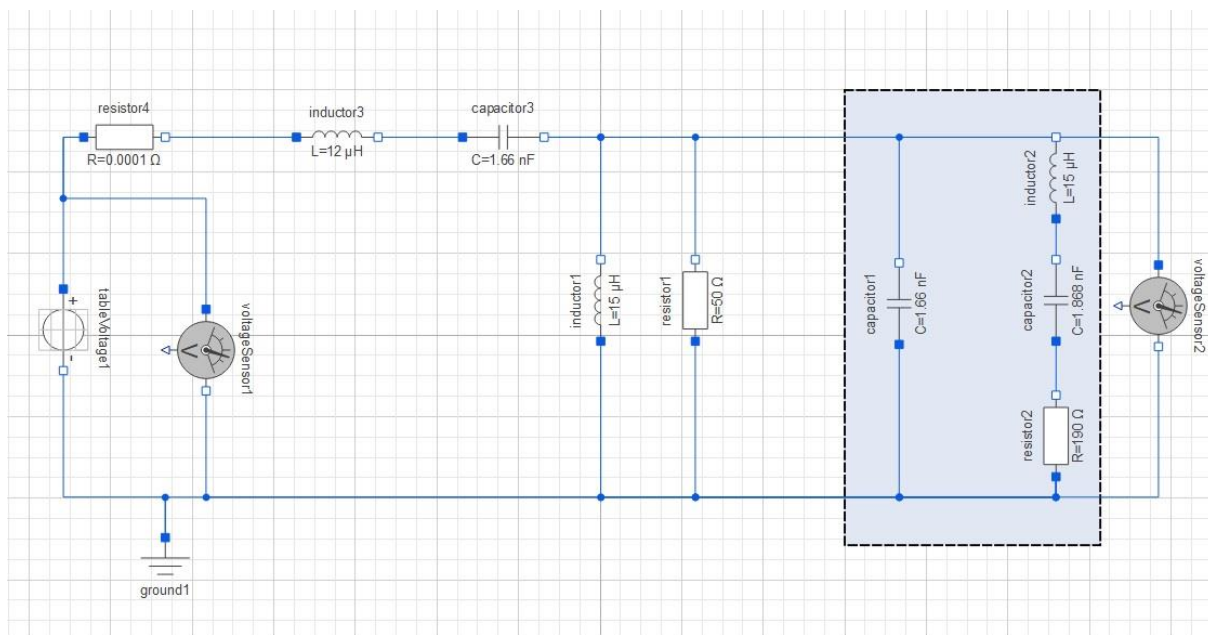


Рисунок 2.3 – Электрическая схема источника и схема замещения пьезокерамического излучателя [Анчугов, 2021].

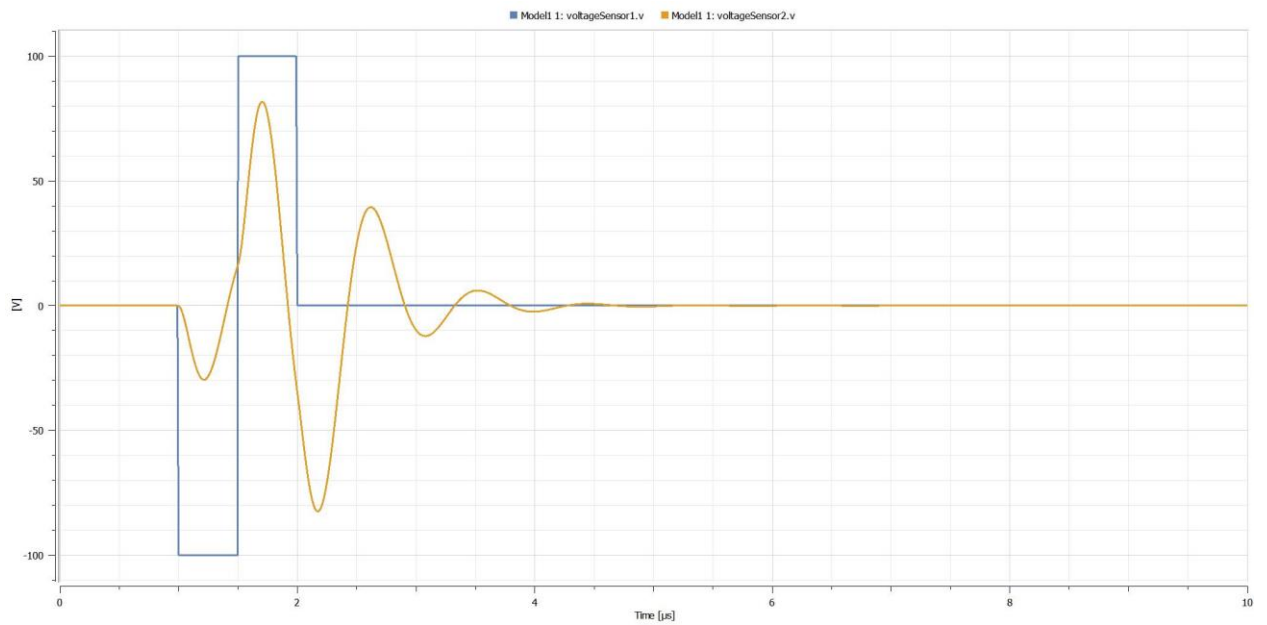


Рисунок 2.4 – Форма питающего импульса, смоделированного в среде Wolfram SystemModeler.

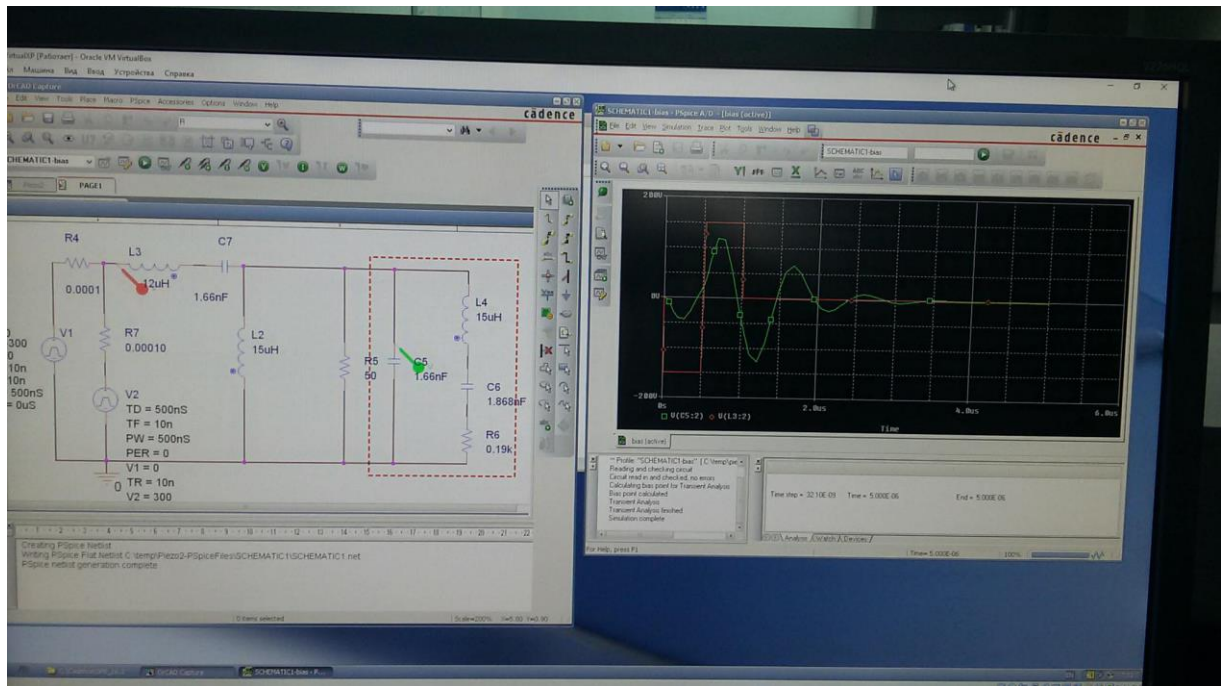


Рисунок 2.5 – Схема источника и моделирование его работы в среде OrCAD, симулятор PSpice [Анчугов, 2021].

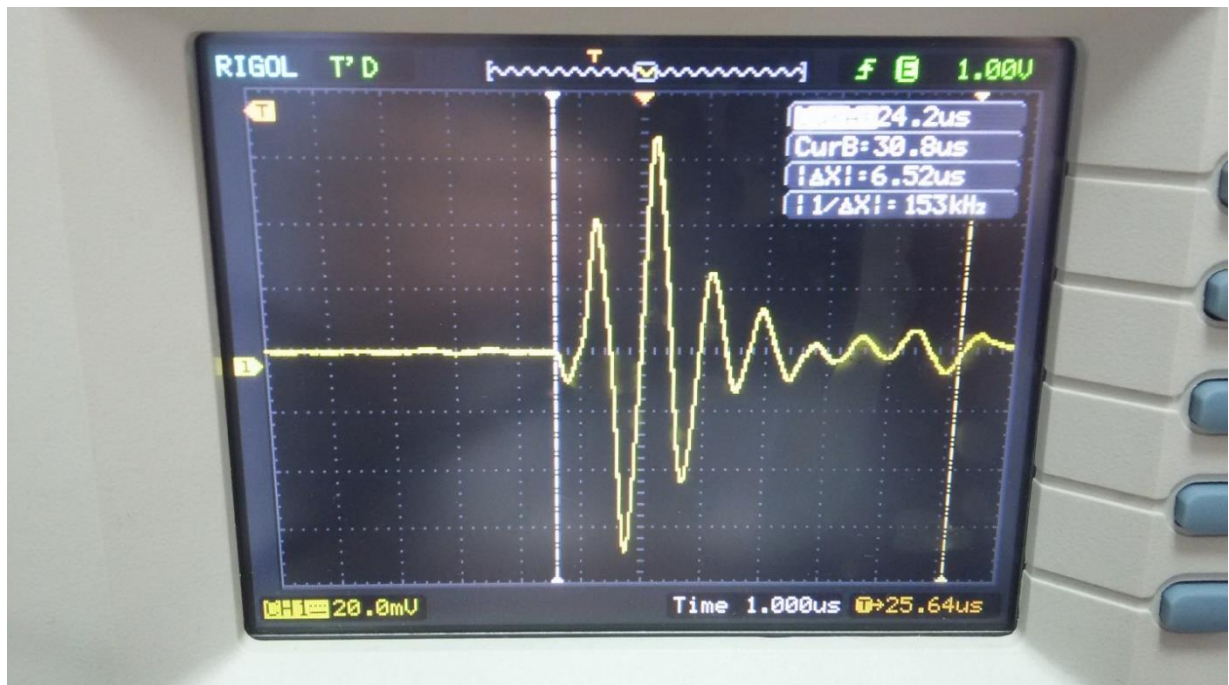


Рисунок 2.6 – Реальный сигнал источника, прошедший через образец керна горной породы, зафиксированный осциллографом Rigol DS1102 [Анчугов, 2021].

Источник двухканальный, формирует импульсы независимо в двух каналах, что обеспечивает работу на отличающихся частотах отдельно, к примеру для продольной и поперечной волн. В данных экспериментах частоты в обоих каналах были одинаковые и равнялись 1 МГц. Амплитуда выходных колебаний источника регулируемая и плавно настраивается вручную в диапазоне 50–150 вольт и получается повышением с 12 вольтового первичного источника питания с ограничением тока потребления. Вместе с началом выходного импульса формируется сигнал синхронизации амплитудой 10 вольт для запуска блока АЦП, регистрирующего принятый сигнал. Параллельно пьезокерамическому излучателю в источнике через внешний переключатель можно подключить резистор, выполняющий функцию электрического демпфера, номиналом 50 либо 200 Ом. Управление работой источника происходит с помощью внешнего реле с сухим контактом, которое определяет какой из каналов источника работает в текущий момент. Сигнал синхронизации формируется только во время работы источника в соответствующем канале. Выполненный по такой схеме источник очень прост и безопасен как для персонала, так и для электронного оборудования установки.

2.3.2 Разработка усилителя акустического сигнала с цифровым интерфейсом управления



Рисунок 2.7 – Предварительный усилитель сигнала.

Прошедший через образец акустический сигнал попадает в датчик (приёмник) сигнала и усиливается предварительным усилителем. Он подключается непосредственно к приёмному пьезопреобразователю. Усилитель выполнен по классической двухкаскадной схеме усиления заряда, но с цифровым потенциометром в цепи обратной связи. Усилитель разработан по техническому заданию автора подрядчиком и под его непосредственным контролем. Для управления работой усилителем и регулировки усиления в диапазоне $-20 +40$ Дб используется микроконтроллер, для которого автором разработан протокол обмена данными с простой системой команд для связи с управляющим компьютером через драйвер на языке Python для ОС Debian Linux

и Астра Линукс. Усилитель подключается к компьютеру по стандартному интерфейсу RS232 и имеет защиту от высокого напряжения по всем входам. Имеет два независимых канала с отдельной регулировкой усиления и может запоминать установленное значение усиления после отключения питания. Рабочая полоса частот усилителя от 0 Гц примерно до 5 МГц. Не предполагалась работа с сигналами более высоких частот при проектировании предварительного усилителя. Так на частотах 2 МГц затухание сигнала в усилительном тракте составляет 6 dB по сравнению с сигналом частотой 1 МГц.

2.3.3 Разработка платы коммутации сигналов

Для переключения аналоговых сигналов источника и приёмника автором разработана плата коммутации.



Рисунок 2.8 – Плата коммутации аналоговых сигналов.

Разработка электрической принципиальной схемы, показанной на (рис. 2.9).

Плата управляется с помощью реле Овен, и содержит набор электромагнитных реле и разъемов BNC для подключения коаксиальных кабелей. Плата связывает между собой источник акустических колебаний, излучающую пьезокерамику, приёмную пьезокерамику, предварительный усилитель и блоки АЦП. Также она коммутирует сигнал синхронизации от источника до блоков АЦП. Плата

коммутации отвечает за текущий путь сигналов и тип излучаемой волны (Р волна, S1, S2, S1+S2) а также делает возможным коммутировать схему для регистрации сигналов акустической эмиссии в 2-х канальном режиме, когда и излучающая и приёмные пьезопластины датчиков переходят в приёмный режим, и подключаются через предварительный усилитель ко входу АЦП В386 повышенного разрешения имеющего режим работы непрерывного регистратора. Для разработки платы была использована открытая общедоступная среда разработки электронных схем и печатных плат KiCAD.

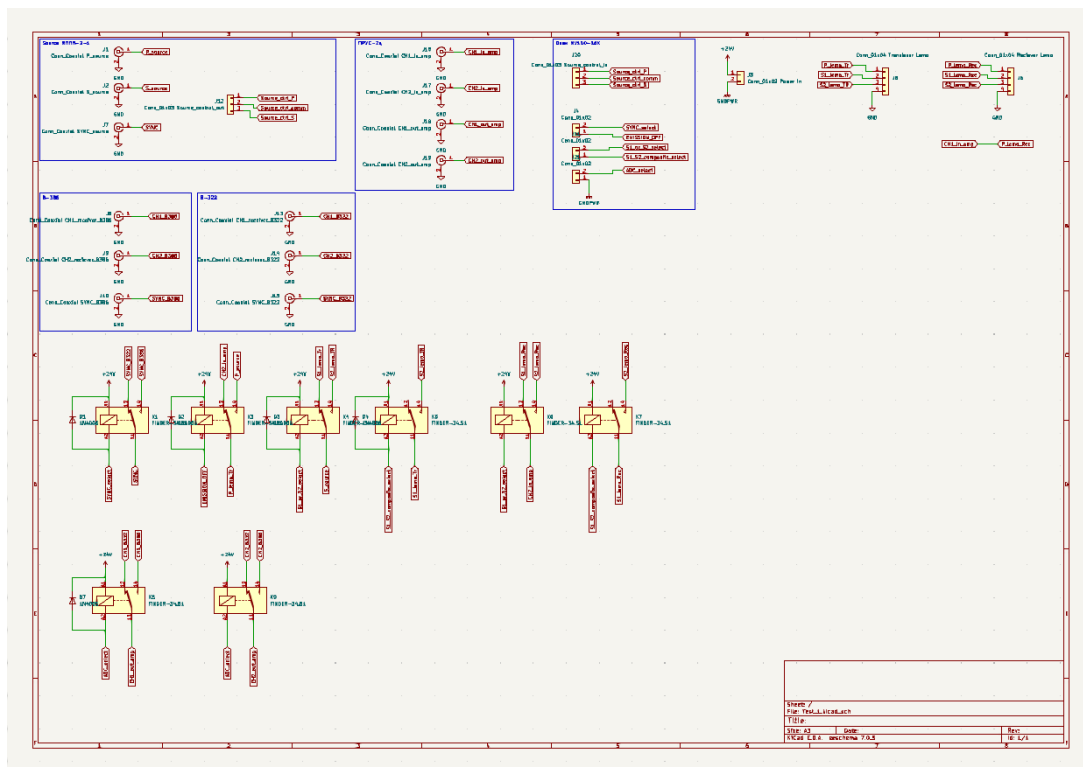


Рисунок 2.9 – Электрическая принципиальная схема платы коммутации.

Расположение элементов на печатной плате и оптимальная трассировка электрических соединений для снижения уровня шумов осуществляется вручную. Для удобства последующего монтажа и эксплуатации уже собранного изделия, на плате были размещены необходимые надписи для облегчения сборки и коммутации коаксиальных проводов.

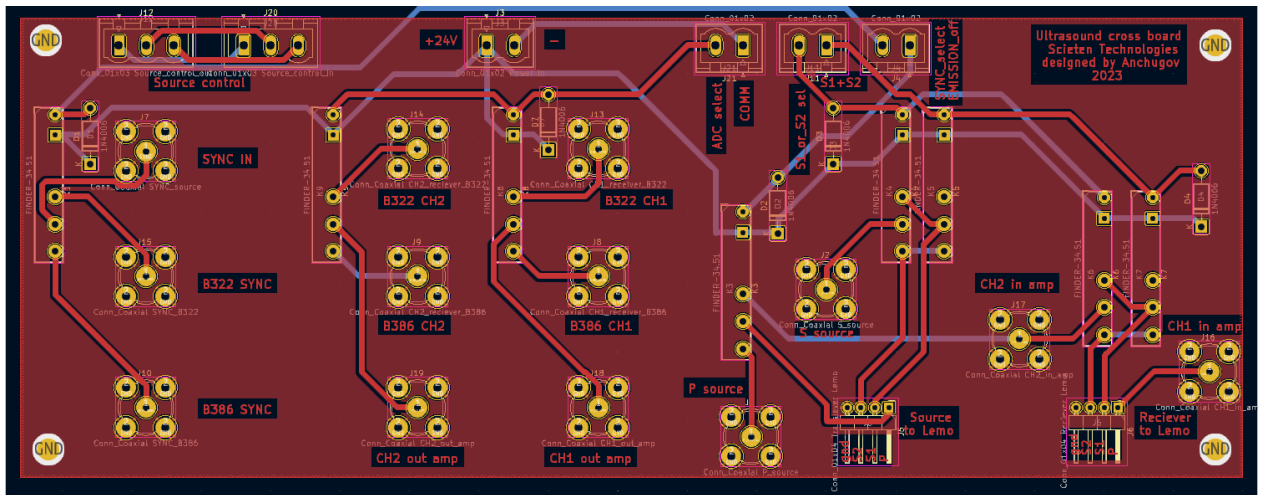


Рисунок 2.10 – Разводка дорожек на плате коммутации в среде KiCAD.

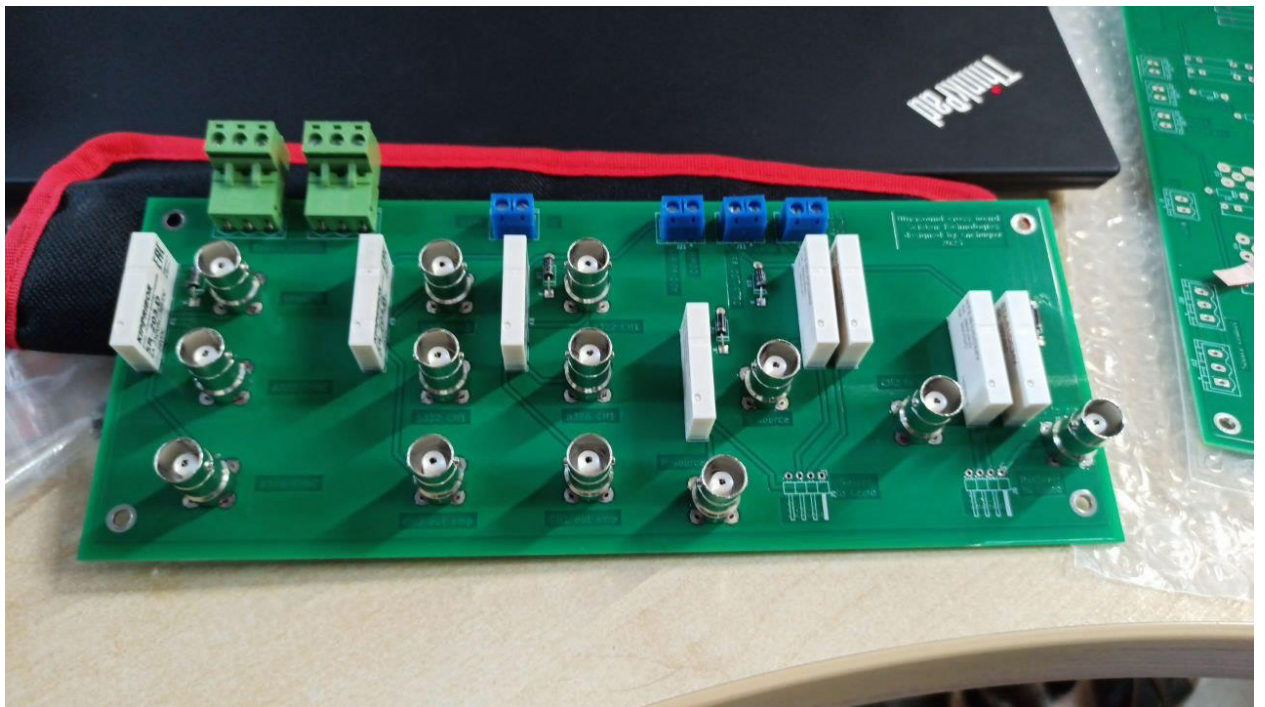


Рисунок 2.11 – Сборка платы коммутации.

Монтаж электронных компонентов и соединительных разъёмов на плате осуществляется с помощью пайки также вручную. Разработано несколько модификаций коммутационной платы для проведения различных экспериментов, так один из вариантов платы позволяет дополнительно подключать к корпусу акустических датчиков внешний RLC-метр (измеритель импеданса) для проведения фильтрационного эксперимента и контроля текущей

водонасыщенности образца. При этом осуществляется выбор режима работы: акустические измерения либо измерение удельного электрического сопротивления образца.

2.3.4 Управляющий компьютер

В качестве управляющего компьютера используется недорогой неттоп (компактный компьютер) Lenovo m90Nano с небольшими ресурсами. Размер оперативной памяти 4 Гб, размер SSD диска 128 Гб. Применяется открытая операционная система Debian Linux не требовательная к ресурсам, что позволило снизить стоимость решения. Также возможно применение отечественной операционной системы Астра Линукс, так как она сделана на базе Debian Linux, и имеет те же программные пакеты. Была проведена установка и настройка операционной системы, и установка необходимых пакетов для работы с периферийными устройствами, а также установка графических библиотек для разработки графического приложения для управления работой модуля.

2.3.5 Стандартные блоки

Блоки АЦП

Для оцифровки усиленного акустического сигнала используются в зависимости от исполнения оборудования два покупных блока аналого-цифрового преобразования «Аурис Альма Метр» производства НПК «Аурис», Беларусь. АЦП В322 представляет собой двухканальный осциллограф с максимальной частотой дискретизации 200МГц, со входом внешней синхронизации и глубиной оцифровки входного сигнала 12 бит. Данное АЦП применяется для работы с ультразвуковыми датчиками в активном режиме, то есть в режиме прозвучивания образца. Дополнительно возможно установить АЦП В386. Это цифровой регистратор, который имеет также два канала и режим

осциллографа до частот дискретизации 100 МГц с глубиной 16 бит, но основное его назначение — это непрерывная оцифровка сигнала с частотами до 10 МГц. Данный регистратор используется для записи сигналов акустической эмиссии. Для обоих блоков АЦП, автором и его коллегой В. Силутиной, были разработаны драйвера по документации производителя для работы с операционными системами Debian Linux и Astra Linux. Оба блока АЦП оборудованы цифровым интерфейсом 1 Gb Ethernet.



Рисунок 2.12 – Блоки АЦП Аурис Альмаметр В322 и В386.

Преобразователь интерфейса

Преобразователь интерфейса RS232 <-> RS485 является стандартным покупным устройством и необходим для электрического преобразования уровня сигнала для подключения реле Овен к управляющему компьютеру.

Коммутатор Ethernet

Так же является стандартным покупным устройством и необходим для объединения в сеть управляющего компьютера и блоков АЦП В322 и В386.

Блок реле Овен МУ110К

Покупной модуль заводского изготовления компании ООО «Производственное Объединение Овен», содержит 16 дискретных выходных каналов управления типа “открытый коллектор” и используется для непосредственного управления работой источника акустических колебаний, а также для коммутации платы реле, переключающей аналоговые сигналы и сигналы синхронизации. Для устройства автором был установлен и настроен драйвер на языке Python для работы с ОС Debian Linux и Астра Линукс. Релейный модуль подключается к управляющему компьютеру через интерфейс RS485 и принимает команды по протоколу MODBUS.

Будучи собранными в одном корпусе все описанные блоки и образуют модуль сбора данных.



Рисунок 2.13 – Модули различных модификаций для регистрации акустических волн производства ООО «Ситен Технологии».

2.4 Проектирование, описание программной части и принцип работы прибора

Модуль сбора акустических данных, блок схема которого описана в предыдущем подразделе состоит из стандартных покупных изделий и узлов, а также разработанных автором либо при его непосредственном участии. При разработке использовалось открытое программное обеспечение, управляющий компьютер так же работает под управлением открытой ОС Linux Debian.

Рассмотрим подробнее работу системы в целом. На управляющем компьютере запускается скрипт Manager.py (программа управления),

написанный на языке программирования Python, данная программа имеет графический интерфейс управления.

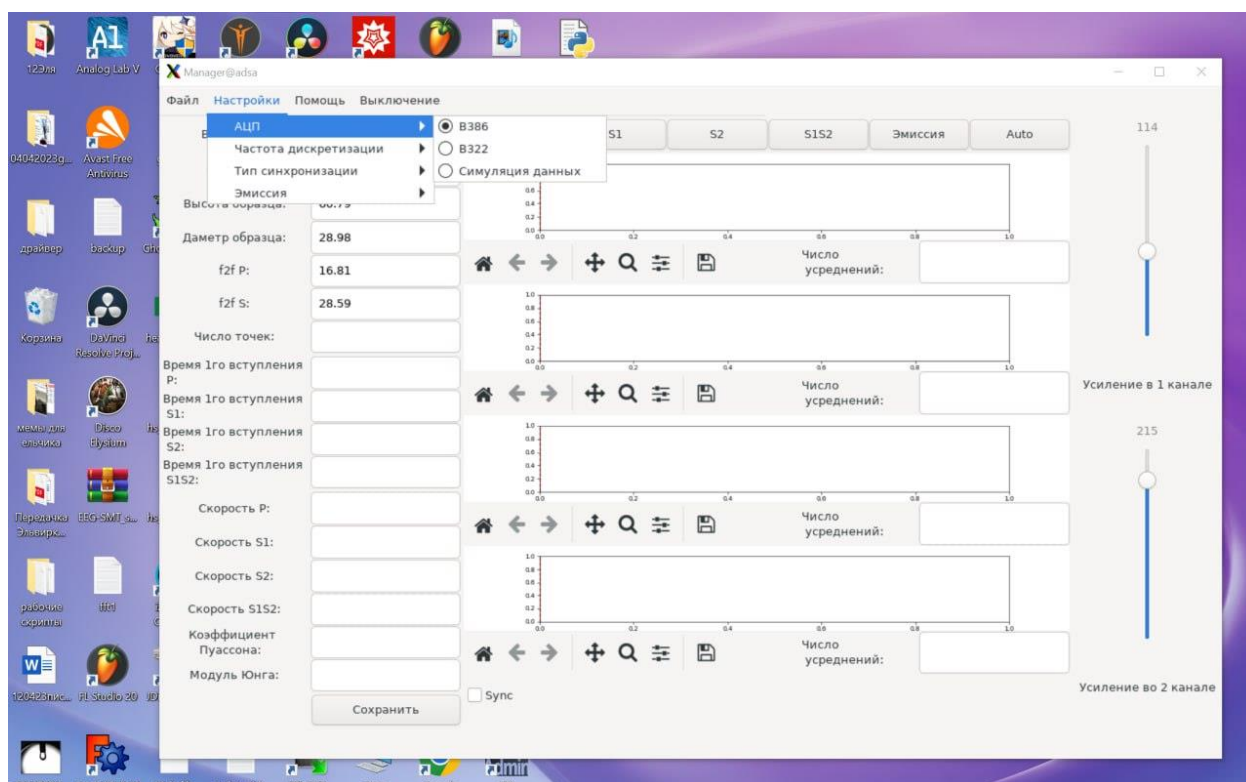


Рисунок 2.14 – Внешний вид интерфейса управления системой сбора акустических данных. Программа разработана в соавторстве с В. Силютиной.

Программа управления позволяет выбрать блок АЦП, его частоту дискретизации, выбрать режим работы, тип излучаемой и регистрируемой волны: Р волна, S1 волна, S2 волна, S1+S2 комбинированная волна, либо режим регистрации сигналов акустической эмиссии. Программа управления даёт возможность выбрать количество накоплений сигналов, отобразить на экране зарегистрированные сигналы, установить прямо на сигнале отметку первого вступления, регулировать усиление предварительного усилителя через цифровой интерфейс управления. Также программа управления предоставляет возможность сохранять зарегистрированные сигналы в формате csv. Программа управления имеет открытый код и допускает модификацию под определённые задачи и нужды эксперимента. Также программа имеет консольную версию без

графического интерфейса, данная версия создана для целей автоматизации и предназначена для автоматизации регистрации сигналов Р и S волн в течении всего хода эксперимента. Формат хранения зарегистрированных данных может быть также изменён для удобства последующей обработки. Периодичность сбора данных в автоматическом режиме настраивается программно.

При создании программы управления использовался опыт работы автора с подобными системами регистрации сигналов иностранного производства. Программное решение получилось универсальным для регистрации акустических данных как в ходе фильтрационного эксперимента по вытеснению нефти из образца керна, так и при проведении геомеханического эксперимента до разрушения образца керна. Меняются только акустические плунжера с ультразвуковыми датчиками. Их конструкция будет описана в следующем разделе.

После выбора типа волны, к примеру продольной Р волны, и установки уровня усиления, регулируя движок в правой части интерфейса, программа управления через драйвер реле Овен осуществляет коммутацию аналоговых сигналов таким образом что излучающая Р пьезокерамика оказывается подключенной к первому каналу источника акустических колебаний, а приёмная пьезокерамика подключается ко входу номер один предварительного усилителя. В зависимости от того какой блок АЦП выбран в настройках программы, выход с предварительного усилителя подключается ко входу выбранного АЦП, то же самое происходит и с сигналом синхронизации, он подключается от источника колебаний ко входу синхронизации соответствующего блока АЦП. Далее даётся разрешение на работу источника акустических колебаний, начинает формироваться синхросигнал для АЦП, и блок АЦП запускает процедуру сбора выбранного количества точек данных. Происходит регистрация данных, отображение их на экране и запись в файл. Далее процесс повторяется либо для того же типа волны ещё раз, либо уже для другого типа волны.

2.5 Акустическая измерительная система

Акустическая измерительная система включает в себя помимо собственно измерительной системы, состоящей из модуля сбора данных и управляющего программного обеспечения, акустические плунжера (датчики). В данном разделе обзорно остановимся на задачах, которые решаются акустическими плунжерами и принципах, используемых при их проектировании и расчётах параметров.

Основное назначение акустического плунжера – разместить внутри него акустический датчик с чувствительным элементом из пьезокерамики. Пьезокерамические чувствительные элементы могут иметь сложную форму и составляют пьезокомпоновку состоящую из нескольких пьезопластин с разными видами поляризации, возможно с разными частотами, геометрически размещаемыми на плунжере как вертикально, так и горизонтально. Вертикальная пьезокомпоновка наиболее распространена в оборудовании иностранного производства и состоит из трёх пьезопластин, одной поляризованной продольно и двух поляризованных поперечно, при этом развёрнутых на угол 90 градусов одна относительно другой. Вертикальная пьезокомпоновка обладает как достоинствами, так и недостатками. Основное достоинство вертикальной компоновки – максимальная площадь пьезопластины, соответственно и малый угол расхождения луча, и его большой геометрический размер, что обеспечивает относительно неплохой принятый сигнал в приёмной пьезокерамике. Вместе с тем есть и неудобства. Так путь, пройденный волнами от трёх разных пьезопластин, также будет различным. Следовательно, понадобится произвести калибровку три раза. Качество сигнала от самой верхней пьезопластины определяется не только объектом исследования (образцом керна) но и качеством соединения пьезопластин между собой.

Горизонтальная пьезокомпоновка, когда все пьезопластины размещаются в одной плоскости так же, обладает как преимуществами, так и недостатками. Так

длина пути пройденной волнами от разных пьезопластин всегда одинакова. Полезная площадь площадки для монтажа пьезопластин делится между всеми пластинами с различными видами поляризации. Следует отметить, что горизонтальная пьезокомпоновка является более технологичной и проще в изготовлении, обладает хорошей повторяемостью свойств и что важно гораздо большей стойкостью к разрушению при проведении геомеханических экспериментов до разрушения образца керна горной породы. Линейный размер плунжера, к которому крепится пьезокерамика определяет временную задержку распространения акустического импульса от пьезопластины к границе плунжер-образец. Этот размер определяется эмпирическим правилом работы в дальней зоне, либо хотя бы в переходной зоне, так в материале плунжера, образующем волновод должно укладываться 3–5 длин волн, в идеале 7-9 длин волн. Назначение такого волновода не только обеспечить хороший акустический контакт как пьезопластины к плунжеру и плунжеру к образцу, так и выступить в качестве линии задержки для паразитных продольных волн, излучаемых в среду при работе поперечно поляризованной пьезопластины. Такие волны помехи должны пространственно отделиться от основной поперечной волны, и не наложиться на результирующее колебание для надёжного определения времени первого вступления поперечной волны. [Анчугов, 2023]. В этом случае первое вступление достаточно чётко определяется вручную экспериментатором, либо могут использоваться алгоритмы автоматического определения первого вступления волны такие как алгоритм Байера-Крадольфера [Анчугов, 2023] или более сложные алгоритмы аналогичного назначения.

2.6 Определение скорости акустических волн в образцах

Определение скорости акустических волн начинается с калибровки времени прохождения волн через волноводы акустических плунжеров. Для этого приёмный плунжер с датчиком прижимается непосредственно к излучающему

плунжеру и производится замер времени распространения волн. При этом необходимо снять все три времени прихода волн, то есть время прихода продольной волны, и времена прихода обоих поперечных волн. В случае горизонтальной пьезокомпоновки времена прихода волн S_1 и S_2 будет одинаковым. Так как S_1 и S_2 различаются только тем, что пластины физически развёрнуты друг относительно друга на 90 градусов. После проведения процедуры калибровки, такую процедуру ещё называют измерением времени face-to-face, можно переходить к измерениям непосредственно на образцах. Тестовый образец с известной скоростью, изготовленный из титана, оргстекла, нержавеющей стали или алюминия, либо керн горной породы помещается между акустическими плунжерами и помещается в измерительную ячейку. В случае фильтрационного эксперимента такой ячейкой является кернадержатель системы Хасслера (с гидродомкратом) (см. рис. 3.12). В случае установки изучения геомеханических свойств ячейка стабилметра с горизонтальной загрузкой образца. Разница только в форме плунжеров, типе используемой манжеты и количестве подключаемых гидравлических линий подачи порового давления. При проведении атмосферных исследований при комнатных температурах и давлениях манжета не применяется, а используется пресс обеспечения небольшого осевого усилия на исследуемый образец.

Далее образец подвергается некоторому осевому и обжимному усилию до наблюдения чётких сигналов с хорошо выделяемых временами первого вступления. Образцы таких сигналов приведены в следующей главе. В графическом интерфейсе управляющей программы с помощью манипулятора мышью на соответствующем графике кнопкой мыши ставится отметка времени первого вступления на первом срыве графика колебаний. При этом измеряется время прохода соответствующей волны с учётом нулевого времени (калибровочного времени или времени face-to-face). Особо следует отметить некоторую субъективность снятия времени первого вступления волн, в ручном

режиме, зависящее от мастерства экспериментатора. Одна из целей преследуемой автором при создании данного измерительного комплекса это обеспечить измерение сигналов достаточного качества для однозначного выделения времени первого вступления в ручной режим.

Выводы по Главе 2

1. Для измерения времени распространения акустических волн через образец керна и регистрации сигналов акустической эмиссии требуется иметь необходимую измерительную систему, которая и была разработана автором.
2. Данная измерительная система состоит из источника акустических колебаний, датчиков (излучателя и приёмника), усилителя принятого сигнала, блока аналогово-цифрового преобразования и компьютера для управления системой и регистрации данных.
3. Для системы управления сбором данных использована открытая ОС Linux Debian, а в качестве языка программирования выбран Python. Драйвера для работы с блоками АЦП написаны на языке C/C++.

Глава 3. АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ИХ КОНСТРУКЦИЯ

3.1 Общие требования к источникам и приемникам колебаний для работы с образцами керна

Требования к источникам и приёмникам колебаний уже были изложены в предыдущих главах, рассмотрим их подробнее. В основном это температурные свойства материала, геометрические размеры и защита от внешней среды.

Источник и приёмник, являясь электромеханическими преобразователями должны устойчиво работать при высоких температурах вплоть до половины температуры точки Кюри для пьезокристаллов. Температура точки Кюри, в среднем для используемых автором типов пьезопреобразователей (материал ЦТС) находится около 350 °С. Реальные температуры в нефтяных и газовых скважинах на территории Российской Федерации как правило не превышают 130–135 °С, к примеру на Салымском месторождении температуры на забое достигают 130 °С. В то же время на территории Китая температура на забое может достигать 200 °С. После достижения половины температуры Кюри пьезокристалл начинает терять поляризацию. Это не значит, что он потеряет пьезоэлектрические свойства мгновенно, но он начнёт деградировать со скоростью прямо пропорциональной росту температуры выше точки Кюри. Вторая особенность связана, собственно, с нагрузкой на пьезокристалл. Так как исследуемый образец находится под нагрузкой в виде осевого и обжимного давления, пьезокристалл датчика не должен контактировать с образцом. В качестве жидкости, насыщающей образец могут использоваться слабые растворы кислот. Таким образом все пьезокристаллы закрепляются на датчике так чтобы быть изолированными от прямого воздействия осевого и обжимного усилия, а также воздействия поровых жидкостей. Рабочие частоты пьезокристаллов выбираются в соответствии с условиями эксперимента, в зависимости от размера образца. Так для геомеханических и фильтрационных экспериментов частоты находятся в диапазоне 500 кГц – 1 МГц. Линейные размеры пьезокристаллов должны быть

хотя бы в 3–4 раза больше длины волны основной колебательной моды (продольной или поперечной). При нарушении данного условия пьезокристалл будет излучать паразитные колебания на своих неосновных колебательных модах с частотами близкими к основной рабочей частоте и соответственно излучать волны, являющиеся помехами.

3.2 Экспериментальный анализ различных способов демпфирования пластинчатых пьезопреобразователей

При возбуждении пьезоэлемента электрическим импульсом на резонансной частоте он начинает механически колебаться. Чем выше механическая добротность Q элемента, тем, с одной стороны, выше чувствительность в режиме приёма, но тем и дольше колеблется пьезоэлемент продолжая излучать механические колебания. Для разработки датчиков для наших целей, желательно чтобы пьезоэлемент излучал короткий хорошо различимый цуг колебаний, иногда называемый в иностранной документации на готовые датчики для дефектоскопических исследований канонической формой импульса. Время, в течение которого пьезопластина успокоится и полностью закончит излучать можно искусственно уменьшать с помощью механического демпфирования. Такое демпфирование осуществляется с помощью приклейки дополнительной массы на заднюю сторону пьезопластины, обращённую наружу. Демпфер расширяет спектр излучаемого пьезопластиной сигнала, при этом сам сигнал сжимается во времени, и амплитуда первого вступления волны возрастает.

Автором были проверены различные способы механического демпфирования пьезопластины, для этого был собран испытательный стенд с разными демпферами массы (см. рис. 3.1) [Анчугов, 2021]. В стенде сравнивались различные материалы демпферов и различные способы демпфирования колебаний пьезопластины. Слева на права, на рисунке конический титановый

демпфер, латунный демпфер, керамический демпфер, активный демпфер с пьезопластиной работающей в противофазе к основной излучающей, и контрольный образец без демпфирования. Проверялись различные материалы с разной степенью согласования по акустическому импедансу с излучающей и приёмной пьезопластинами. Зафиксировано различное влияние материала демпфера на перераспределение энергии в цуге колебания. Вместе с тем замечено, что любое демпфирование ослабляет зарегистрированный сигнал.

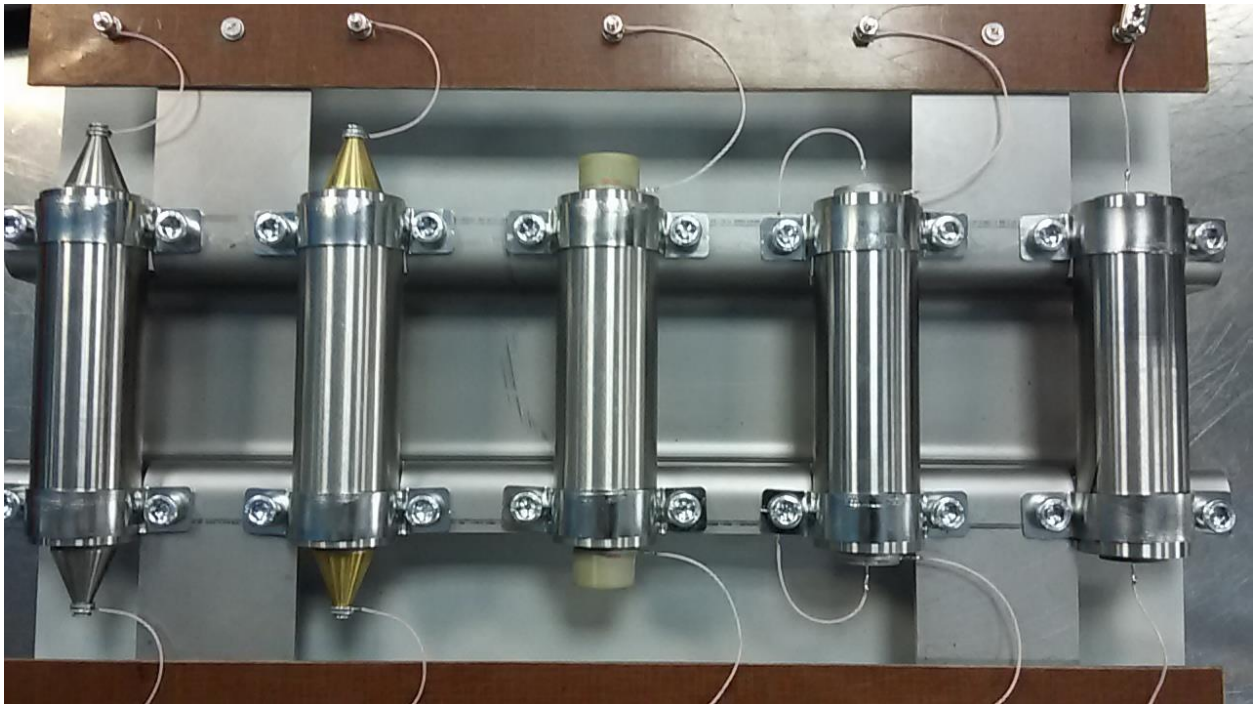


Рисунок 3.1 – Стенд для испытания различных конструкций демпфера.

Ниже сигнал на титановом образце без демпфера.



Рисунок 3.2 – Сигнал на контрольном образце без демпфирования.

Несмотря на то, что применение демпфера массы перераспределяет энергию в цуге колебаний таким образом, что амплитуда первого вступления несколько возрастает, при этом максимальная амплитуда колебания в цуге уменьшается, есть ещё одна сложность. При нагружении образца до разрушения во время эксперимента, когда осуществляется регистрация в том числе и сигналов акустической эмиссии, любая дополнительная масса, приклеенная на пьезопластину приводит либо к отрыву пьезопластины от датчика, либо отрывается сама от пьезопластины, что неоднократно наблюдалось на датчиках в оборудовании иностранного производства, которое приходило к автору на ремонт.



Рисунок 3.3 – Отрыв вертикальной компоновки пьезопластин от волновода на оборудовании Autolab. Волновод находится в нижней части рисунка, оторванная пьезокомпоновка лежит внутри верхней крышки датчика [Анчугов, 2021].

Таким образом для проведения геомеханических экспериментов на образцах горной породы до их разрушения применение демпфирования пьезопластины для улучшения акустического сигнала нецелесообразно вследствие резко возрастающего риска отрыва либо демпфера, либо самой пьезокомпоновки от датчика.

В свете вышесказанного, требуется разработать конструкцию пьезоакустических датчиков для измерения времени прохождения акустических волн, а также сигналов акустической эмиссии через образец керна горной породы при геомеханических исследованиях до разрушения образца. Также

требуется разработать систему регистрации данных. При этом акустические датчики должны быть работоспособны во всём диапазоне целевых (пластовых температур) и давлений. Температура как минимум 150 °С (желательно выше), давление не менее 70 МПа. Датчики должны выдерживать многократный слом керна без разрушения пьезокомпоновки.

3.3 Работа пьезопреобразователя в режиме излучения

Пьезопреобразователь в режиме излучения работает за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта. К металлическим обкладкам пьезопластины прикладывается высокое напряжение, размах которого может достигать значений 300 вольт. Сам электрический сигнал может иметь различную форму, как уже было указано ранее, автор использовал источник питания формирующий импульс приближенный по форме к импульсу Берлаге (см. рис. 2.3). При работе пьезопреобразователя в режиме излучения, для достижения максимально эффективного преобразования электрической энергии в механические колебания и излучения их в среду, пьезопластина должна работать на своей резонансной частоте. При этом должно выполняться условие согласования материала пьезопластины по волновому сопротивлению (акустическому импедансу) с материалом волновода, куда непосредственно вводится энергия колебаний. Для пьезокерамики ЦТС-19 волновое сопротивление составляет около 30 [$10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$]. Материалом волновода был выбран титан, он имеет практически идеальное из возможных согласованное волновое сопротивление для материала, непосредственно контактирующего с пьезопластиной, что гарантирует наиболее эффективную передачу энергии в сам материал волновода. Его волновое сопротивление составляет 27 [$10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$]. На акустическом датчике находится несколько пьезопреобразовательных пластин с различными направлениями вектора поляризации, которые обычно не работают одновременно. А в зависимости от конкретного режима работы в конкретный момент времени

излучающей является какая-то одна пьезопластина с определённой поляризацией. Данный (активный) режим работы преобразователя в режиме излучения и обеспечивает формирование в среде волны, которая, пройдя через образец и будучи зафиксированной приёмником даёт возможность измерить время её прохождения через образец известной длины и определить скорость.

3.4 Работа пьезопреобразователя в режиме приема

Работа пьезопреобразователя в приёмном режиме происходит за счёт прямого пьезоэффекта, при котором деформация прикладываемая к пьезопластине вызывает появление зарядов на металлических обкладках, нанесённых на эту пьезопластину. Приёмная пьезопластина принимает узкополосный цуг колебаний от излучающей пьезопластины датчика в активном режиме. Приём происходит на антирезонансной частоте отличающейся от резонансной частоты излучающей пьезопластины на 3–5% в сторону увеличения. Никаких проблем для регистрации колебаний это не создаёт, просто следует отметить, как особенность работы системы излучатель-приёмник. Приёмная пьезопластина должна иметь одинаковое направление вектора поляризации с излучающей пьезопластиной для регистрации сигнала с максимально возможной амплитудой. Конструктивно и излучающий датчик и приёмный имеют одинаковую конструкцию. При работе измерительной системы в режиме регистрации акустической эмиссии оба датчика работают в пассивном режиме, то есть продольно поляризованная пьезопластина одного датчика, обычно являющегося излучателем, подключается не к источнику импульсов, а напрямую ко входу 1-го канала двухканального предварительного усилителя (усилителя заряда). Ко второму входу предварительного усилителя подключается второй датчик с приёмной продольно поляризованной пьезопластиной. Полоса регистрируемых сигналов, которые регистрирует пьезопластина в приёмном режиме, простирается от низких частот до её

антирезонансной частоты. Таким образом приёмная пьезопластина регистрирует сигналы с различными частотами и используется для регистрации сигналов акустической эмиссии, рабочая полоса частот которых в основном лежит ниже резонансной и антирезонансной частот.

3.5 Обоснование выбора рабочей полосы частот

Акустические методы исследования свойства горных пород в зависимости от масштаба исследования могут использовать волны различных поляризаций и различных частот. Так для сейсморазведки и изучения глубинных горизонтов с дневной поверхности применяются взрывные и вибрационные источники с характерными диапазонами частот первые единицы и десятки Гц. При этом глубины исследований могут достигать 3000 м и более при мощностях изучаемых пластов от 25 м и более. Для изучения акустических свойств горных пород в скважинах, пробуриваемых на нефть и газ, где расстояние источник-приёмник для различных приборов может составлять 1 м, частоты выбираются в диапазоне от 40 до 150 кГц. Для лабораторных исследований по прозвучиванию образцов с размерами первые единицы и десятки сантиметров следует использовать активные источники волн с частотами такими, которые, с одной стороны, позволят увязывать результаты измерений на образцах керна со скважинными данными, то есть частоты не должны различаться значительно из-за возможного эффекта дисперсии скорости волн от частоты. А с другой стороны частоты должны быть такими что бы измерения проводились как минимум в дальней зоне, 5–7 длин волн.

В данной работе рассматривается изучение скоростных свойств горных пород, то есть скоростей продольной и двух поперечных волн, проходящих через исследуемый образец, при этом частота выбрана равной 1 МГц.

Выбор рабочих частот, на которых излучают пьезопластины датчика, зависят от решаемой задачи и определяется следующими факторами. Существует некоторая историческая обусловленность, связанная с тем, что оборудование иностранного производства, активно завозимое в нашу страну с начала 90-х годов по настоящее время, работает на частотах 800 кГц - 1 МГц. И для того, чтобы лаборатории, до сих пор эксплуатирующие данное оборудование могли без особых проблем проводить межлабораторные исследования на оборудовании разработки автора, рабочие частоты должны соответствовать. На оборудовании, разработанном автором так же в основном, используются рабочие частоты 1 МГц и для продольно и для поперечно поляризованных пьезопластин. Данные частоты применяются для прозвучивания образцов с диаметрами 30 мм, 38 мм, 50 мм и ограниченно 100 мм при соответствующей удвоенной длине при работе на установке для проведения геомеханических исследований, осуществляющей осевое и обжимное нагружение образца керна горной породы. В измерительных установках, работающих без обжимного усилия вообще и при малом осевом усилии с образцами, не допускающими значительного прижимного усилия из-за возможного разрушения образца вследствие низкой прочности, требуется применять более низкие частоты, 300 кГц и даже ниже [Анчугов, 2023]. Более высокие частоты для работы с натуральными образцами горных пород применяются редко и носят единичный характер, тем не менее несмотря на достаточное сильное затухание сигналов в горных породах с повышением частоты они могут применяться для исследований. В общем случае при выборе рабочей частоты и материала волновода следует руководствоваться принципом чтобы в волноводе укладывалось хотя бы несколько длин волн излучаемого сигнала для пространственного разделения поперечной волны и излучаемой вместе с ней продольной волны помехи. Для того чтобы избежать их наложения в приёмнике и соответствующих затруднений с определением времени первого вступления поперечной волны. Оптимальным размером волновода будет такая его длина, где укладывается не менее 3 длин волн или

больше. Таким образом уменьшение рабочей частоты, с одной стороны, ведёт к улучшению амплитуды регистрируемого сигнала, так как со снижением частоты уменьшается и его затухание в горных породах и соответственно снижается необходимость в сильном прижиме. С другой стороны, рабочая частота должна быть достаточно высока для определения первого вступления волны с приемлемой точностью. Пример неудачного выбора рабочей частоты в 40 кГц для измерительной системы, работающей с образцами керна, производителем оборудования GCTS описан в статье [Анчугов, 2023]. Применение частот в диапазонах от 300 кГц до 1 МГц не выявило заметной дисперсии скорости зарегистрированных колебаний от частоты. Однако на частотах в 40 кГц уже наблюдается существенная дисперсия скорости около 20% по сравнению с результатами наблюдений на 1 МГц. Что также рассмотрено в [Анчугов, 2023]. Рабочая частота в 1 МГц у приёмных пьезопластин датчиков вполне подходит для регистрации сигналов акустической эмиссии, так как их преимущественная полоса лежит несколько ниже, в районе 350 кГц.

3.6 Разработка акустической системы

Рассмотрим измерительную компоновку в составе датчиков с пьезокерамическими пластинами и образцом подробнее. Конструкция приёмного датчика и излучающего одинаковы, они могут меняться местами, при этом излучающий становится приёмным, а приёмный излучающим. Каждый датчик может содержать вертикальную или горизонтальную компоновку пьезопластин. При вертикальной компоновке, на титановый плунжер крепятся сначала пьезопластина со сдвиговой поляризацией, затем на неё такая же пластина, но развёрнутая на 90 градусов и сверху неё продольно поляризованная пьезопластина. Такая вертикальная компоновка широко применяется в акустических датчиках для исследования керна компании Autolab (см. рис. 3.3). Вертикальная компоновка имеет наибольшую эффективную площадь

пьезопластин, что даёт возможность излучать и регистрировать достаточно сильные сигналы. Однако подобная компоновка имеет и ряд недостатков, таких как различное время задержки распространения сигнала от разных пьезопластин, невозможность одновременно задействовать при излучении обе пьезопластины со сдвиговой поляризацией, сложность с изготовлением боковых электродов для электрического подключения к пьезопластинам.

Другой вариант размещения пьезопластин на внутренней поверхности плунжера (волновода) это расположить их горизонтально в одной плоскости. Таким образом можно разместить от 3 до 5 пьезопластин и ориентировать их вектора поляризации определённым образом. При реализации схемы горизонтальной компоновки площадь каждой из пьезопластин значительно меньше, чем при вертикальной компоновке, следовательно можно ожидать некоторого уменьшения полезного сигнала. Но такая схема обладает рядом преимуществ. В частности, волны излучаются от одной плоскости, все пластины объединены одним земляным контактом, следовательно не требуется сложная релейная схема коммутации сигналов с переключением земли. И возможно подключаться к каждой пьезопластине напрямую. Не требуется сложная технология изготовления боковых контактов, можно электрически объединить обе поперечно поляризованные пластины для излучения так называемой волны скручивания, или композитной сдвиговой волны, состоящей из суммы двух или четырёх волн, излучаемых пластинами независимо распространяющихся в виде отдельных лучей каждый по своему геометрическому пути. Такой способ суммирования поперечных волн даёт регистрировать также одну композитную волну, которая хорошо распространяется через трещиноватые, поглощающие образцы. На взгляд автора такая горизонтальная компоновка более простая в изготовлении, и по совокупности параметров выигрывает у вертикальной компоновки. Тем не менее изготавливаются и применяются в работе оба варианта. Рабочая частота как уже было отмечено выше может быть выбрана в

диапазоне от 300 кГц и до 1 МГц в зависимости от размеров образца и условий проведения исследования. Для геомеханических исследований на образцах до их разрушения, когда регистрируются и сигналы акустической эмиссии как правило применяют пьезопластины с резонансной частотой 1 МГц. При этом толщина продольно поляризованной пьезопластины равна 2 мм, а поперечно поляризованной 1 мм. При горизонтальной компоновке продольная пьезопластина находится в центре сборки, а вокруг неё либо рядом с ней размещаются поперечно поляризованные пьезопластины таким образом чтобы уместится в круге диаметром примерно 20 мм для датчиков предназначенных для исследования образцов керна диаметром 30 и 38 мм. Таким образом свободное место для пьезопластин есть но его не слишком много. Несмотря на небольшую площадь, её вполне хватает для излучения и приёма приемлемых акустических сигналов, прошедших через исследуемый образец при приложении к нему обжимного и осевого усилия. При проведении исследований на образцах больших размеров соответствующим образом увеличивается и доступное пространство внутри корпуса датчика, соответственно можно задействовать большую площадь пьезопластин.

При проведении фильтрационных экспериментов всю пьезокерамическую компоновку приходится размещать внутри круга с диаметром примерно 15 мм что вызывает определённые трудности ввиду малых геометрических размеров пьезопластин. Корпус датчика герметичен и целиком изготавливается из титана по следующим соображениям. Во-первых, титан имеет высокий предел прочности и упругости, так предел упругости достигает значений 103 ГПа. Во-вторых, как уже было отмечено акустическое сопротивление титана практически совпадает с акустическим сопротивлением пьезопластины. И по крайней мере при излучении энергии пьезопластиной в материал плунжера из титана отражения на этой границе пренебрежимо мало.

$$K_{отр.} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1)$$

Котр – коэффициент отражения волны при переходе через границу раздела сред.
 Z_1 – волновое сопротивление среды, из которой излучается волна [10^6 Па*с/м],
 Z_2 – волновое сопротивление среды, в которую распространяется волна [10^6 Па*с/м].

Таким образом, в измерительной компоновке (см. рис. 3.4) присутствует четыре отражающие границы, на каждой из которых теряется энергия полезного импульса. Эти границы сверху вниз: 1-я граница на контакте излучающей пьезопластины и металлического волновода, 2-я граница между первым волноводом и верхней гранью исследуемого образца, 3-я граница между нижним торцом образца и вторым волноводом, 4-я граница между волноводом и принимающей пьезопластиной [Анчугов 2023].

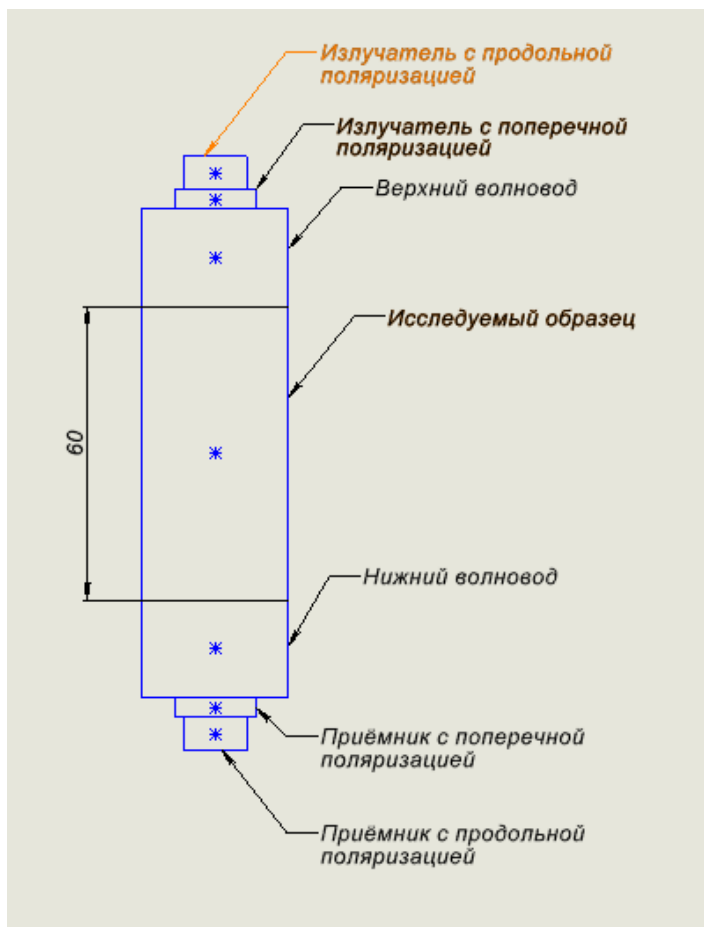


Рисунок 3.4 – Акустические датчики с вертикальной компоновкой и исследуемым образцом.

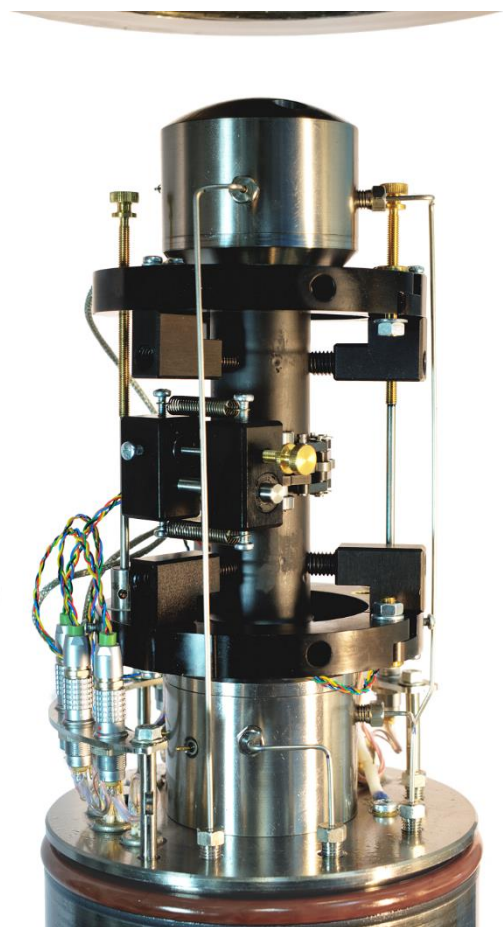


Рисунок 3.5 – Акустические датчики для геомеханических исследований с образцом в манжете [Анчугов, 2021].

Для проведения эксперимента на одноосное сжатие, выполняется так называемый UCS (Unconfined Compressional Strength) тест, это тест, проводимый на образце без обжимного давления, где не требуется обжимная манжета из резины или фторопластовой термоусадки. Для проведения трёхосного либо псевдотрёхосного теста на нагружение образца уже требуется помещать образец в манжету и помещать компоновку из датчиков и образца в специальную ячейку (стабилометр), в которой создаются пластовые условия.

3.7 Свойства применяемой в датчиках пьезокерамики

Пьезокерамика представляет собой материал, обладающий уникальными пьезоэлектрическими свойствами - преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот, что делает ее важным материалом для различных технических применений. Поэтому пьезокерамика находит широкое применение в различных областях, таких как ультразвуковая техника, актуаторы, датчики, медицинская диагностика и другие технические приложения.

Основные параметры пьезокерамики это: пьезоэлектрическая постоянная, механическая добротность (коэффициент акустического затухания), упругость и механическая прочность, а также устойчивость к высоким температурам. Эти свойства делают пьезокерамику уникальным материалом для создания высокоэффективных пьезоэлектрических устройств.

Она также используется в актуаторах для точного позиционирования и управления, в медицинской диагностике для ультразвукового сканирования, а также в различных датчиках, таких как датчики уровня топлива, датчиках детонации двигателя внутреннего сгорания и др.

Пьезокерамика продолжает привлекать внимание исследователей и инженеров благодаря своим уникальным свойствам и потенциалу для создания новых технологий. В настоящее время ведутся работы по разработке более эффективных и компактных пьезоэлектрических материалов и устройств на их основе, расширению диапазона рабочих частот и температур, а также по созданию гибридных материалов с улучшенными характеристиками.

Таблица 3.1 – Основные параметры пьезоэлектрических материалов по данным компании Элпа.

Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19
T_k	°C	290
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	-	1750
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	-	1450
$\text{tg}\delta$, не более	%	2,5
Q_m	-	80
v_1^E	$\cdot 10^3 \text{ м/с}$	3
σ_p	-	0,37
k_p	-	0,55
k_{15}	-	0,6
k_{33}	-	0,67
d_{31}	10^{-12} Кл/Н	-160
d_{33}	10^{-12} Кл/Н	350
d_{15}	10^{-12} Кл/Н	400
g_{31}	$10^{-3} \text{ В}\cdot\text{м/Н}$	-10,3
g_{33}	$10^{-3} \text{ В}\cdot\text{м/Н}$	22,6
$(\text{ООЧ})_p$	%	0,8
$(\text{ООЧ})_{сд}$	%	0,9
$(\text{ООЧ})_{сж}$	%	1
$T_{\text{раб}}^*$	°C	200
ρ_v , не менее	При 100 °C, $\bullet 10^8, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	1
ρ	10^3 кг/м^3	7,5

T_k — Температура Кюри;

$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$ — Относительная диэлектрическая проницаемость;

$\operatorname{tg} \delta$ — Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при $E \leq 25$ кВ/м;

Q_m — Механическая добротность планарной моды колебаний;

Q_{mt} — Механическая добротность толщинной моды колебаний;

V^E — Скорость звука;

σ_p — Планарный коэффициент Пуассона;

k_p — Коэффициент электромеханической связи планарной моды;

k_{15} — Коэффициент электромеханической связи сдвиговой моды;

k_{33} — Коэффициент электромеханической связи моды растяжения-сжатия по длине;

k_t — Коэффициент электромеханической связи толщинной моды колебаний;

d_{31}, d_{33}, d_{15} — Пьезоэлектрические модули;

g_{31}, g_{33} — Пьезоэлектрические коэффициенты напряжения (чувствительность в режиме приема);

$(\text{ООЧ})_p$ — Относительное отклонение частоты в интервале температур $-60 \dots +85^\circ \text{C}$ планарной моды;

$(\text{ООЧ})_{сд}$ — Относительное отклонение частоты в интервале температур $-60 \dots +85^\circ \text{C}$ сдвиговой моды;

$(\text{ООЧ})_{сж}$ — Относительное отклонение частоты в интервале температур $-60 \dots +85^\circ \text{C}$ моды растяжения-сжатия по толщине;

$T_{раб}^*$ — Максимальная рабочая температура;

ρ_v — Удельное объемное электрическое сопротивление;

ρ — Плотность.

3.8 Способы соединения пьезокерамики с металлами

Пьезокерамическая пластина должна быть надёжно прикреплена к плунжеру, осуществляющему функции волновода и передающему энергию колебаний в исследуемый образец либо принимающему их из образца. Основным требованием к способу соединения это способность выдерживать высокие температуры (как минимум до 150 °С и выше), так и возникающие в результате геомеханических испытаний вибрации, передающиеся в том числе и на пластины. Закрепление пьезоэлектрических пластин может осуществляться посредством адгезионного соединения разнообразными видами клеевых составов либо механическим крепёжом с использованием зажимных устройств, а также посредством припайки. Это наиболее распространённые и применяемые в промышленности способы крепления, каждый из которых обладает как достоинствами, так и некоторыми недостатками. Ниже рассмотрим способы крепления подробнее.

3.9 Клеевые соединения металлокерамических узлов

Склейка пьезокерамической пластины с волноводом в конструкции датчика может производиться с помощью эпоксидного клея. Данный метод относительно прост. Склеиваемые поверхности обезжириваются, клей наносится тонким слоем, далее осуществляется прижим и сушка в соответствии с документацией на клей. При всей простоте такого типа соединения очень многое зависит от самого клея и типа склеиваемых материалов. Так как плунжер изготовлен из титана, к нему, обычно любые клеи имеют относительно плохую адгезию. Ещё одной трудностью является необходимость обеспечения электрического контакта для нижней металлизированной поверхности пьезопластины. Такой электрический контакт можно осуществить с помощью точечного нанесения электропроводного клея, либо использовать такой клей на всей поверхности. Сложность заключается в том, что выбор

высокотемпературных эпоксидных компаундов очень сильно ограничен и исчисляется единицами. Для склейки, автором использовался клей марки MG Chemicals 8331 Conductive Epoxy Adhesive, Duralco 124 Adhesive Epoxy. Данные марки эпоксидных компаундов производятся за рубежом, и их доступность в настоящее время ограничена. Для проверки способности к качественной склейке данных компаундов были произведены тестовые выклейки с измерением усилия на отрыв (см. рис. 3.6–3.7).

Измерения показали значительный разброс полученных значений, вместе с тем некоторые замеры (см. рис. 3.7) показали превышение прочности клеевого соединения над адгезионной прочностью на отрыв металлических электродов, нанесённых на пьезокерамику а также прочность самой пьезокерамики. Усилие на отрыв электродов для пьезокерамики ЦТС-19 составляет до $4.9 \cdot 10^4$ Н/м² по информации отечественных производителей. К сожалению, столь высокое усилие на отрыв при склейке не является стабильно повторяемым. На прочность соединения во время эксплуатации датчиков влияют самые различные факторы: как были подготовлены поверхности перед склейкой, при каких температурах эксплуатируются собранные датчики, какой был срок годности эпоксидного компаунда на момент использования и некоторые другие.



Рисунок 3.6 – Тестирование клеевого соединения на отрыв, автором в лаборатории компании «Геологика» [Анчугов, 2021].

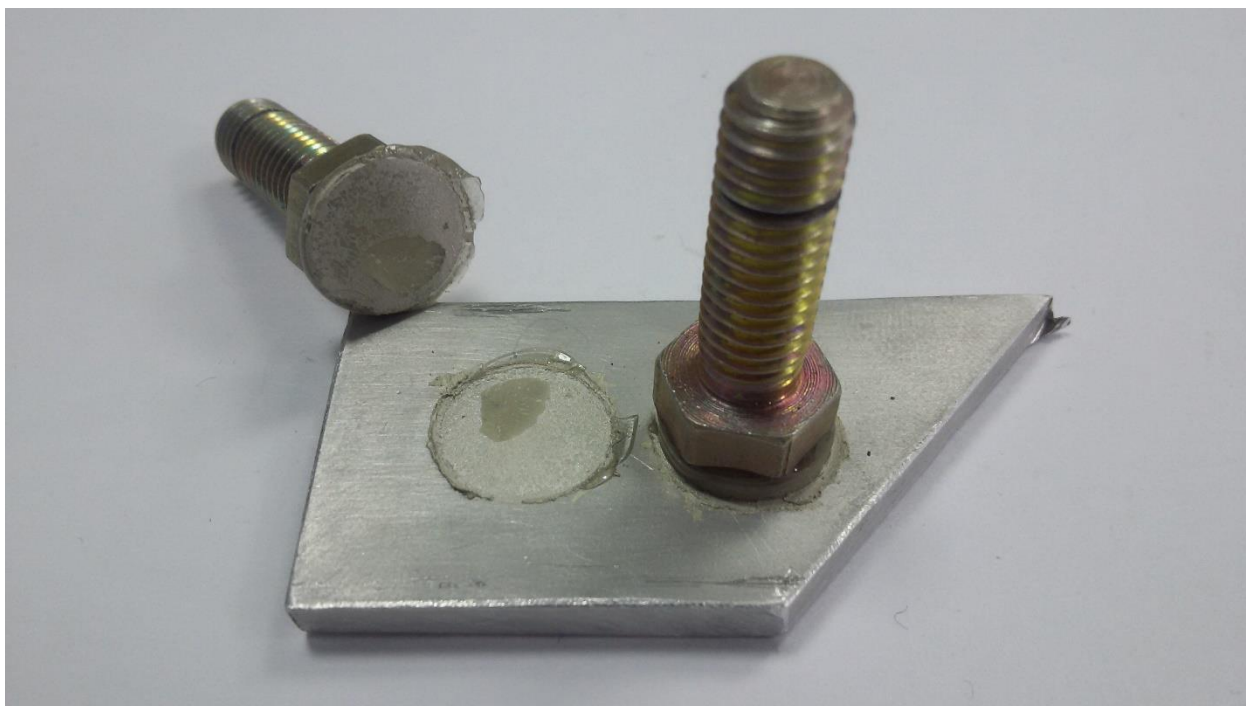


Рисунок 3.7 – Тестирование на отрыв эпоксидного клея для приклейки пьезопластин, замер усилия отрыва [Анчугов, 2021].

3.10 Способ получения паяного металлокерамического соединения

Другим, более надёжным и повторяемым способом крепления пьезокерамических пластин к волноводу (плунжеру) при сборке акустического датчика является пайка мягким припоем ПОС-60 и его аналогами. Во время начала испытаний первых датчиков в 2014 году, пьезопластины которые бы годились для пайки, не были широко доступны на рынке. В частности, пьезокерамика со сдвиговой модой колебаний изготавливается заводом исключительно под заказ, цикл изготовления занимает 17 недель, и пьезопластина имела на поверхности эпоксидное электропроводное покрытие. Один из американских заводов изготавливал такие сдвиговые элементы (с поперечной поляризацией) с эпоксидным покрытием по требованию автора. Далее уже в России данное покрытие удалялось с помощью метиленхлорида а очищенные пластины отправлялись в Зеленоград на магнетронное напыление трёхслойного паяемого покрытия. Данная технология показала в начале себя

неплохо, и именно она позволила освоить и отработать способ крепления пластин с помощью пайки. Однако были и сложности: данное покрытие со временем отслаивалось, а одна из партий пластин была перегрета подрядчиком во время технологического процесса напыления, что привело к располяризации и потере пьезоэлектрической активности. В течение следующего года американский завод нашёл подрядчика по нанесению необходимого металлического покрытия на продольно и поперечно поляризованные пьезопластины и в течение последующих нескольких лет поставлял по чертежам автора пластины с нужными параметрами и размерами. Однако по прошествии нескольких лет подрядчик перестал наносить паяемое покрытие, и в поиске нового подрядчика завод отказал. К тому времени отечественные заводы полного цикла освоили нанесение различных металлических покрытий на все виды поляризованной пьезокерамики, что сильно упростило работу. В настоящее время отечественная промышленность выпускает широкий спектр изделий достаточно высокого качества, по характеристикам не уступающих зарубежным. Автором была разработан и опробован на серийных изделиях способ изготовления акустических датчиков из титана с применением способа пайки, на что получен соответствующий патент [Патент № RU 2810700 C1 РФ. Акустический датчик и способ его изготовления]. Суть технологии заключается в придании титановым деталям свойств паяемости, за счёт модификации поверхности, так как чистый титан не смачивается мягкими припоями. Для этого на поверхность титана куда далее будет крепиться пьезопластина предварительно наносится паяемое покрытие. Паяемое покрытие может быть нанесено различными способами, в частности аргонодуговой наплавкой и другими. Большинство известных способов было проверено автором и признано вполне удовлетворительными для производства датчиков. При использовании такого промежуточного покрытия и способа крепления пайкой пьезопластины решается несколько основных проблем, возникающих при применении эпоксидного компаунда либо использовании механического прижима:

1. Достигается исключительная прочность соединения пьезокерамики с титановым плунжером, а следовательно, и максимально возможная механическая связь перехода титан-пьезопластина. За счёт чего энергия колебаний пьезопластины передаётся в титановый материал волновода наиболее эффективным способом. Прочность (усилие на отрыв) паяемого соединения превышает $4.9 \cdot 10^4$ Н/м², что даже прочнее усилия на отрыв металлизированного покрытия пьезопластин.
2. Естественным образом достигается термостойкость такого соединения в диапазоне температур до точки плавления припоя. При этом можно использовать припой разного состава с различной температурой плавления, как и пьезопластины из различных типов пьезокерамики с более высокой температурой Кюри в случае необходимости. Для эпоксидных компаундов же существует так называемая температура стеклования, вблизи которой и выше компаунд обратимо разжижается и становится мягким. При этом ухудшается качество механической связи пьезопластины и волновода, вплоть до потери механического соединения и отклеивания.
3. Получаемое соединение обладает свойством электропроводности, что необходимо для электрического подключения к пьезопластине.
4. Обеспечивается повторяемость параметров паяного соединения, при серийном производстве датчика. Механическая прочность и качество крепления больше не зависит от даты выпуска того или иного клея и его степени старения. А механические параметры соединения и потери энергии колебаний на переходе плунжер – пьезокерамика не зависят от температуры. Либо это зависимость значительно меньше, чем при склейке эпоксидными компаундами.

Таким образом освоение данного способа позволило изготавливать различные типы датчиков, предназначенных для работы в фильтрационных установках для

исследования фильтрационных свойств керна, в измерительных акустических сепараторах, в установках исследования геомеханических свойств образцов керна горных пород вплоть до их разрушения, там, где требуется определять скорости распространения акустических волн и регистрировать сигналы акустической эмиссии. Важным свойством данного способа является локализация, используется отечественная пьезокерамика, производимая в России так же, как и остальные компоненты и комплектующие для производства датчиков.

3.11 Конструкция акустического датчика для работы с керном

Рассмотрим подробно конструкцию акустического датчика для геомеханических исследований свойств горной породы. Датчик состоит из сплошного волновода непосредственно контактирующего с образцом керна, пьезоэлектрической компоновки (блока от 3 до 5 пьезопластин вертикального или горизонтального размещения), герметизирующей крышки датчика. Для проведения измерений времени прохождения акустических волн через образец и регистрации сигналов акустической эмиссии таких датчиков нужно как минимум два.

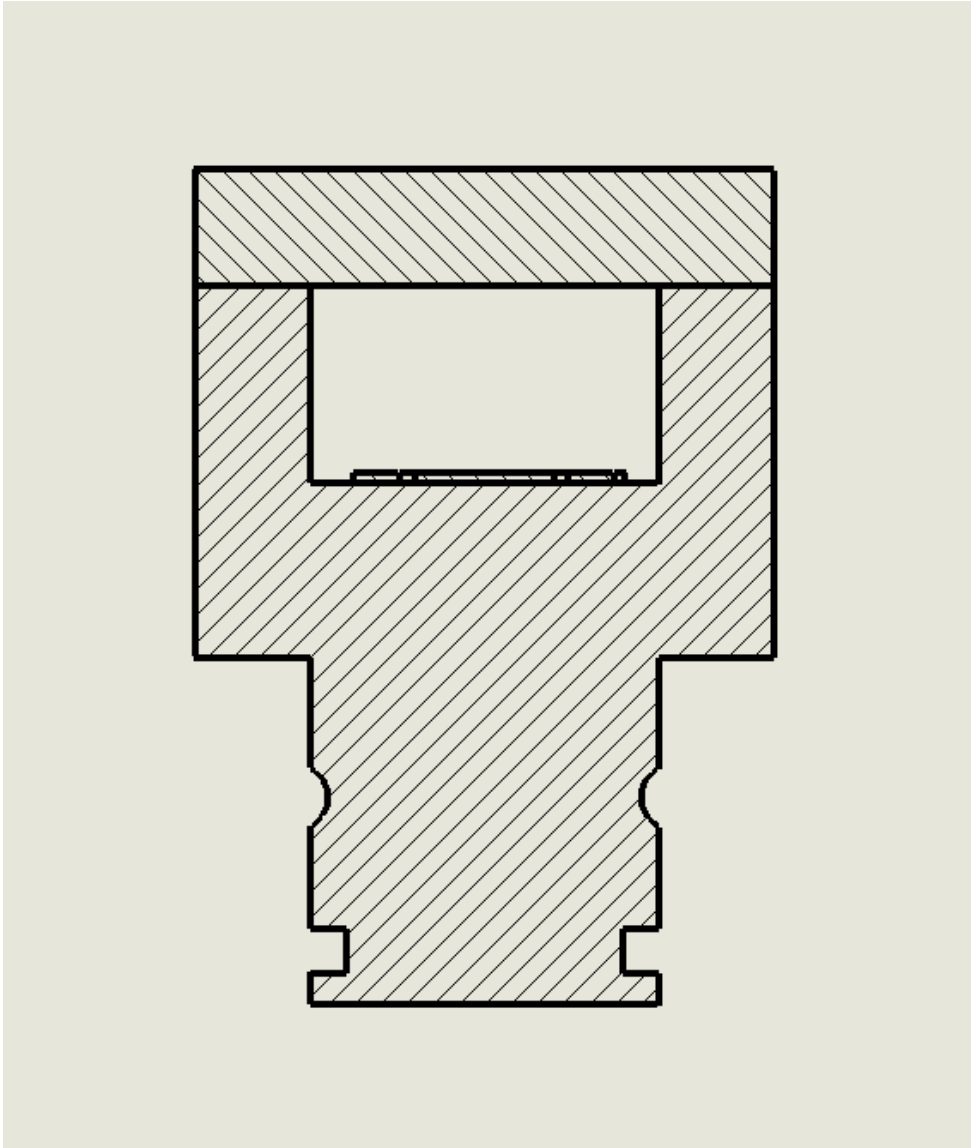


Рисунок 3.8 – Вид акустического датчика в разрезе [Патент № RU 2810700 C1].

Горизонтальная пьезоэлектрическая компоновка состоит из нескольких пьезопластин с продольной и поперечной поляризацией имеющих соединение с общей землёй. При этом в центре горизонтальной компоновки находится пьезопластина с продольной поляризацией, которая окружена пьезопластинами с поперечной поляризацией.

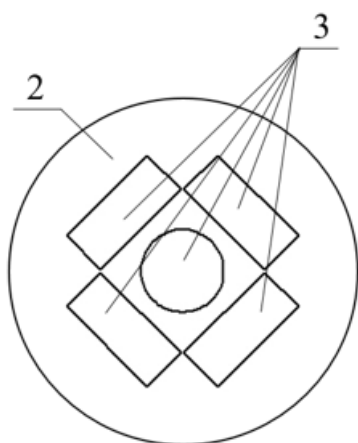


Рисунок 3.9 – Схема горизонтальной пьезокомпоновки для изготовления датчика. 2 – поверхность волновода, 3 – пьезопластины [Патент № RU 2810700 С1].

Пьезопластины могут быть размещены различными вариантами на поверхности волновода, на рисунке приведён лишь один из возможных вариантов часто встречающийся в оборудовании как отечественного, так и иностранного производства. Это горизонтальная компоновка с общей землёй (2) у всех пьезопластин. Она включает в себя одну пластину, поляризованную вертикально и четыре пластины со сдвиговой поляризацией (3). Сдвиговые пьезопластины электрически соединяются попарно. Пьезопластины крепятся к титановому волноводу методом пайки, как описывается в предыдущей главе. Размер титанового волновода, приведенного на (рис. 3.9) разработан под диаметр исследуемого образца 30 мм. Данный размер является самым распространённым для оборудования исследования геомеханических свойств, находящегося в нашей стране.

3.12 Эксплуатационные требования к пьезоэлектрическим датчикам и особенностям их конструкции для работы с керном

Для проведения геомеханических экспериментов на образцах керна горных пород акустические датчики должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Обладать достаточной прочностью и устойчивостью к слому образца. Для того чтобы измерять время прохождения акустического сигнала через образец либо регистрировать сигналы акустической эмиссии от минимальных значений осевого усилия на образец до усилия разрушения образца, то есть выдерживать пластовое давление.
2. Обеспечивать работу при пластовых температурах до 150 °С как минимум и выше.
3. Обеспечивать излучение и приём сигналов трёх типов акустических волн (Р, S1 и S2). В наших экспериментах дополнительно излучается и регистрируется электрическая сумма волн S1+S2, когда все сдвиговые пьезопластины в датчике объединяются, так называемую ‘волну скручивания’.
4. Электрическое соединение пластин с проводами подключения к датчику должно быть герметичным и реализовываться посредством специализированных гермовводов. Известны конструкции затопляемых датчиков, где нет герметизации от обжимного гидравлического масла пьезопластин, но в датчиках разработки автора для геомеханических экспериментов такой подход не применяется.
5. Обеспечивать подведение от одной до трёх линий подачи поровой жидкости в образец керна через резьбовые фитинги высокого давления.
6. Акустические датчики должны позволять зафиксировать на корпусе волновода изолирующую манжету, назначение которой отсечь обжимное масло от поровых флюидов образца во время проведения псевдотрёхосного эксперимента по нагружению.
7. Корпус датчика должен надёжно фиксироваться в прессе, обеспечивающем нагружение по оси образца. Для этого нижнюю поверхность одного из датчиков выполняют с выемкой либо даже резьбой для надёжного закрепления в основании прессы, а верхний датчик, точнее его верхнюю

поверхность можно выполнять с небольшим радиусом для компенсации небольшой вероятной несоосности датчиков в процессе нагружения.

8. Акустические датчики должны позволять закреплять на корпусе волновода устройство для монтажа датчиков измерения деформации образца.
9. Датчики должны быть разборными и позволять заменять используемые в них уплотнения герметизирующих каналы подачи поровых жидкостей.

Датчики для измерения скорости прохождения акустических волн всегда работают в паре, при этом один из них излучает второй принимает. В режиме регистрации акустической эмиссии, который является пассивным, источник отключается от излучающего датчика, и как уже упоминалось ранее, обе пьезопластины обоих датчиков подключаются ко входу предварительного усилителя. Так осуществляется регистрация акустической эмиссии в двухканальном режиме. Для многоканальной регистрации акустической эмиссии требуется разместить на резиновой манжете дополнительные датчики, от 8 до 16 штук. Вариант размещения таких отдельных датчиков в количестве восьми штук, совместно с основными датчиками для измерения скорости акустических волн показан ниже на (рис. 3.10). Такие дополнительные датчики были автором разработаны и изготовлены. Вместе с ними была разработана манжета для крепления датчиков. Данные датчики в составе измерительной компоновки внутри прессы для нагружения образцов ещё не испытывались, это дело ближайшего будущего. Для испытаний датчиков требуется измерительная система с блоками аналогово-цифрового преобразования с необходимым числом каналов и повышенной частотой дискретизации до 10 МГц, которую не удалось получить для проведения экспериментов, при этом разработка собственной многоканальной системы регистрации задержалась.

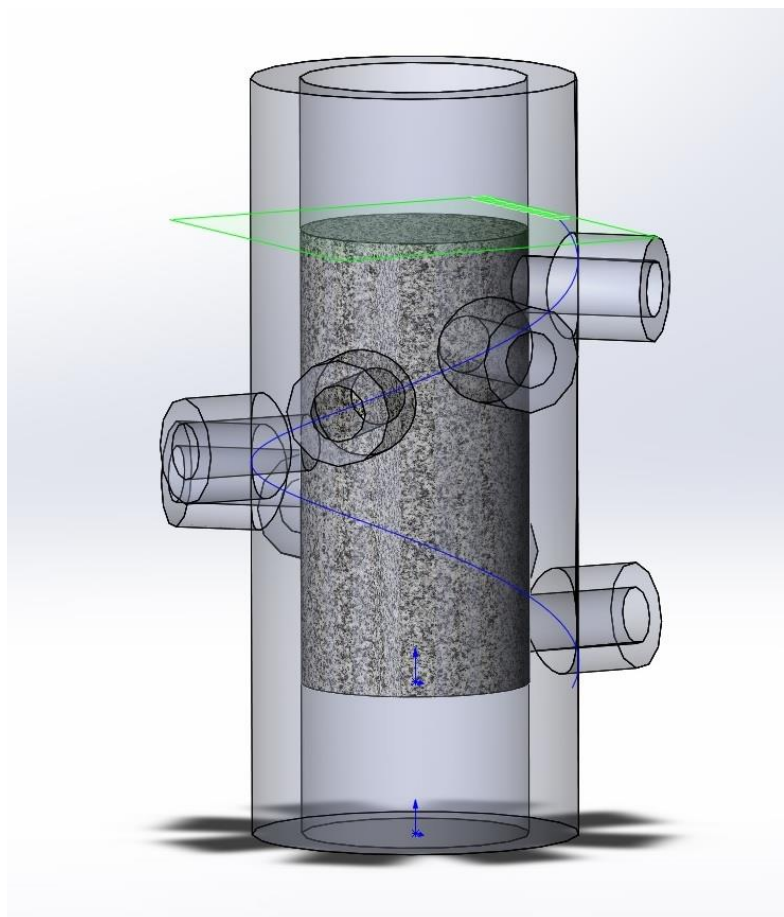


Рисунок 3.10 – Один из вариантов размещения отдельных датчиков в посадочных местах манжеты для многоканальной регистрации сигналов акустической эмиссии [Анчугов, 2021].

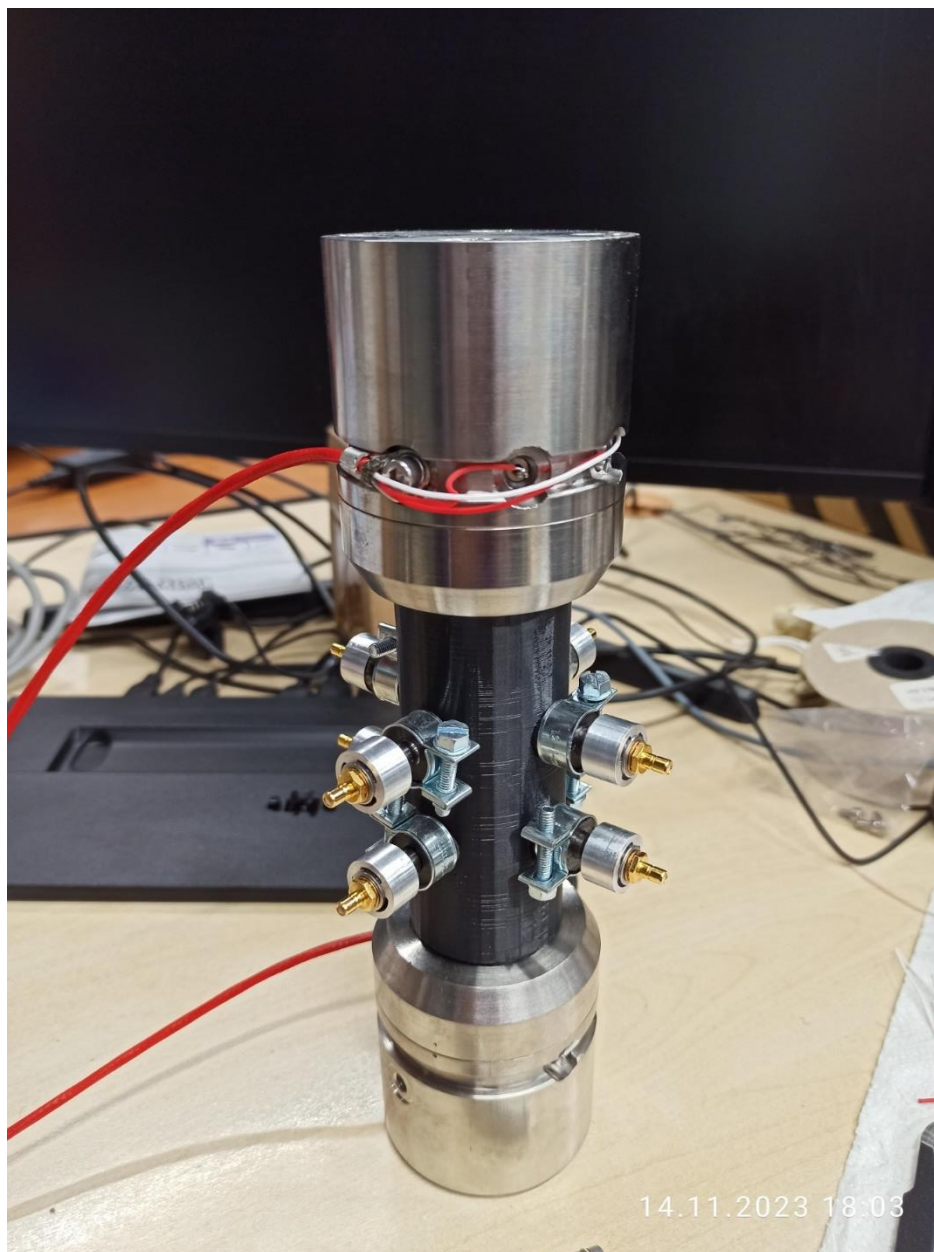


Рисунок 3.11 – Разработанные автором и изготовленный методом 3D печати макет манжеты с образцом и восемь дополнительных датчиков для регистрации сигналов акустической эмиссии.

Для проведения фильтрационного эксперимента, где не требуется нагружать образцы керна до их разрушения, а нагружение в основном осуществляется гидростатически, то есть осевое усилие на образец равно обжимному разработана специальная компактная конструкция датчиков, не превышающих диаметр образца керна 30 мм. Тем не менее такие датчики

содержат внутри полноценную горизонтальную пьезокомпоновку (см. рис. 3.9). Фотография датчиков приведена на (рис. 3.12).

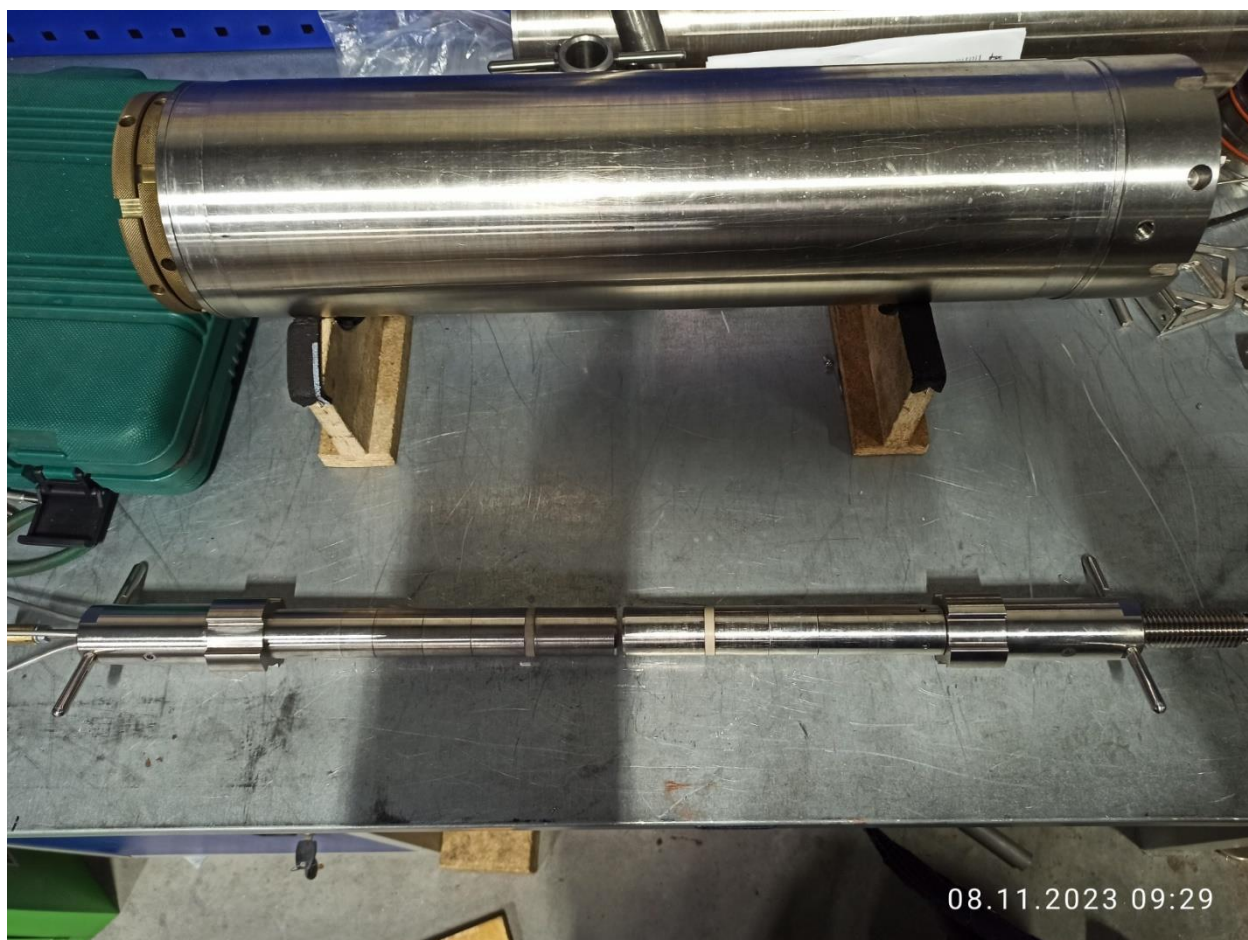


Рисунок 3.12 – Акустические датчики с байонетным креплением в кернодержателе типа Хасслера для проведения фильтрационных экспериментов установки СКИФ-УЗ-УЭС производства ООО «Ситен Технологии».

Данная конструкция акустических датчиков содержит изоляторы может быть использована одновременно как с известной системой измерения удельного электрического сопротивления на основе измерителя иммитанса (RLC метра) так и с измерительной электротомографической системой контроля водонасыщенности образцов керна во время хода эксперимента по вытеснению нефти водой, в разработке которой автор принимал участие и описанной в патенте [Патент № RU 2778498 C1]. Следует отметить, что применяемое точное

устройство (насос) высокого давления, обеспечивающее осевое усилие прижима образцов, обжимное усилие, передаваемое на образец через манжету, а также подачу порового флюида во всех установках, где применяется высокое давление, разработано автором в составе коллектива разработчиков, что подтверждено соответствующим патентом Российской Федерации. [Патент № RU 2808325 C1].

Выводы по Главе 3

1. Акустические датчики должны надёжно работать при высоких температурах и давлениях. Для этого пьезопластины к волноводу надёжнее всего крепить методом пайки.
2. В качестве материала волновода (корпуса датчика) следует использовать титан и его прочные сплавы, вследствие минимизации потерь энергии на границе пьезокристалл-волновод, а также необходимой прочности датчика для проведения геомеханических исследований. По акустическим свойствам также подходит цирконий и его сплавы, но они являются менее распространёнными и доступными.
3. Механическое демпфирование пьезопластины датчика с помощью демпфера массы увеличивает амплитуду первых вступлений сигнала на приём, но значительно повышает вероятность выхода датчика из строя при нагружении образца керна до разрушения. Следует ограничить применение механического демпфирования.

Глава 4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Методика измерения скоростей акустических волн на образцах керна описана в ГОСТ 21153.7–75. В данном ГОСТ описывается методика определения первого вступления волн.

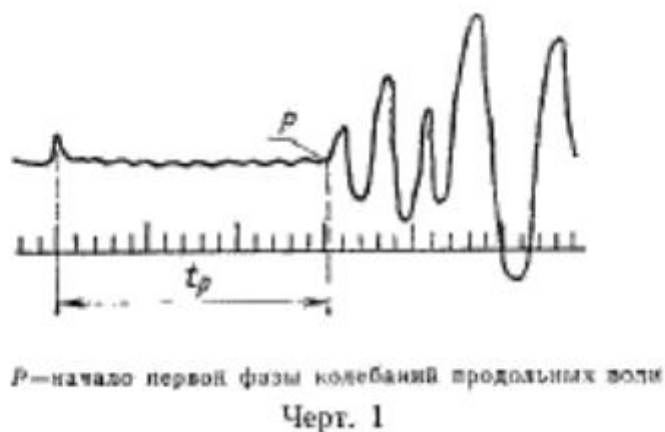


Рисунок 4.1 – Определение времени вступления продольной волны по ГОСТ 21153.7–75.

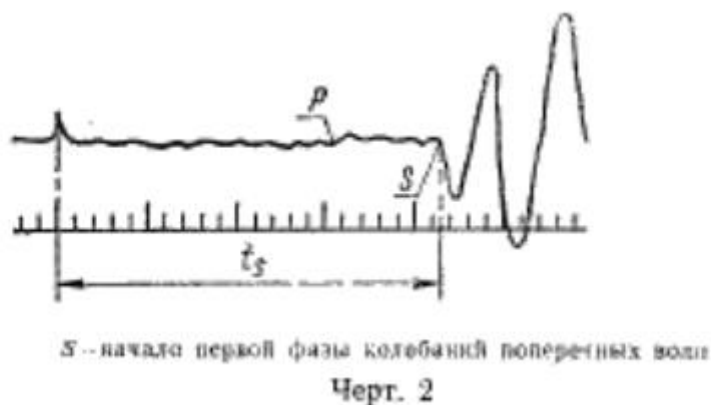


Рисунок 4.2 – Определение времени вступления поперечной волны по ГОСТ 21153.7–75.

Как правило, при исследовании конкретного образца керна, обработка данных со снятием времени первых вступлений сигналов акустических волн производится вручную и зависит от квалификации исследователя. Возможно применение автоматических алгоритмов выделения времени первых вступлений таких как описывается в статьях [Анчугов, 2023; Анчугов, 2025]. Для обработки данных

акустической эмиссии, где количество измерительных каналов значительно больше двух, а число событий измеряется десятками тысяч физически невозможно выделять первые вступления вручную. Здесь однозначно требуется применять автоматические алгоритмы и подходы выделения событий, один из которых рассмотрен в статье [Решетова, Анчугов, 2021]. Этот подход также изложен в 5 главе.

4.1 Порядок проведения экспериментов по определению скоростей распространения акустических волн на образцах

4.1.1 Методика проведения и описание эксперимента

Для эксперимента по разрушению образцов керна, измерению скоростей распространения продольных и поперечных акустических волн и регистрации сигналов акустической эмиссии использовались различные образцы горных пород, а также специально изготовленные тестовые образцы – калибры скорости. В качестве калибров скорости брались цилиндрические образцы длиной 60 мм и диаметром 30 мм, изготовленные из титана, оргстекла, стали и алюминия. Образцы горных пород длиной 60 мм и диаметром 30 мм выбуривались из полноразмерного керна полученного в результате отбора керна непосредственно с месторождений нефти Западной Сибири. Специально брались для исследования образцы с различной литологией, нефтяные коллектора включая хорошо сцементированные песчаники, глинистые песчаники и алевролиты, так и породы, не являющиеся коллектором.

Образец помещался в манжету из термоусаживаемого материала из тонкого фторопласта или фторопласта с эластомерами толщиной не более 2 мм, и зажимался между титановыми акустическими датчиками как показано на (рис. 4.3). Манжета термоусаживалась на образце с помощью нагревательного фена и закреплялась мягкой нержавеющей проволокой на цилиндрических проточках

датчика. Назначение манжеты изолировать образец от обжимного давления, создаваемого гидравлическим маслом. И в то же время предоставляет возможность подавать насосом высокого давления поровое давление в образец без риска попадания поровой жидкости в масло. Сборка из образца, размещённого между акустическими датчиками далее дооснащается металлической цепочкой для измерения радиальной деформации образца с помощью LVDT датчика и одним или двумя датчиками измерения осевой деформации.

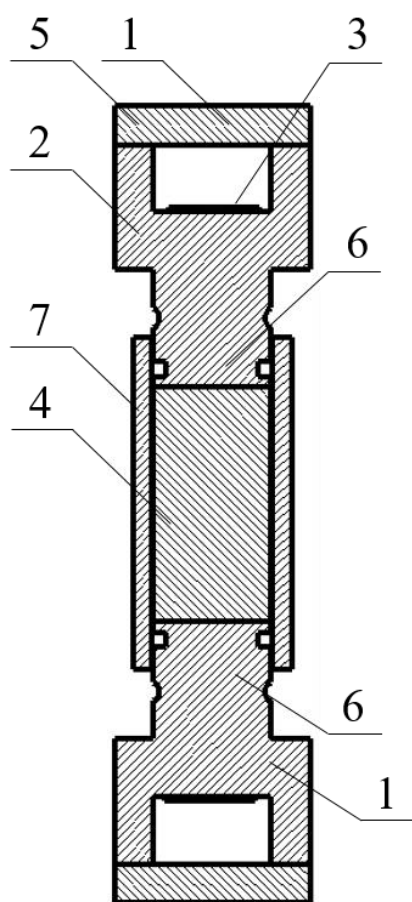


Рисунок 4.3 – Компоновка из датчиков в сборе с образцом в манжете [Патент № RU 2810700 C1].

Образец 4 помещается в манжету 7 из термоусаживаемого материала из тонкого фторопласта или фторопласта с эластомерами толщиной не более 2 мм, и зажимается между титановыми волноводами 6 акустических датчиков 1, (см. рис. 4.3), и помещается в ячейку стабилметра.



Схема датчика LVDT (линейный дифференциальный трансформатор) представляет собой устройство, состоящее из катушки (1) и сердечника (6). Датчик используется для измерения деформации образца.

нагружается до разрушения, либо до стадии, непосредственно предшествующей разрушению. При этом непрерывно (раз в секунду или раз в несколько секунд) регистрируются скорости акустических волн, осевая и радиальная деформация образца, температура в ячейке стабилметра. Возможна, регистрация акустической эмиссии, сигналы от событий эмиссии попадают в акустические датчики, работающие в пассивном режиме.

Регистрация акустических волн датчиками без обжимного давления в атмосферных условиях может происходить с одним лишь осевым усилием на установке для проведения геомеханических исследований на образцах керна горной породы.

Перед началом измерений скоростей волн на образцах сначала требуется произвести калибровку датчиков. Калибровка заключается в определении времени свободного пробега волн через волноводы самих датчиков. Ниже на (рис. 4.6) приведены сигналы, полученные при калибровке измерительной компоновки.

Согласно требованиям ГОСТ 21153.7–75, точность определения времени пробега упругого импульса должны быть не менее $0,5 \cdot 10^{-6}$ сек. При этом время измеряется до десятых долей микросекунды, а количество образцов при проведении измерений на образцах должно обеспечивать получение средних расчётных величин скоростей распространения упругих волн с точностью не менее 10% и степенью надёжности 0.95. Используемые в качестве АЦП осциллографы В320, В322 и В386 обеспечивают измерение временных интервалов от 0 до 50 мкс с точностью не хуже, чем $\pm 0.1\%$. Что значительно выше требований ГОСТ. Для достижения степени надёжности 0.95 при 10% точности следует брать не менее 4 образцов.

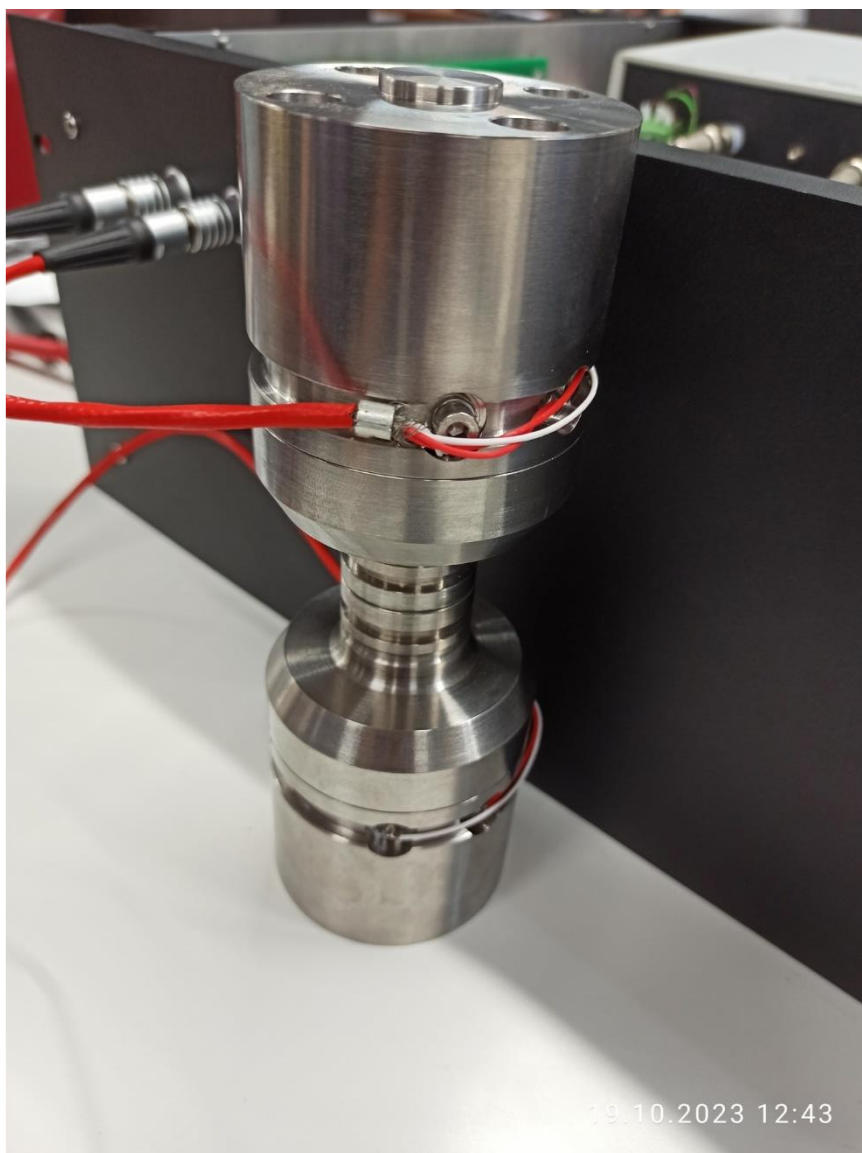


Рисунок 4.4 – Датчики для измерения скоростей акустических волн на образцах керна диаметром 30 мм.



Рисунок 4.5 – Стенд для калибровки датчиков (измерения времени задержки импульса через материал волновода) согласно ГОСТ 21153.7–75.

Время распространения продольной волны через датчики 12,95 мкс, поперечной волны 24,74 мкс. При суммарной длине волноводов $39 \times 2 = 78$ мм, измеренная в данном эксперименте скорость продольной волны: $78 / 12,95 \times 1000 = 6023$ м/с, при этом табличная скорость в титане 6180 м/с, ошибка измерения 157 м/с что составляет около 2,5%.

Для поперечной волны $78 / 24,74 \times 1000 = 3153$ м/с. Табличная скорость 3120 м/с.

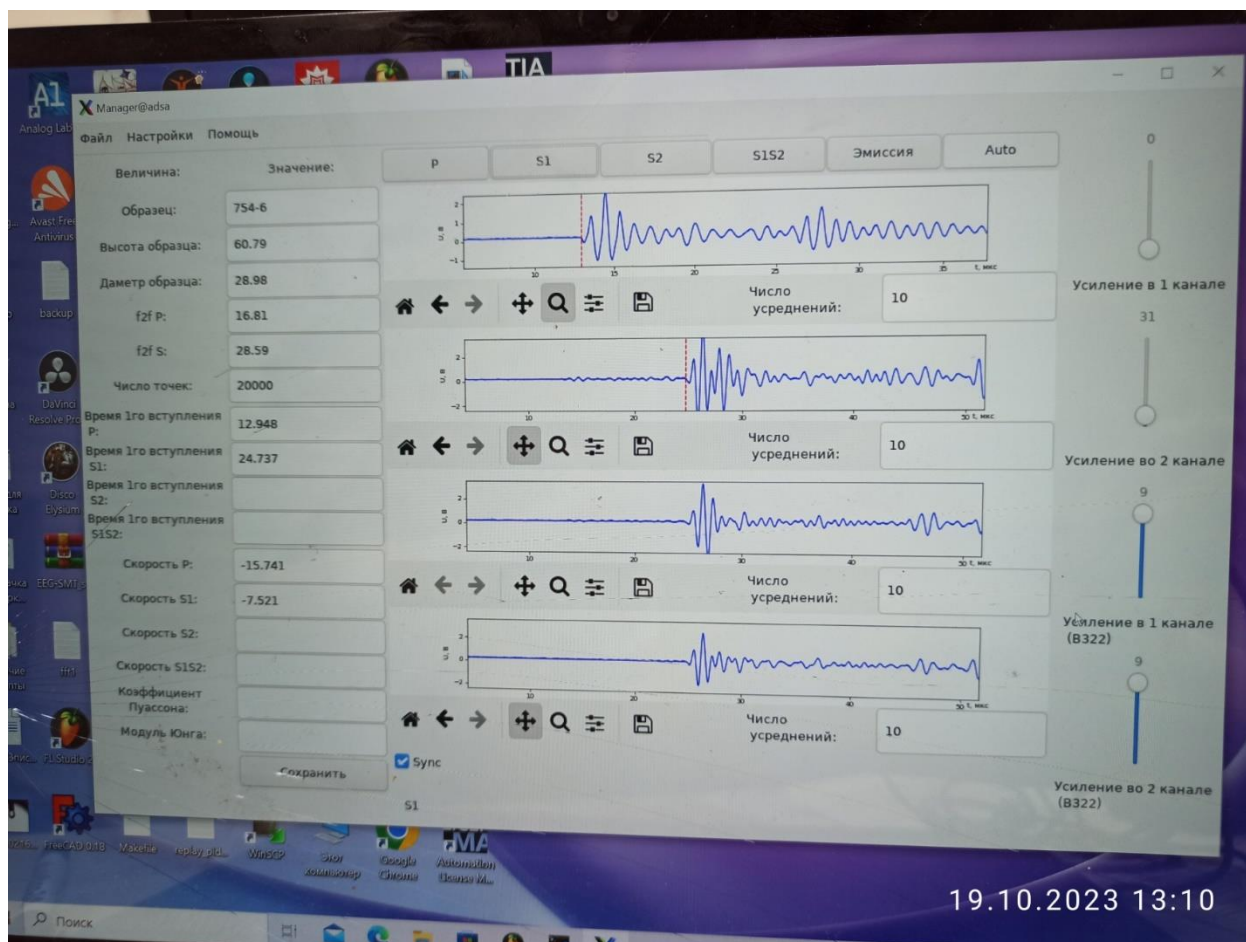


Рисунок 4.6 – Измерение времени задержки импульса через волноводы датчиков (измерение face-to-face) согласно ГОСТ 21153.7–75.

4.2 Определение величин скоростей распространения упругих колебаний в образцах

Для измерения времени распространения акустических волн можно использовать специальные калибровочные образцы, изготовленные из различных материалов таких как титан, оргстекло, латунь, сталь и др, так и специальные синтетические образцы по свойствам приближенные к образцам керна горных пород естественного происхождения. Образцы, поднятые с целевой глубины углеводородного коллектора нефтегазовой скважины достаточно дороги для первоначальной настройки и разработки оборудования именно поэтому для калибровки и обучения персонала, эксплуатирующего

оборудование обосновано применять калибровочные либо синтетические образцы полученные искусственно.



Рисунок 4.7 – Искусственный образец диаметром 30 мм и длиной 60 мм, изготовленный по заказу автора из наждачного камня.

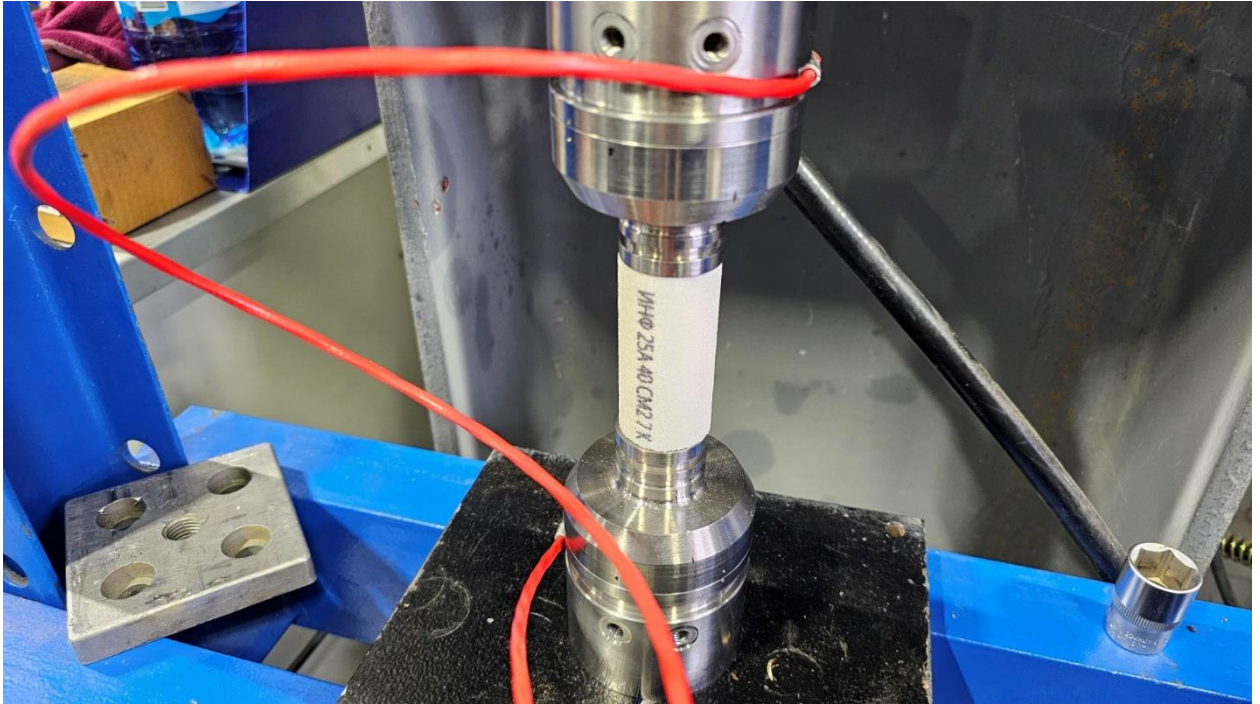


Рисунок 4.8 – Искусственный образец на стенде под осевой нагрузкой.

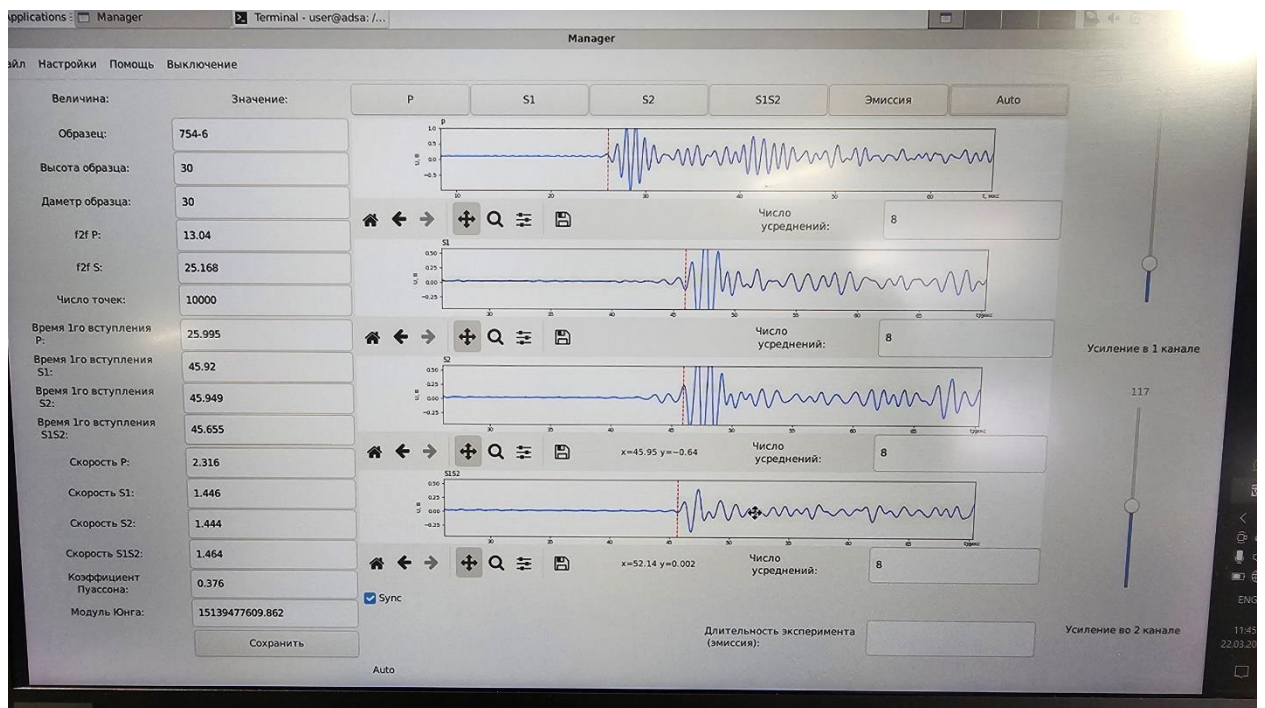


Рисунок 4.9 – Измерение времени прохождения акустических волн через искусственный образец. В настройках программы не верно указана длина образца, вычисленные скорости нужно умножить на коэффициент 2.

Для измерения скорости прохождения продольной волны согласно ГОСТ 21153.7–75 через данный синтетический образец нужно из времени первого вступления продольной волны отнять время калибровки face-to-face и далее разделить длину образца на полученную разницу во времени:

$25,995 - 13,04 = 12,955$ мкс, время распространения продольной волны (Р) через образец. Скорость продольной волны при длине образца 60 мм: $60 / 12,955 * 1000 = 4631$ м/с.

$45,655 - 25,168 = 20,487$ мкс, время распространения поперечной волны (S1+S2) через образец. Скорость поперечной волны: $60 / 20,487 * 1000 = 2929$ м/с.

Ниже приведены примеры измерений времени прохождения волн на стальном образце и образце керна горной породы.



Рисунок 4.10 – Стальной образец на стенде под осевой нагрузкой.



Рисунок 4.11 – Образец керна горной породы на стенде одноосного нагружения.



Рисунок 4.12 – Общий вид сигналов, полученных на образце керна горной породы.

Время первого вступления волны Р – 21,476 мкс, волны S1 – 38,592 мкс.

4.3 Определение модулей упругости

Вычисленные скорости прохождения акустических волн через образец можно использовать для нахождения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, для этого используются общеизвестные формулы:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{2 \cdot \frac{1-\nu}{1-2 \cdot \nu}} \quad (4.1)$$

Отношение скорости продольной волны к скорости поперечной выражается только через коэффициент Пуассона.

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}} \quad (4.2)$$

Скорость поперечной волны можно выразить через Е - модуль Юнга, плотность породы и коэффициент Пуассона.

Определённые таким образом из измеренных скоростей волн упругие константы материала образца являются динамическими коэффициентами упругости горной породы, или другими словами – определяемые динамическим методом. Дополнительно, при проведении экспериментов с нагружением образца в ячейке, производится измерение деформации образца, как уже было указано ранее, с помощью тензодатчиков либо индуктивных датчиков деформации образца LVDT.



Рисунок 4.13 – Датчик LVDT и измерительный шток для измерения деформации керна в ячейке под давлением и температуре разработанный автором.

Полученные из измерений продольной и поперечной деформации модуль Юнга и коэффициент Пуассона являются статическими модулями упругости образца горной породы. А коэффициенты пропорциональности между статическими и динамическими модулями упругости могут быть использованы для оценки статических модулей упругости в скважине по данным акустического каротажа. Таким образом можно использовать данные полученные непосредственно в лаборатории для оценки и моделирования напряжённого состояния пород в скважине. Данный метод оценки напряжённого состояния достаточно широко известен и применяется на практике.

4.4 Регистрация сигналов акустической эмиссии и проверка выполнения закона Омори после слома образцов керна

Одной из актуальных геологических задач, которую можно решить с помощью разработанного оборудования - является анализ экспериментальных

данных на соответствие закону Омори для образцов керна горной породы при одноосном нагружении до разрушения [Анчугов, 2025].

Для регистрации акустической эмиссии в двухканальном режиме достаточно не использовать источник акустических колебаний и подключить ко входу предварительного усилителя обе пьезокерамические продольно поляризованные пьезопластины с излучающего и приёмного плунжера (датчика). Для этого используется та же измерительная компоновка, приведённая на (рис. 4.3) или (рис. 4.8). Регистрация сигналов акустической эмиссии производилась специализированным блоком АЦП Аурис В320 с частотой дискретизации 1 МГц. Несмотря на то, что данный блок в режиме работы как осциллограф оцифровывает данные с частотами до 150 МГц включительно, тем не менее в режиме непрерывной регистрации и передачи данных в реальном времени, частоты дискретизации на два порядка ниже. Выбор частоты дискретизации определяется задачами эксперимента и пропускной способностью сети передачи данных. Для записи сигналов и их визуализации применялось программное обеспечение, разработанное для работы как на операционных системах Windows, так и Linux.

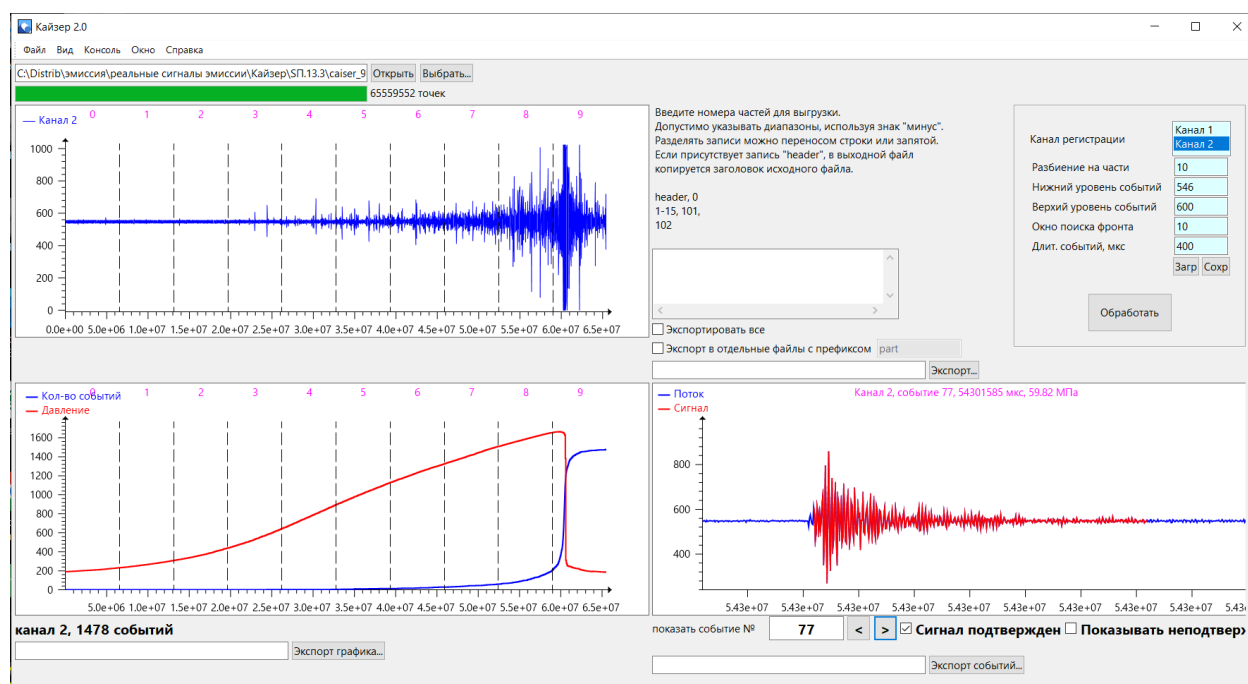


Рисунок 4.14 – Интерфейс программы регистрации и визуализации данных акустической эмиссии при проведении экспериментов исследования эффекта Кайзера на образцах керна, автор М. Романюта.

Описание выполненного эксперимента

Эксперимент по исследованию эффекта Кайзера проводится на более чем 50 образцах керна различной литологии размером 60х30 мм в одноосном режиме нагружения до разрушения. При этом используется гидравлически управляемый пресс и плиты нагружения (акустические плунжера) с установленными внутри пьезопластинами с резонансной частотой 1 МГц. Скорость осевого нагружения составляет 60 МПа/мин, без обжимного давления. При этом ячейка стабилметра оборудована датчиками продольной и поперечной деформации образца и датчиком усилия на оси. Интервал записи данных о текущей деформации образца и его нагруженном состоянии составляет одну секунду.

Калининым С.А. с коллегами экспериментально исследовался эффект Кайзера [Lavrov, 2003; Цветков и др., 2022]. Для этого были специально подготовлены ориентированные образцы керна и собрана измерительная система для регистрации сигналов акустической эмиссии в двухканальном режиме, состоящая из датчиков, непосредственно контактирующих с образцом (они же передают нагрузку на образец), двухканального усилителя сигнала на 40 Дб, и регистратора Аурис В320 с управляющим компьютером и проведены необходимые эксперименты. Запись данных на компьютер проводится с помощью специально разработанного программного обеспечения [Решетова, Анчугов, 2021].

Частота дискретизации составляет 1 МГц, разрешение 10 бит, что позволило на имеющемся в наличии блоке регистрации собирать данные в непрерывном режиме, при этом все эксперименты заканчиваются разрушением образца в течение первых минут. Описание и результаты экспериментов по исследованию эффекта Кайзера представлены в публикации [Цветков и др., 2022]. Здесь же

рассматривается другой аспект: полученные данные анализируются с точки зрения сейсмологии, считая, что момент разрушения образца — это главное сейсмическое событие, а все сигналы акустической эмиссии, которые следуют после, — это афтершоки основного события. Так проверяется, выполняется ли фундаментальный закон Омори для полученных в результате экспериментов данных. В сейсмологии при анализе наблюдений закон Омори [Omori, 1894], обычно представляют степенной функцией известной как “закон Омори-Утсу”. Данная формула предложена Хирано в 1924 году [Hirano, 1924].

$$n(t) = \frac{k}{(c+t)^p} \quad (4.3)$$

Исследовано 55 образцов различной литологии. Получены данные акустической эмиссии для 46 образцов в двухканальном режиме. Для всех исследованных образцов выделено время каждого события, их максимальные амплитуды, а также отмечен момент разрушения образца. Для поиска событий в данных используется алгоритм Байера-Крадольфера [Анчугов, 2023] а также простой пороговый алгоритм. С установкой порога обнаружения на уровне не более двукратного превышения уровня шума в канале.

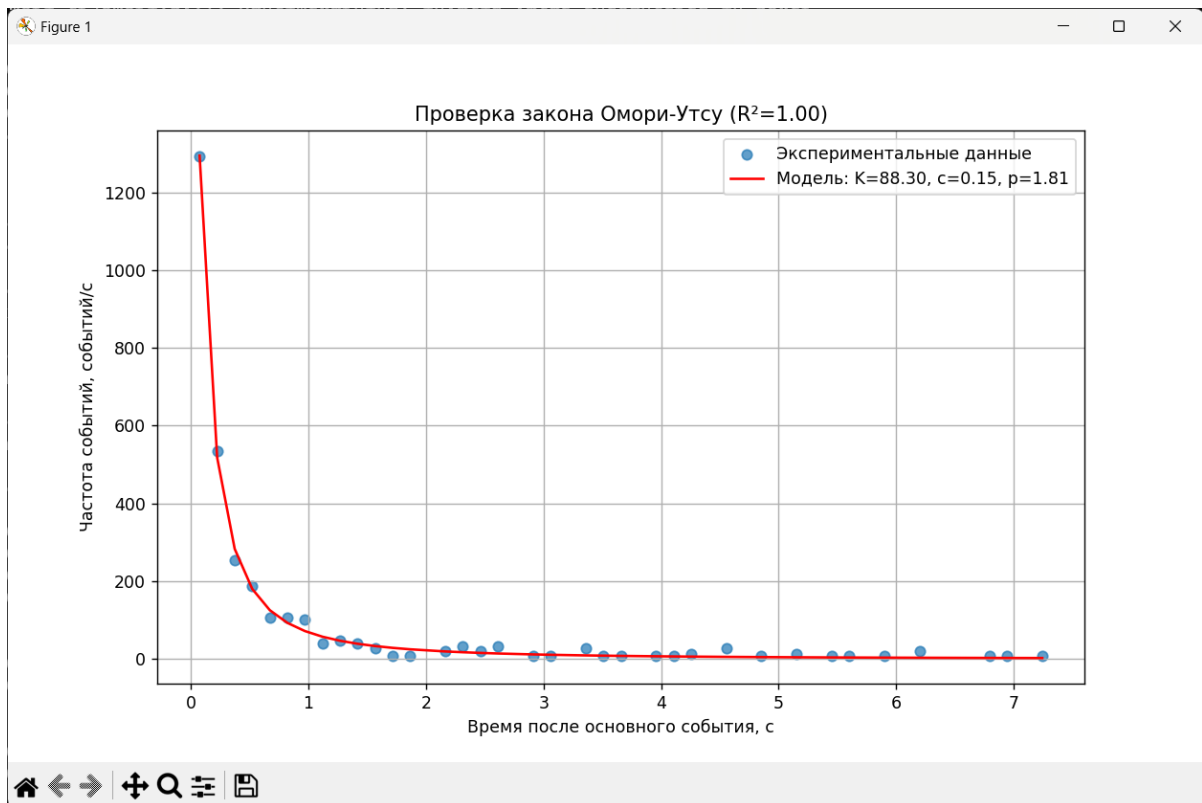


Рисунок 4.15 – Временной ряд выделенных с помощью порогового алгоритма афтершоков в 1-ом канале для образца 16.1 из крупнозернистого песчаника.

Максимальное усилие слома для образца 16.1 составляет 42.3 МПа.

Зарегистрировано в 1-ом канале:

- всего событий по пороговому детектору - 2727.

Зарегистрировано во 2-ом канале:

- всего событий по пороговому детектору – 2292,

- слом образца произошёл на 53.71 секунде.

Событий после слома в 1-ом канале по порогу - 647, во 2-ом - 379. События продолжали регистрироваться в течение 7 секунд после слома образца.

Из анализа временных рядов данных следует что:

- Закон Омори применим к лабораторным данным с учётом условий проведения эксперимента, записанным в двухканальном режиме.
- Аналогии и различия в параметрах p , c между результатами, полученными при лабораторном эксперименте и природными сейсмическими явлениями, связаны с разными масштабами времени и энергии. В то же время прослеживается общность механизмов разрушения в разных масштабах. Одноосное нагружение образцов при простом эксперименте позволяет моделировать природные явления.

Для современных блоков регистрации сигналов акустической эмиссии используются новые модули АЦП Аурис В-386, (см. рис. 2.7). Которые обладают не только более высокой скоростью передачи данных 1 Гбит по сети Ethernet по сравнению с блоком АЦП В-320 предыдущего поколения, где использовалась скорость 100 Мбит/сек, но и более высоким вертикальным разрешением 16 бит по сравнению с 10 битами В320, а также позволяют оцифровывать сигналы с частотами дискретизации 5 и 10 МГц. Ниже приведены зарегистрированные сигналы и их спектры, полученные с АЦП В-320.

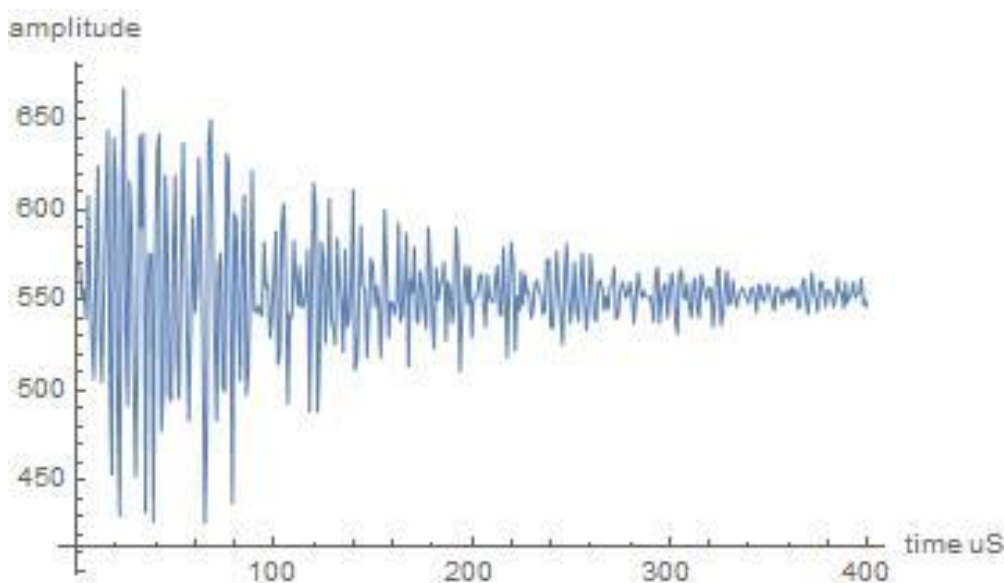


Рисунок 4.16 – Запись типичного сигнала акустической эмиссии при экспериментах по разрушению керна на установке с ячейкой нагружения УИДК производства компании «Геологика».

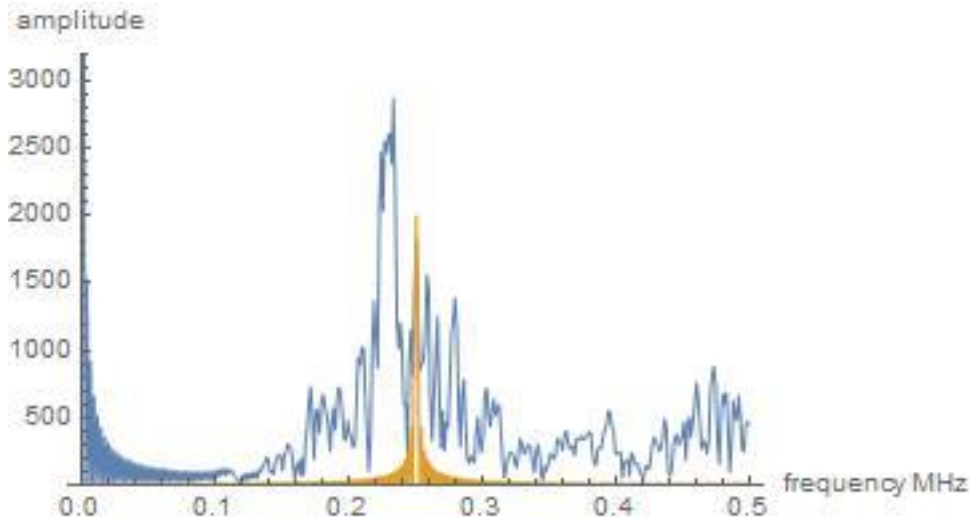


Рисунок 4.17 – Спектр сигнала акустической эмиссии, для наглядности отфильтрованы нижние частоты. Маркером выделена частота 250 кГц.

Для многоканальной регистрации акустической эмиссии совместно с компанией НПК «Аурис» был начат процесс разработки перспективного измерительного многоканального комплекса на основе регистратора В-386 со входом внешней синхронизации.

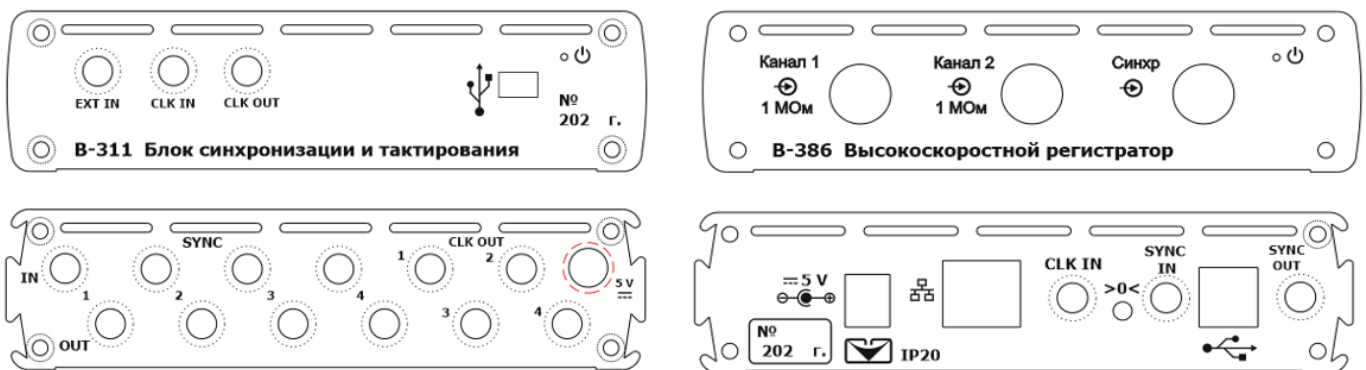


Рисунок 4.18 – Вид панелей перспективного регистратора.

Оборудование в данный момент ещё находится в стадии разработки, скорость передачи данных через сеть Ethernet 1 Гбит/с, максимальная частота

дискретизации непрерывного сигнала 10 МГц, два канала регистрации. Соответственно для построения системы регистрации на 16 каналов требуется восемь блоков АЦП и как минимум два блока синхронизации. Такая измерительная система допускает кратно наращивать число каналов регистрации.

4.5 Использование данных акустической эмиссии для управления ходом эксперимента при многостадийном нагружении образца. Эффект Кайзера

Методы построения паспорта прочности горной породы:

Известно, что паспорт прочности (ГОСТ 21153.8–88) горных пород строится на основе тестов не менее четырёх образцов (рис. 4.19). Основной проблемой построения паспорта прочности является несовершенство образцов керна в виду их высокой неоднородности, а в некоторых случаях, некачественной подготовки образцов к тестированию.

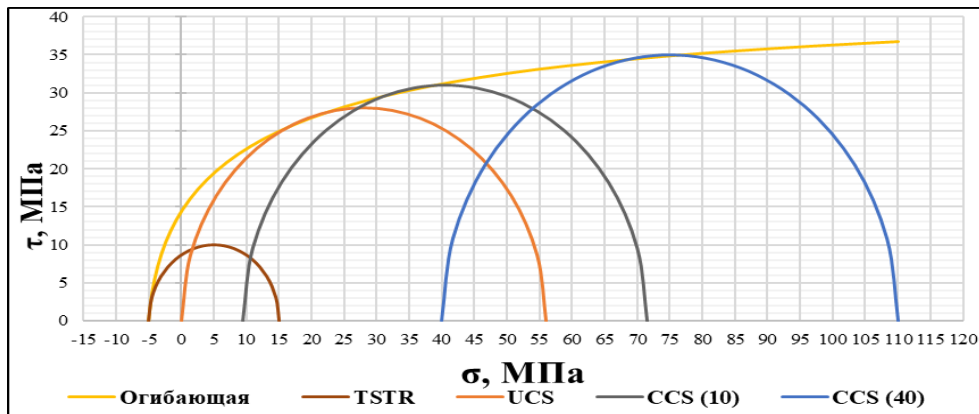


Рисунок 4.19 – Построение паспорта прочности горной породы. Рисунок согласно ГОСТ 21153.8–88.

Перспективным направлением является построение паспорта прочности горной породы на основе многостадийного нагружения одного образца. Образец помещается в камеру прочности (стабилометр) в манжету, и подвергается псевдотрёхосному сжатию. При этом осевое и обжимное усилие на образце в ходе эксперимента изменяется (увеличивается) в зависимости от интенсивности

регистрируемых сигналов акустической эмиссии (см. рис. 4.19). Дополнительная информация о напряженно-деформированном состоянии (НДС) образца при данном уровне обжима получается с помощью системы регистрации сигналов акустической эмиссии, разработанной автором. Данная система работает в двухканальном пассивном режиме. В частности, для некоторых пород, до момента слома, возрастает количество сигналов акустической эмиссии (см. рис. 4.19). Использование этого факта предоставляет возможность контролировать степень близости состояния образца к разрушению на отдельной стадии. Как только суммарное количество событий акустической эмиссии начинает резко возрастать осевое усилие понижается с одновременным увеличением обжимного. При этом осевое усилие сбрасывается до нового гидростатического состояния образца, затем на новой стадии обжим фиксируется, а осевое усилие вновь начинает повышаться до резкого возрастания на данной стадии количества событий акустической эмиссии и так повторяется на протяжении нескольких циклов 3-5.

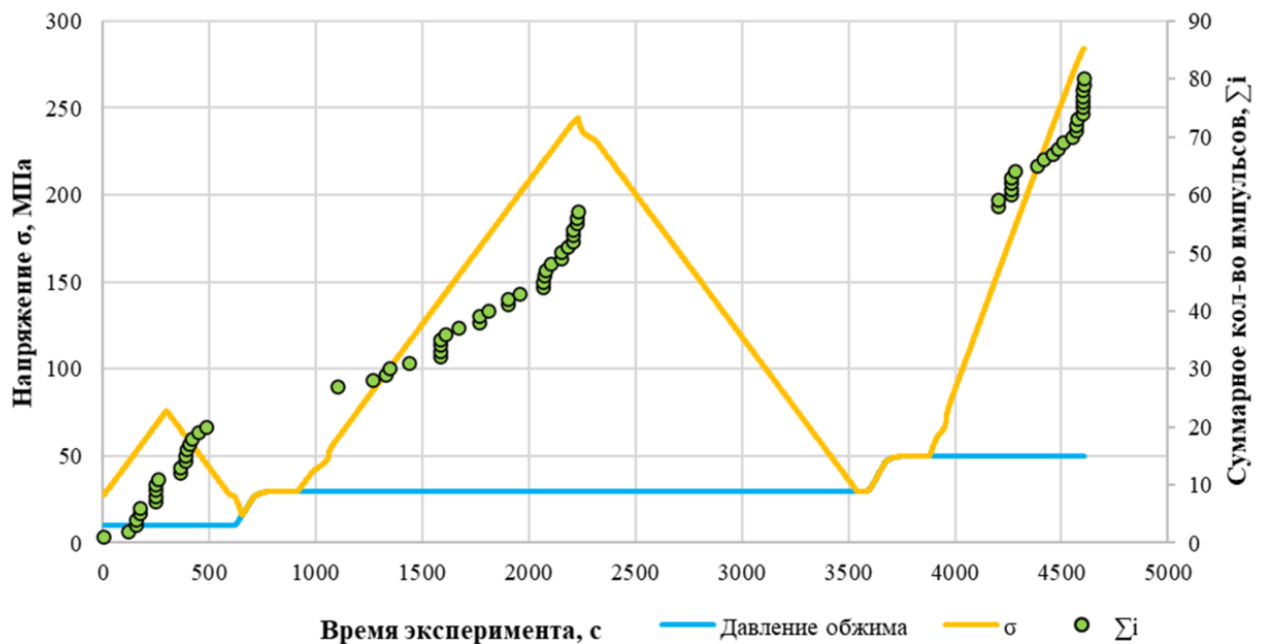


Рисунок 4.20 – Регистрация акустической эмиссии при многостадийном нагружении образца. Желтым обозначена осевая нагрузка на образец, зелёным отмечено количество событий акустической эмиссии [Цветков и др., 2022].

Таким образом можно значительно уменьшить количество образцов, которые нужно нагрузить до разрушения для построения паспорта прочности горной породы.

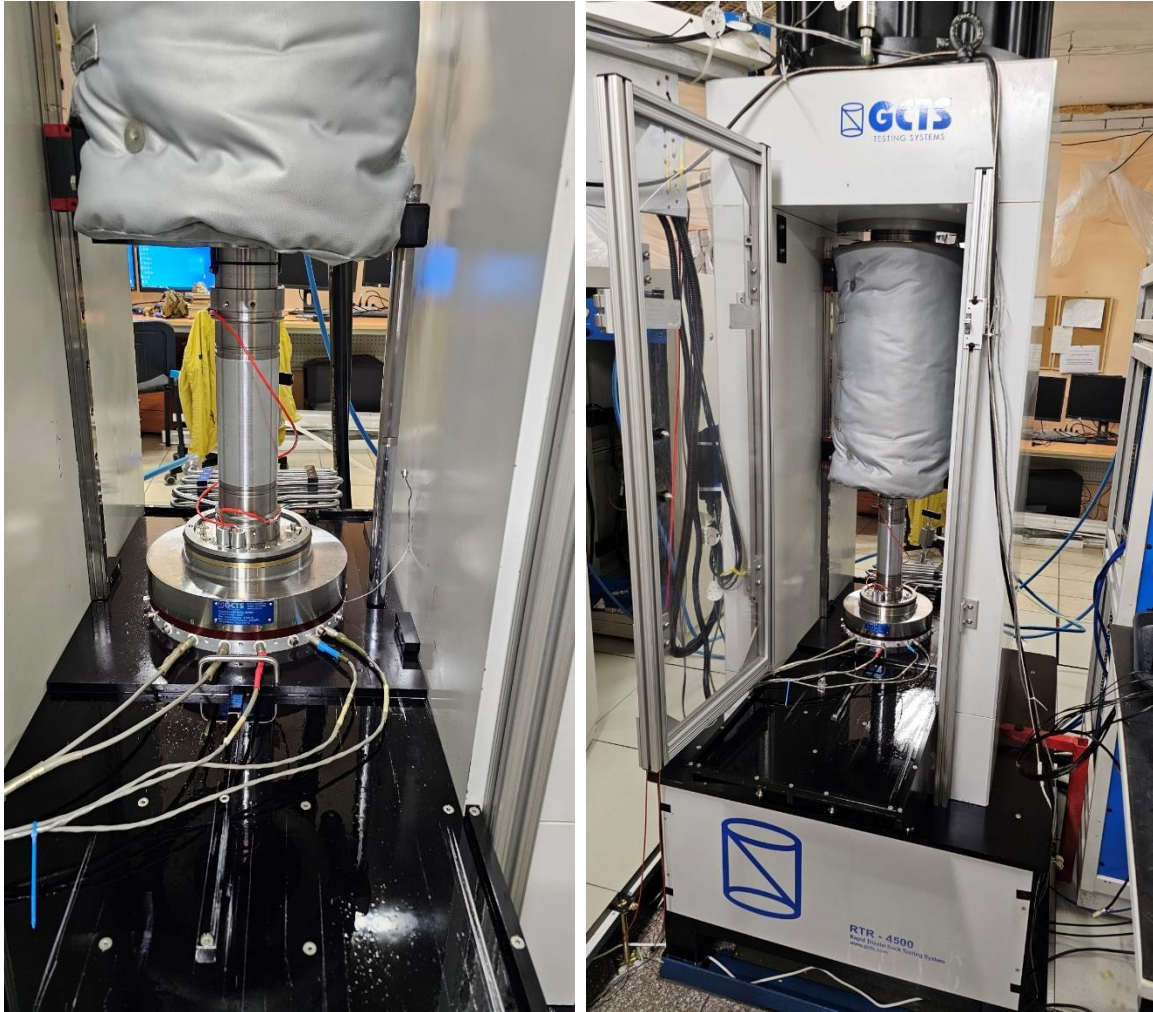
Эффект Кайзера

Для оценки НДС (напряженно-деформируемого состояния) на основе керновых исследований применяется один из известных методов опирающийся на теорию, разработанную Джозефом Кайзером. Открытый им эффект «памяти» [Panasiyan, 1990] горных пород получил название «эффект Кайзера» – увеличение числа сигналов акустической эмиссии при достижении предыдущей максимальной нагрузки на образец [Лавгов, 2003]. Данный эффект даёт возможность определить полное напряженное состояние в некоторой точке месторождения при достаточном количестве образцов. Оборудование, в разработке которого автор принимал участие, допускает проводить такие исследования [Цветков и др., 2022]. Следует отметить, что для изучения эффекта Кайзера требуется ориентированный керн.

4.6 Примеры внедрения разработанного оборудования

Измерительные системы и оборудование, разработанное автором лично и в составе коллектива инженеров, в настоящий момент активно эксплуатируется во множестве отраслевых институтов и исследовательских центров нефтегазовой направленности. Оборудование работает в компаниях «Лукойл», «Татнефть», «Газпром нефть» и множестве других. К примеру, в Институте физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта осуществлено внедрение двух

измерительных систем в составе блоков измерения и нескольких комплектов датчиков. Одна из измерительных систем специально разработана для возможности использования совместно с прессом RTR4500 для геомеханических исследований образцов керна производства компании GCTS, находящимся у института в эксплуатации. Что подтверждено соответствующим актом о внедрении.



Рисунки 4.21 и 4.22 – Пресс GCTS RTR4500 в Институте физики Земли работает совместно с измерительной системой и акустическими датчиками разработки автора.

Осуществлена настройка программного обеспечения для возможности использования оригинального программного обеспечения установки GCTS и программного обеспечения, разработанного автором для проведения геомеханических экспериментов.

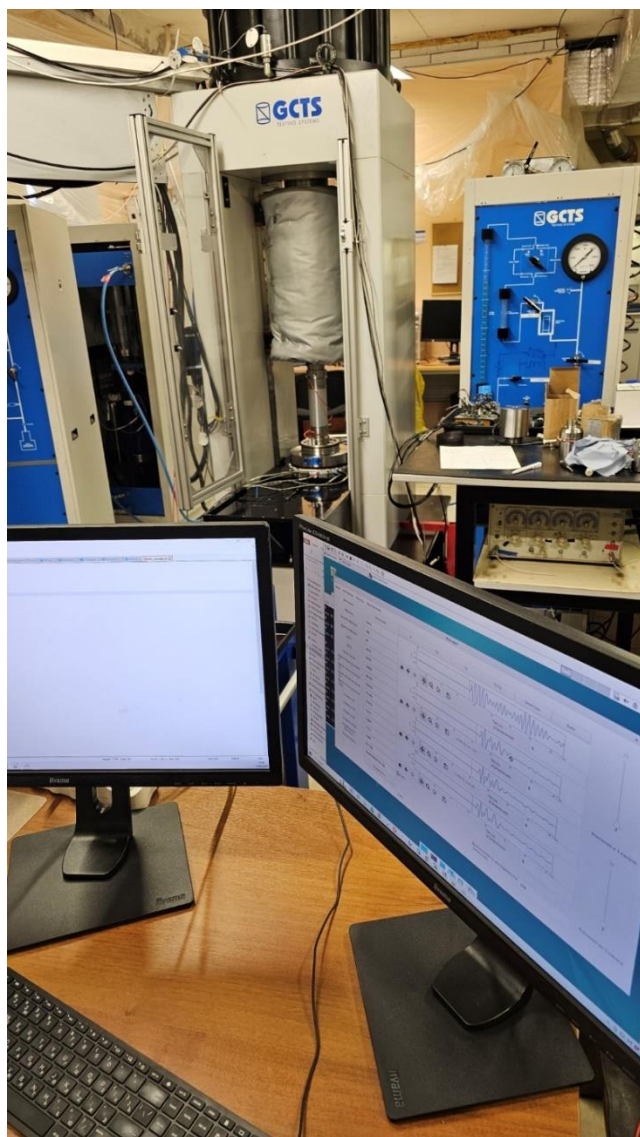


Рисунок 4.23 – Разработанное автором программное обеспечение работает на компьютерах управления установкой RTR4500 GCTS.

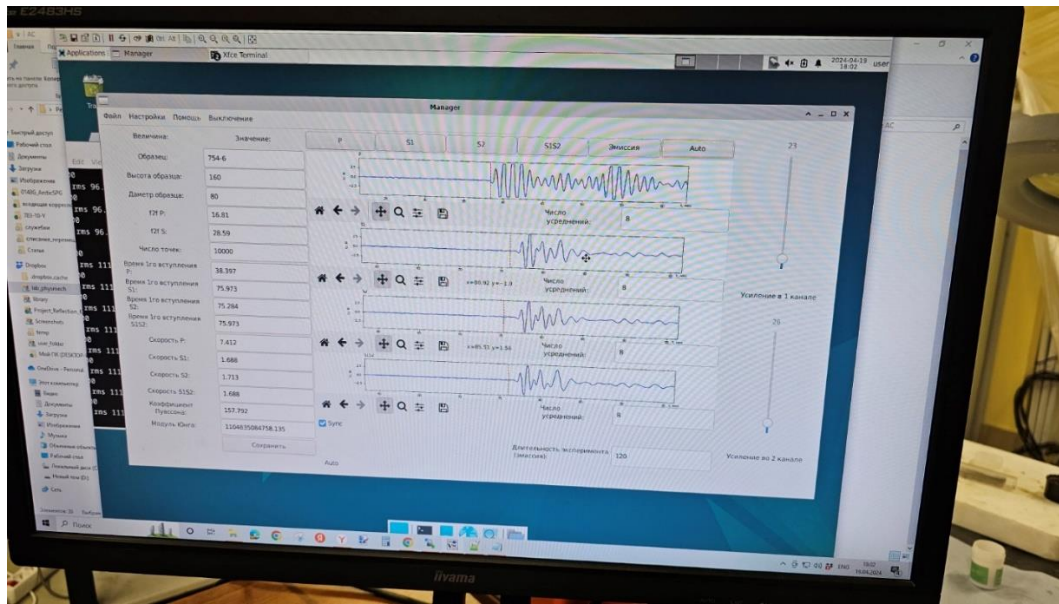


Рисунок 4.24 – Программное обеспечение на компьютерах управления установкой RTR4500 GCTS.

Выводы по Главе 4

1. Выделение времени первого вступления для измерения времени прохождения акустического импульса через образец керна горной породы в основном осуществляется вручную. Также можно применять автоматические алгоритмы выделения времени первого вступления, к примеру Байера-Крадольтфера [Анчугов, 2023].
2. Для регистрации сигналов акустической эмиссии на образцах керна горной породы диаметром 30 мм и длиной 60 мм следует применять блоки АЦП с частотой дискретизации не менее 1 МГц, так как полоса частот сигналов акустической эмиссии шире 300 кГц.
3. Разработанное автором оборудование эксплуатируется в различных исследовательских организациях страны, есть примеры внедрения, к примеру в ИФЗ РАН.
4. Для управления ходом многостадийного эксперимента по нагружению образца может быть использована система регистрации акустической эмиссии, работающая в двухканальном режиме без дополнительных датчиков по периметру образца.

Глава 5. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

5.1 Моделирование акустической эмиссии

В целях моделирования требуется разработать программное обеспечение, предназначенное для восстановления координат событий акустической эмиссии по записям реального физического эксперимента. Для этого нужно создание некоторого программного продукта, который позволит проводить виртуальный эксперимент, начиная от имитации физического сжатия образца, возникновения и записи сигналов акустической эмиссии на виртуальных датчиках и их восстановления при решении обратной задачи. Данные и выводы, полученные в ходе численного моделирования, могут быть использованы для оценки возможной конфигурации многоканальной системы сбора данных, частотного спектра сигналов акустической эмиссии, обоснования использования необходимого количества каналов регистрации и расположения датчиков относительно керна.

Проведение виртуального физического эксперимента проходит в несколько этапов.

На первом этапе моделирования имитируется сжатие образца, при котором вследствие внутренних напряжений и деформаций, возникают локальные источники акустико-эмиссионных волн в разные моменты времени. Возникающее суммарное волновое поле регистрируется на виртуальных датчиках, расположенных с внешней стороны моделируемого образца.

Второй этап подразумевает установление координат излучателей волн. Единственным доступным материалом при этом служат только показания виртуальной регистрирующей аппаратуры, зафиксированные на первом этапе. Задача заключается не только в определении пространственных координат источников, но и восстановлении моментов их активации. Обратная задача решается посредством метода зеркального обращения времени, так же называемый методом продолжения волнового поля в обратном времени.

Англоязычные исследователи именуют указанный подход Time Reversal Mirror (TRM) [Prada, Fink, 1998; Fink, Prada, 2001; Fink, 2002, 2008; Parvasi et al., 2016]. Остановимся на его описании. Для иллюстрации работы метода был разработан программный код на языке Python с использованием основанной на открытом коде библиотеки программ Madagascar [Анчугов, 2021]. Библиотека Madagascar предназначена как для учебных целей, так и для численных экспериментов, в частности она делает возможным помещать в среду точечные источники сейсмических импульсов и рассчитывать создаваемое ими волновое поле. Более подробно численные эксперименты описаны в статье [Решетова, Анчугов, 2021]. Метод зеркального обращения времени основан на характеристике волнового уравнения, известной как взаимность: так, если дано решение волнового уравнения, то обращение времени (с использованием отрицательного времени) этого решения также является решением. Некоторые среды не являются взаимными (например, очень вязкие, нелинейные). Но многие среды, в том числе звуковые волны в воде, воздухе, упругом материале, акустические волны в человеческом теле удовлетворяют этому принципу. Если рассматривать плоский случай, то этот метод работает следующим образом. Пусть есть программный модельный образец керна, в котором в разное время возникают четыре трещины, которые в свою очередь являются источниками сигналов акустической эмиссии (см. рис. 5.1, рис. 5.2). Задача моделируется в двумерном пространстве. Образец окружён размещёнными по контуру приёмниками, регистрирующими приходящие сигналы. Последовательности зарегистрированных данных, представленные на (рис. 5.3, 5.4, 5.5), подвергаются временной инверсии и возвращаются в окружающую среду в форме коротких импульсов. При этом координаты источников, генерирующих инвертированный сигнал, совпадают с местоположениями соответствующих приёмников. Временная инверсия инициирует распространение сигналов в среде в обратном направлении, при котором траектории проходят все стадии множественного рассеяния, переотражения и рефракции, характерные для прямого пути распространения, и

сходятся в точке первоначального источника сигнала (рис. 5.6, 5.7). Данный подход обладает способностью выявлять пространственную локализацию и временные параметры актов генерации акустических колебаний, вызванных, например, разрывами микротрещин, внутриматериальными повреждениями или иными явлениями, обусловленными деформационно-напряжённым состоянием окружающей среды.

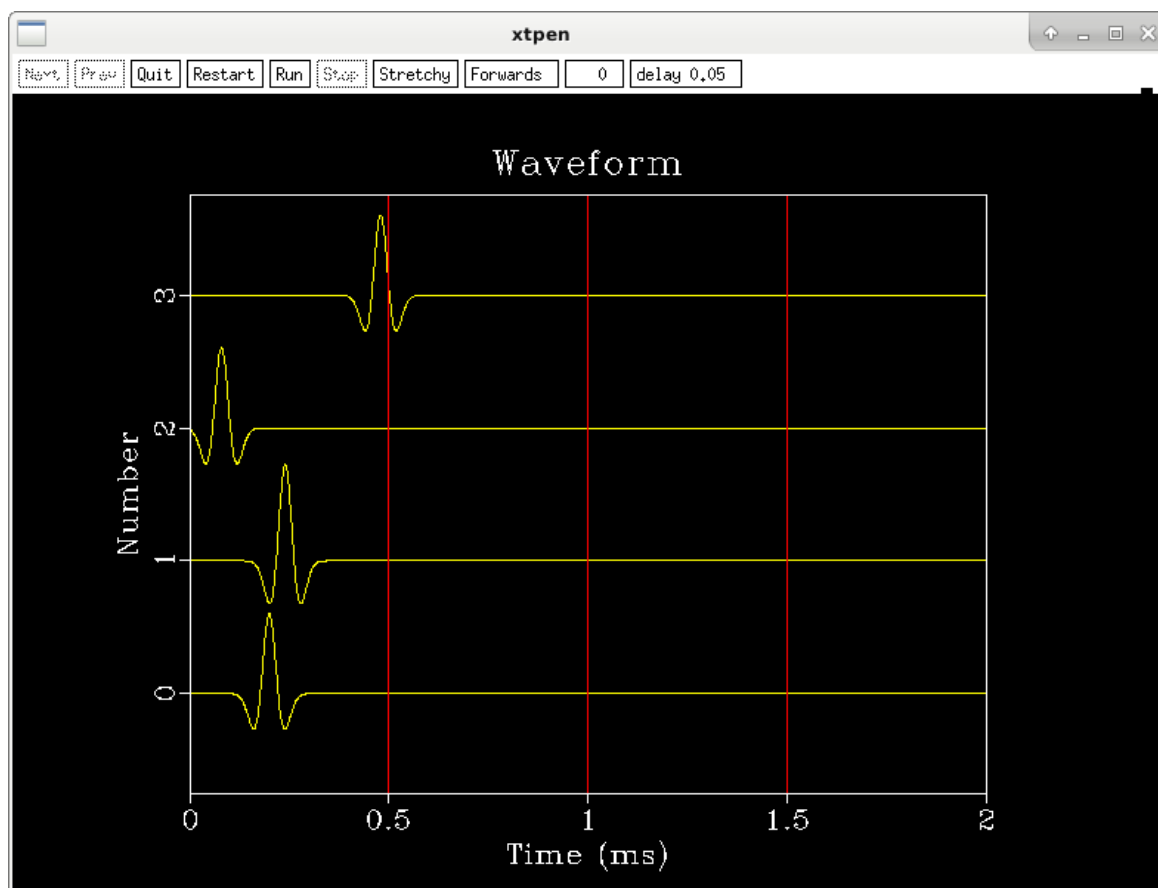


Рисунок 5.1 – Источники акустической эмиссии внутри керна, срабатывающие в разное время. В качестве формы импульса источника выбран импульс Рикера.

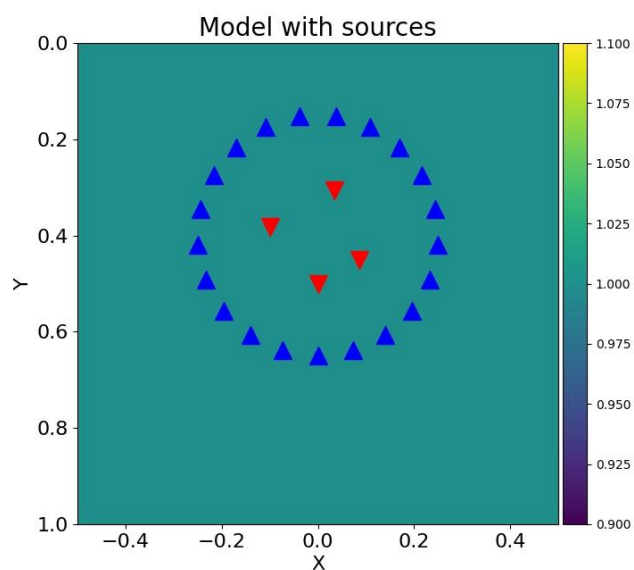


Рисунок 5.2 – Плоская задача, четыре точечных источника разной интенсивности (положение выбрано случайно) находящиеся внутри образца керна обозначены красным, приёмники по кругу на поверхности образца обозначены синим.

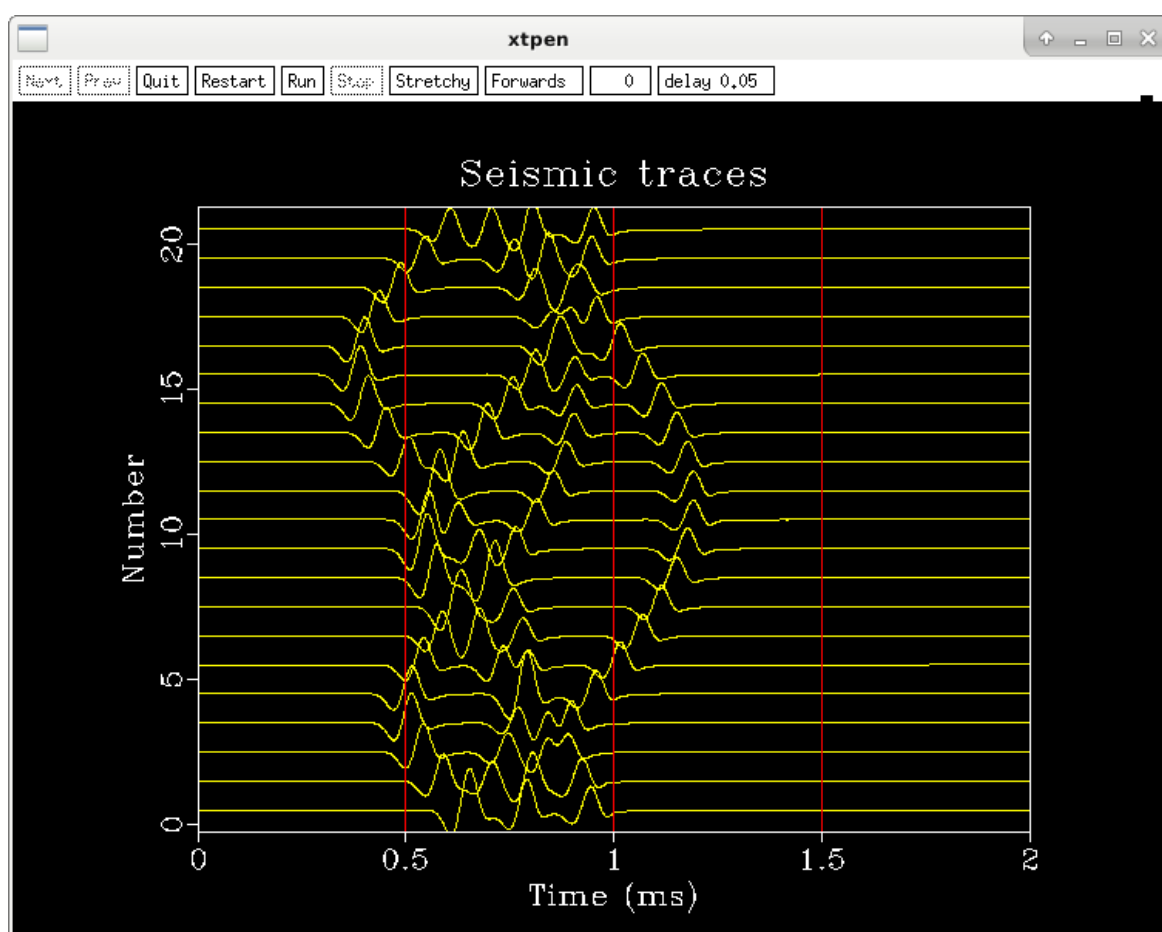


Рисунок 5.3 – Сигналы, зарегистрированные приёмниками по периметру образца.

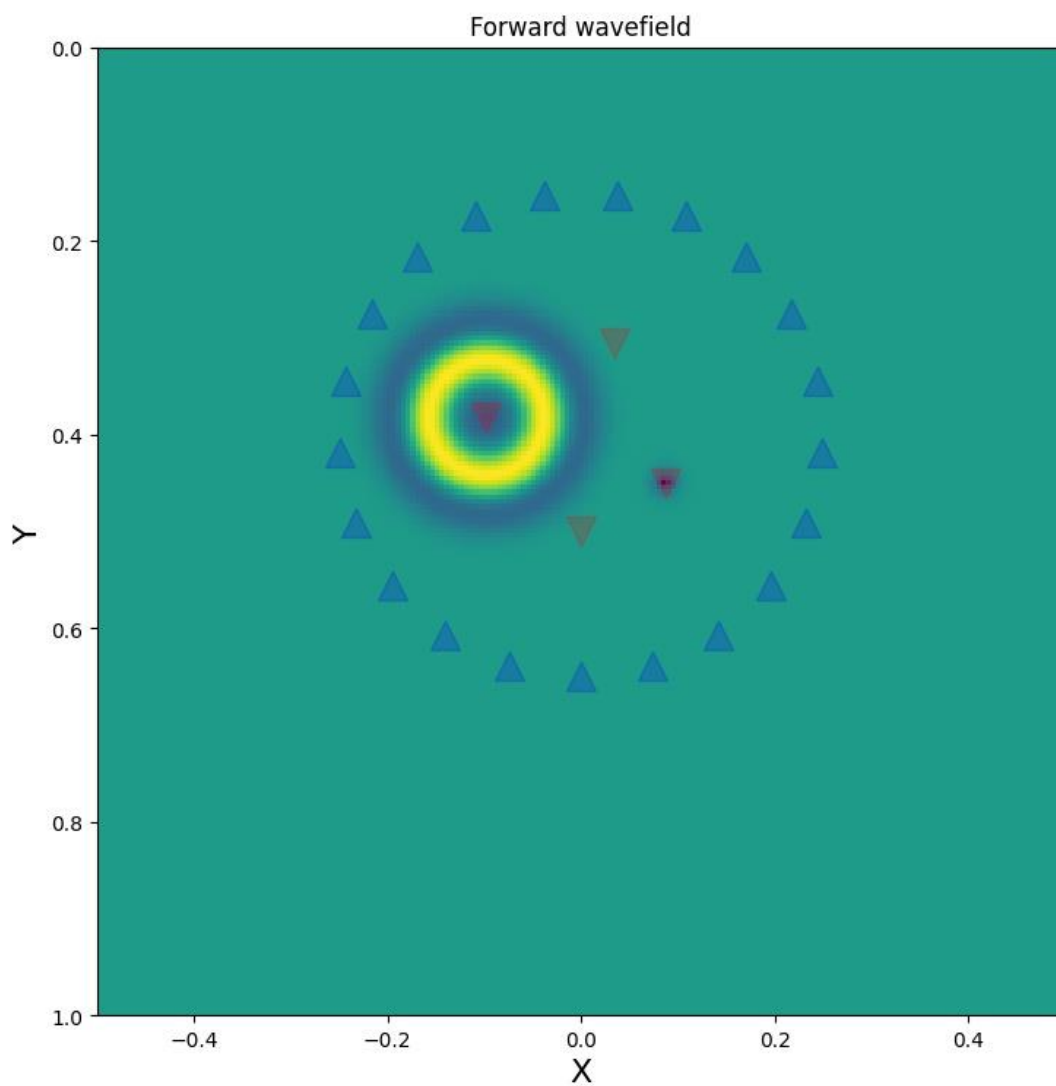


Рисунок 5.4 – Снимок волнового поля в некоторый момент времени, близкий к начальному, сработал первый источник и начал срабатывать второй.

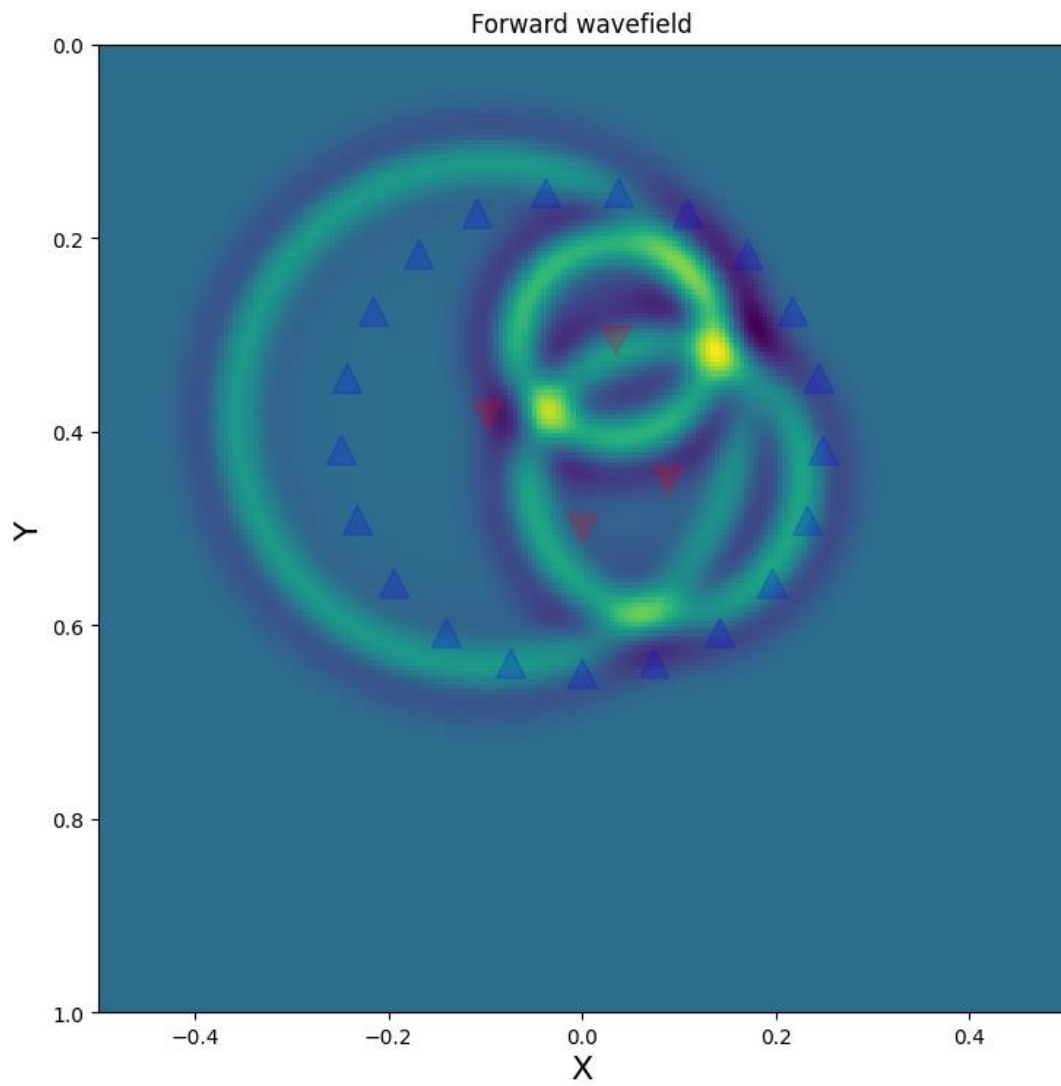


Рисунок 5.5 – Снимок волнового поля спустя некоторое время, сработало три точечных источника.

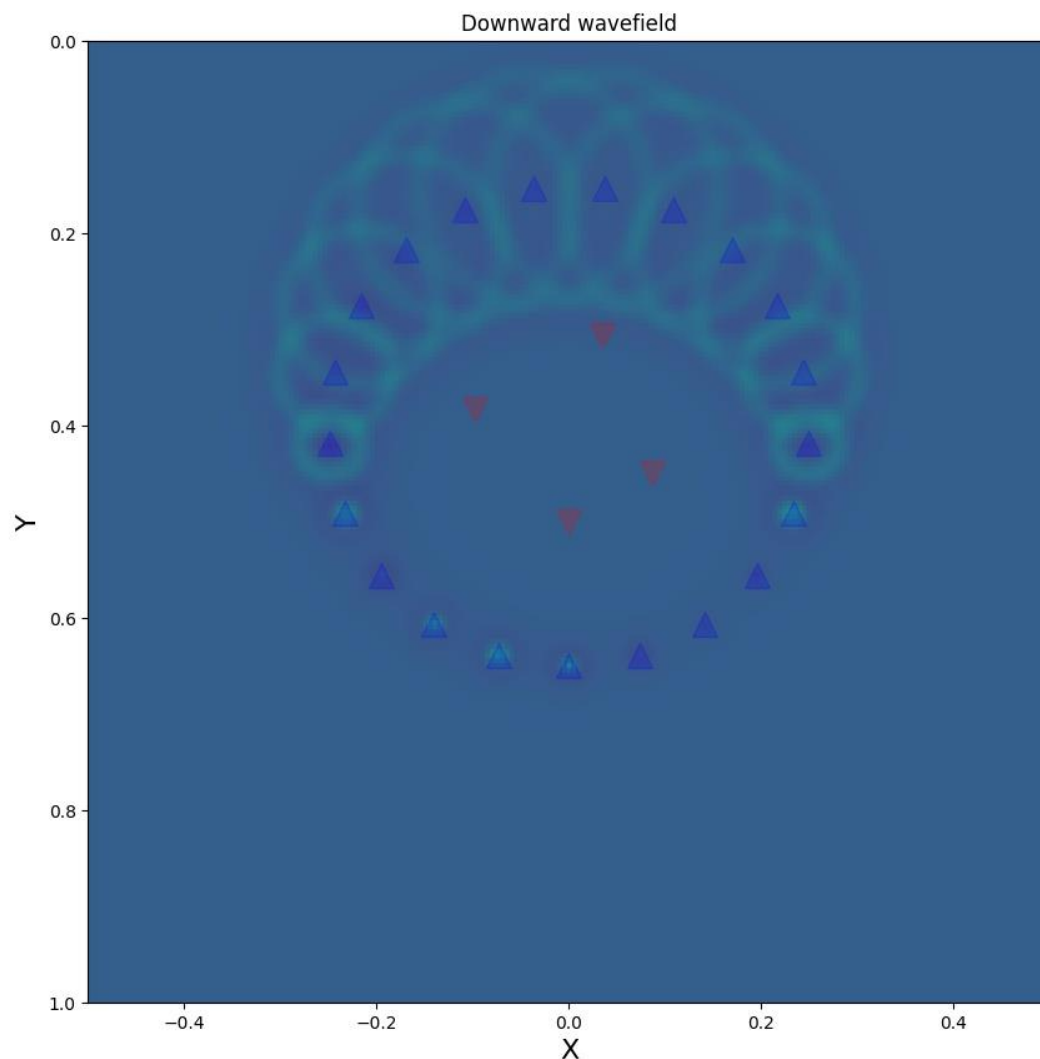


Рисунок 5.6 – Снимок продолжения волнового поля в обратном времени, первоначальные приёмники, расставленные по периметру образца, стали источниками и излучают сигнал, развёрнутый во времени, относительно зарегистрированного изначально.

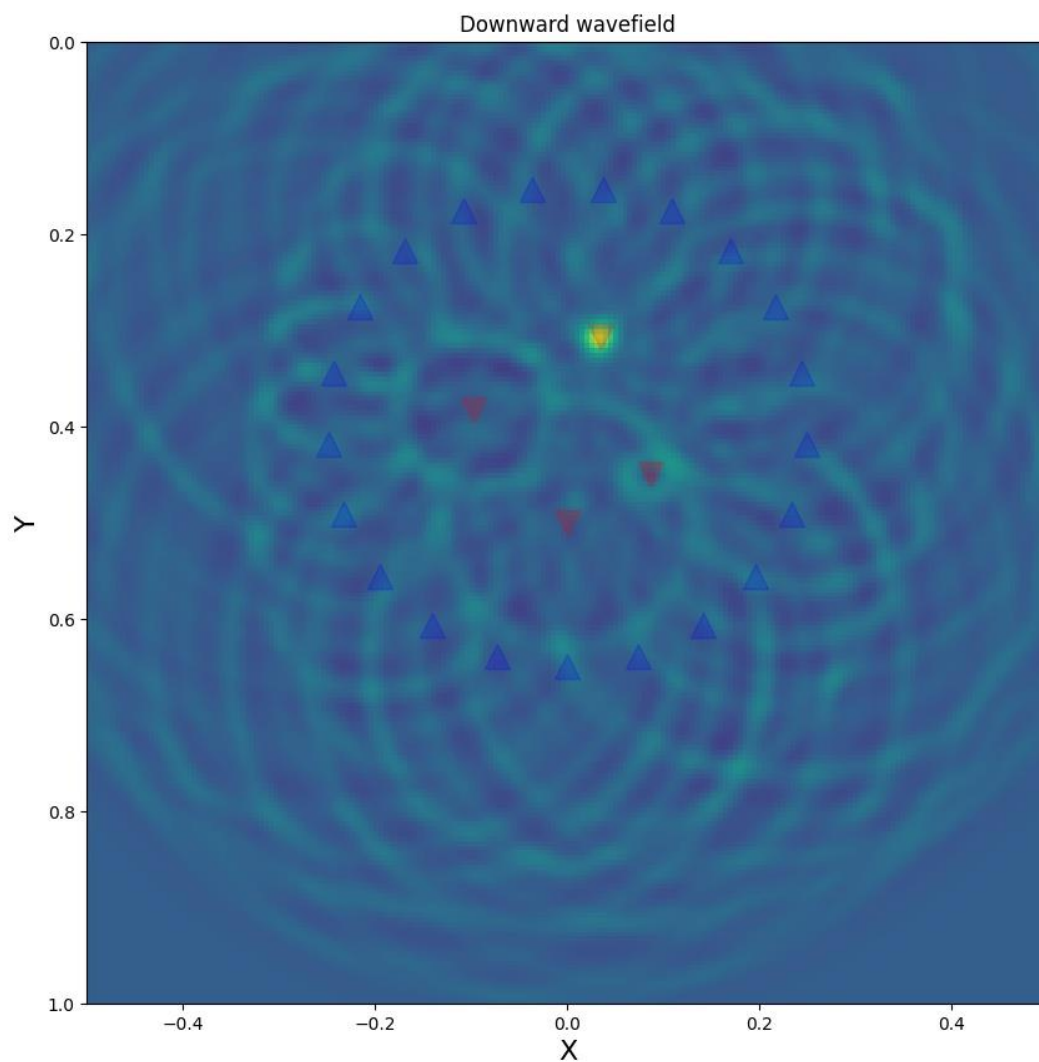


Рисунок 5.7 – Снимок продолжения волнового поля обратном времени в момент, когда сигнал сфокусировался по координатам одного из источников. Таким образом источник локализован.

5.2 Численные эксперименты по моделированию акустической эмиссии

В данном разделе кратко изложены результаты, полученные в статье [Решетова, Анчугов, 2021]. Метод компьютерного моделирования акустической эмиссии открывает перспективы для виртуального воспроизведения экспериментов с цифровой моделью керна. Моделирование осуществляется поэтапно и охватывает три ключевых этапа: формирование моделей возникновения очагов акустической активности в керне, последующая симуляция распределения возбуждённого акустического поля и регистрация полученного сигнала виртуальными датчиками, а также реконструкция очага акустической эмиссии внутри образца путём решения обратной задачи. Данные, полученные численным моделированием, играют ключевую роль при выборе оптимальных конфигураций многоканальных комплексов регистрации данных, включая определение оптимального количества сенсорных элементов и размещения датчиков относительно контролируемого образца.

Особенности цилиндрической формы объектов исследования и стремление учесть геометрические ограничения образцов определяют выбор системы координат для моделирования. Возможны две альтернативы: трёхмерная цилиндрическая система координат или двухмерная полярная система. Особенностью данных систем является неравномерное увеличение размера ячейки по мере удаления от начала отсчета, что ведет к уменьшению точности пространственной аппроксимации. Чтобы достичь желаемого уровня пространственной аппроксимации на всём протяжении моделируемой области, целесообразно применять специальную сетку с постепенным дроблением углового шага, что обеспечивает сохранение сопоставимости размеров угловой и радиальной составляющих сетки и гарантирует стабильную пространственную аппроксимацию по всему объёму расчёта (рис. 5.8). Такой подход порождает проблему стыковки соседних сеток при пересечении границ цилиндрических областей, где реализовано упомянутое дробление угла. Для сохранения порядка

аппроксимации основной задачи требуется применить интерполяционную процедуру с уровнем точности, превышающим точность самой конечно-разностной схемы, причём данная операция должна осуществляться на каждом временном шаге. Подобная стратегия выдвигает повышенные требования к производительности операций интерполяции. Эффективным способом преодоления этой трудности служит интерполяция с привлечением быстрых преобразований Фурье (БПФ) [Pissarenko et al., 2009; Костин и др., 2008], применяемая нами в разработанном численном алгоритме моделирования акустической эмиссии на образцах керна.

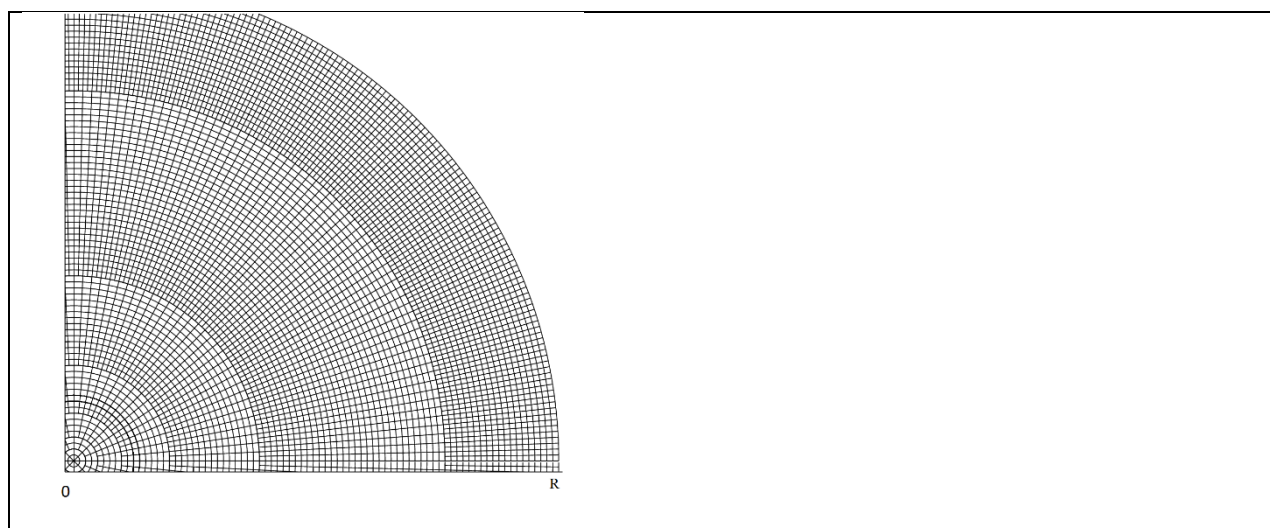


Рисунок 5.8 – Сетка с последовательным азимутальным измельчением.

Для изучения значимых особенностей процессов акустической эмиссии и последующего восстановления координат событий методом продолжения в обратном времени начиналось с рассмотрения двумерного варианта задачи. Основной целью такого подхода являлось снижение затрат на проведение дорогостоящих численных расчётов, связанных с большими требованиями к вычислительным ресурсам и временным затратам, неизбежным при моделировании трёхмерных сценариев с использованием суперкомпьютерных вычислений. Несмотря на уменьшение размерности, используемые в моделях геометрические параметры сохраняли максимальное подобие параметрам

реальных лабораторных экспериментов. За основу математического описания явлений принимались уравнения динамической теории упругости, записанные в полярной системе координат: (r, θ) :

1. Уравнения движения

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}), \\ \rho \frac{\partial u_\theta}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r}.\end{aligned}\tag{5.1}$$

2. Закон Гука (уравнения состояния)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} (u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}) + F_r, \\ \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial t} &= \frac{(\lambda + 2\mu)}{r} (u_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}) + \lambda \frac{\partial u_r}{\partial r} + F_\theta, \\ \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial t} &= \mu \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\mu}{r} (\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta).\end{aligned}\tag{5.2}$$

3. Начальные и граничные условия

$$\begin{aligned}u_r|_{t=0} &= u_\theta|_{t=0} = \sigma_{rr}|_{t=0} = \sigma_{\theta\theta}|_{t=0} = \sigma_{r\theta}|_{t=0} = 0, \\ u_r|_S &= u_\theta|_S = \sigma_{rr}|_S = \sigma_{\theta\theta}|_S = \sigma_{r\theta}|_S = 0.\end{aligned}\tag{5.3}$$

Представленная система дифференциальных уравнений первого порядка (5.1-3) предназначена для моделирования распространения упругих волн, характеризуемых радиальным u_r и азимутальным u_θ смещением, а так же компонент тензора напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{r\theta}$. Физические свойства среды

определяются коэффициентами Ламе λ , μ и плотностью вещества ρ .

Важную роль играет структура правой части уравнений (5.2) позволяющая моделировать разные виды источников возмущений. Для задания точечного источника в виде сферического расширения, расположенного в точке (r_0, θ_0) , достаточно использовать выражение вида:

$$F_r = F_\theta = f(t) \frac{\delta(r - r_0, \theta - \theta_0)}{2\pi r} \quad (5.4)$$

где δ - дельта-функция и $f(t)$ временной сигнал в источнике. Источник типа направленной силы, реализуется приравниванием к нулю одной из компонент F_r или F_θ . Так в случае $F_r = 0$ получаем источник направленной силы в азимутальном направлении, а в случае $F_\theta = 0$ - источник направленной в радиальном направлении.

На данном этапе работы не рассматриваются физические механизмы происхождения акустической эмиссии. Её возникновение имитируется заданием набора объемных источников, расположенных в отдельных точках пространства и действующих одновременно или последовательно и определяемых правыми частями $\vec{F} = (F_r, F_\theta)$ уравнений (5.2). Применительно к нашим расчетам использованы источники в виде центров объемного расширения. Для заданных правых частей рассчитывается полное волновое упругое поле и регистрируем его в некоторых точках (приемниках или каналах регистрации) на границах исследуемой области.

Для численных экспериментов взят цилиндр стандартного диаметра 30 миллиметров, обладающий усредненными характеристиками песчаника: $V_p = 3500$ м/с, $V_s = 2000$ м/с и плотность $\rho = 3500$ кг/м³. Предполагается наличие трех источников, помещенных в случайные точки расчетной области и работающих асинхронно: первый источник располагается в точке $(r_{01} = 7 \text{ мм}, \theta_{01} = 0)$, второй в

точке ($r_{02} = 10 \text{ мм}$, $\theta_{02} = \pi / 2$) и третий в точке ($r_{03} = 5 \text{ мм}$, $\theta_{03} = 5\pi / 4$). Правая часть (6.2) задается формулой

$$F_r = F_\theta = f(t) \sum_{i=1}^3 \frac{\delta(r - r_{0i}, \theta - \theta_{0i})}{2\pi r}. \quad (5.5)$$

В качестве временного сигнала используется Гауссиан $f(t) = \exp(-(\pi f_0(t - t_{0i}))^2)$, где f_0 - доминирующая частота и t_{0i} - задержка импульса для i -го источника. С помощью выбора различных значений t_{0i} для каждого источника моделируется срабатывание источников в различные моменты времени. Выберем $t_{01} = 10 \text{ мкс}$, $t_{02} = 20 \text{ мкс}$ и $t_{03} = 30 \text{ мкс}$. Время регистрации сигнала в приёмниках полагаем равным $T = 40 \text{ мкс}$.

Регистрация волн осуществляется набором датчиков, равномерно размещенных по окружности вокруг образца. Нумерация датчиков ведется против часовой стрелки, начиная с определенного начального угла $\theta = 0$ (см. рис. 5.9).

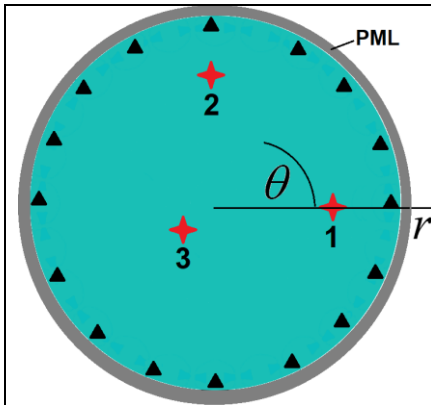


Рисунок 5.9 – Расположение источников (красный) и приёмников (черный) в численных экспериментах. Поглощающий граничный слой PML (серый).

Для численного моделирования волнового поля, возбуждаемого источниками в образце керна, применялся явный конечно-разностный метод. Для аппроксимации уравнений системы (5.1-3) использовалась конечно-

разностная схема со вторым порядком точности в узлах сдвинутой полярной сетки с периодическим изменением плотности узлов в азимутальном направлении. Подробности метода описаны в ряде известных публикаций [Pissarenko et al, 2006; Костин и др., 2008] и детально освещены в соответствующих источниках. Зарегистрированное волновое поле использовалось для последующей постановки и решения обратной задачи — локализации источников акустической эмиссии. Основное содержание данного этапа состоит в следующем: изначально зарегистрированные данные, отображающие прохождение волн от источников, «переворачиваются» во времени, превращая приёмники в фиктивные источники, испускающие сигнал в обратном направлении. Волны, созданные этими искусственными источниками, повторно проходят весь путь через среду, воспроизводя обратный ход движения первоначальных волн. Ключевым условием успешного выполнения такого подхода является наличие идеальной абсорбирующей границы (Perfectly Matched Layers, PML), обеспечивающей минимальное отражение энергии на границе расчётной области. Такое условие эквивалентно реальной обстановке, где датчик закреплён в демпфирующей резиновой манжете, устраняющей вторичные эффекты.

Таким образом, созданная численная модель удовлетворяет ключевым требованиям метода обратного времени, рассмотренным в классических работах [Pissarenko et al, 2006; Костин и др., 2008], и полностью удовлетворяет требования к эксперименту по методу зеркального обращения времени, сформулированным в работах [Fink and Prada, 2001; Givoli, 2014].

Обратная задача заключается в восстановлении начальных положений источников и моментов активации по записанным волновым полям в наборе приемников. Процедура включает предварительную инверсию записей, обработку данных и вычисление обратного хода волн, заканчивающегося концентрацией энергии в точках расположения истинных источников. На (рис.

5.10 и рис. 5.11) представлены моментальные снимки волнового поля в обратном времени для компоненты u_r в различные моменты времени, соответствующие временам срабатывания источников акустической эмиссии. На (рис. 5.10) расчеты приведены для случая $f_0=1$ МГц и 24 приемников/источников на внешней окружности образца, а на (рис. 5.11) для случая $f_0=250$ КГц и восьми приемников/источников. Видно, что энергия концентрируется в областях нахождения источников, формируя ярко выраженные зоны повышенной интенсивности. Однако выделение конкретных источников на фоне сложного волнового фона остаётся сложной задачей ввиду наличия многочисленных ложных максимумов и минимальных уровней сигнала.

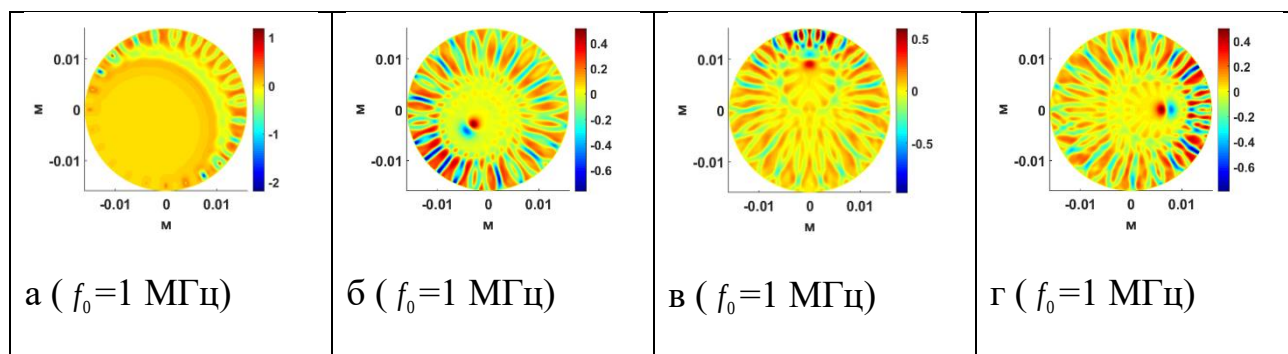


Рисунок 5.10 – Моментальные снимки волнового поля в обратном времени для компоненты u_r в начальный момент (а), в момент фокусировки волнового поля в третьем источнике $t = 10$ мкс (б), во втором источнике $t = 20$ мкс (с) и в первом источнике $t = 30$ мкс (г). Расчеты приведены для случая $f_0=1$ МГц и 24 приемников/источников на внешней окружности образца.

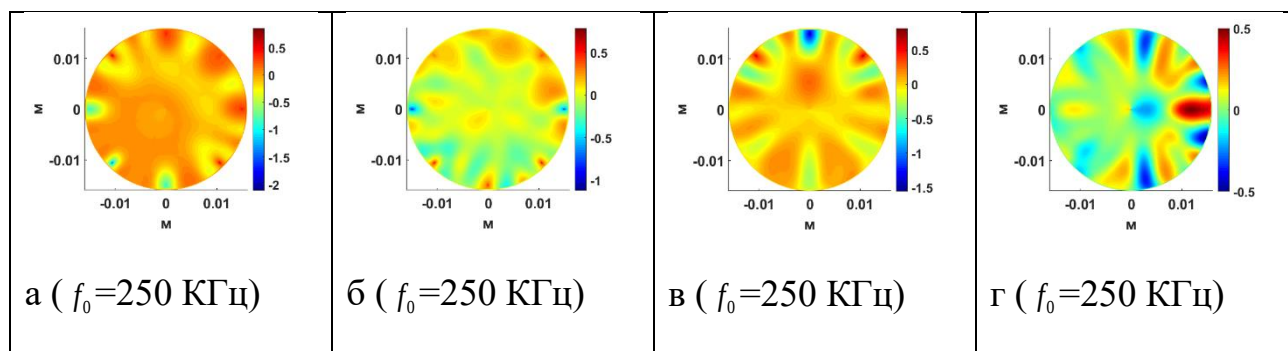


Рисунок 5.11 – Моментальные снимки волнового поля в обратном времени для компоненты u_r в начальный момент (а), в момент фокусировки волнового поля в третьем источнике $t = 10$ мкс (б), во втором источнике $t = 20$ мкс (с) и в

первом источнике $t = 30$ мкс (г). Расчеты приведены для случая $f_0 = 250$ кГц и восьми приемников/источников на внешней окружности образца.

Для выделения когерентной составляющей волнового поля, рассчитанного в ходе процедуры обращения времени, проводится дополнительная обработка с вычислением интегральной меры накопления упругой энергии на каждом временном шаге. Суть подхода заключается в следующем: на каждом временном шаге t_k в каждой точке разностной сетки (r_i, θ_j) рассчитывается квадрат суммарной энергии E для всех предыдущих шагов t_m по времени:

$$E(r_i, \theta_j, t_k) = \sum_{t_m \leq t_k} \sigma_{rr}(r_i, \theta_j, t_m) \varepsilon_{rr}(r_i, \theta_j, t_m) + \sigma_{\theta\theta}(r_i, \theta_j, t_m) \varepsilon_{\theta\theta}(r_i, \theta_j, t_m) + 2\sigma_{r\theta}(r_i, \theta_j, t_m) \varepsilon_{r\theta}(r_i, \theta_j, t_m) \quad (5.6)$$

На рисунках далее приведены снимки волнового поля суммарной энергии, рассчитанные по формуле (5.6) для времен, соответствующих моментам включения первого второго и третьего источников для различной доминирующей частоты в источнике. Частотные характеристики для моделирования выбирались на основе анализа экспериментальных данных, полученных в ходе реальных лабораторных исследований [Цветков и др., 2022; Анчугов, 2025], подробно изложенных в предыдущих разделах. Как видно из (рис. 4.16) на имеющемся оборудовании удаётся надёжно зафиксировать сигналы, с преобладанием частот 200–300 кГц. Исходя из этого, начало расчетов приходится на частоту 250 кГц [Решетова, Анчугов, 2021]. Вместе с тем повышение частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя позволяет регистрировать спектральные составляющие вплоть до 1,5 МГц, вследствие чего дополнительные расчеты проведены также для частот 500 кГц и 1000 кГц. Еще одним важным фактором при проектировании экспериментов выступает количество приемников (в роли вторичных источников), равномерно

распределяющихся по периферии области наблюдения. При диаметре керна 30 мм длина окружности составляет примерно 100 мм, на которой расположены приемники. Очевидно, что наряду с доминирующей частотой количество приемников оказывает значительное влияние на качество реконструкции источников акустической эмиссии. Были выполнены расчеты для ряда конфигураций с различным количеством приемников, охватывающих исследуемый образец: 24, 12, 10 и 8 штук. Соответствующие изображения результатов моделирования представлены на (рис. 5.12–5.13). Прежде всего, следует обратить внимание на специфические артефакты, появляющиеся на изображениях, вызванные присутствием самих приемников. Во время операции обращения времени назад приемники становятся источниками, что приводит к появлению особых зон высокой амплитуды вблизи их расположения. Эти артефакты возникают вследствие длительного характера воздействия вторичного источника на волновое поле, и их присутствие сохраняется на протяжении почти всего временного окна расчета. Пространственно они четко коррелируют с известными позициями приемников и не влияют на корректность идентификации настоящих источников акустической эмиссии, поскольку известны координаты приемников. Поэтому они легко интерпретируются как артефакты, не относящиеся к естественным источникам акустической эмиссии. Первоначально расчеты проводились для массива из 24 приемников и набора доминирующих частот: 250 кГц, 500 кГц и 1 МГц. Результаты представлены на (рис. 5.12). Для облегчения анализа на изображениях показано пространственное распределение акусто-сейсмической энергии только в моменты времени, соответствующие моменту срабатывания источников. Наблюдается закономерность увеличения разрешающей способности (уменьшение площади изображений источников) с ростом доминирующей частоты. Интересно отметить, что артефакт, связанный с приемом сигналов от вторичных источников, визуально заметен только в момент времени t_2 , соответствующий моменту активации второго источника. Причина этого феномена связана с

близким расположением второго источника к одному из первичных приемников, установленных на внешней стороне кольца.

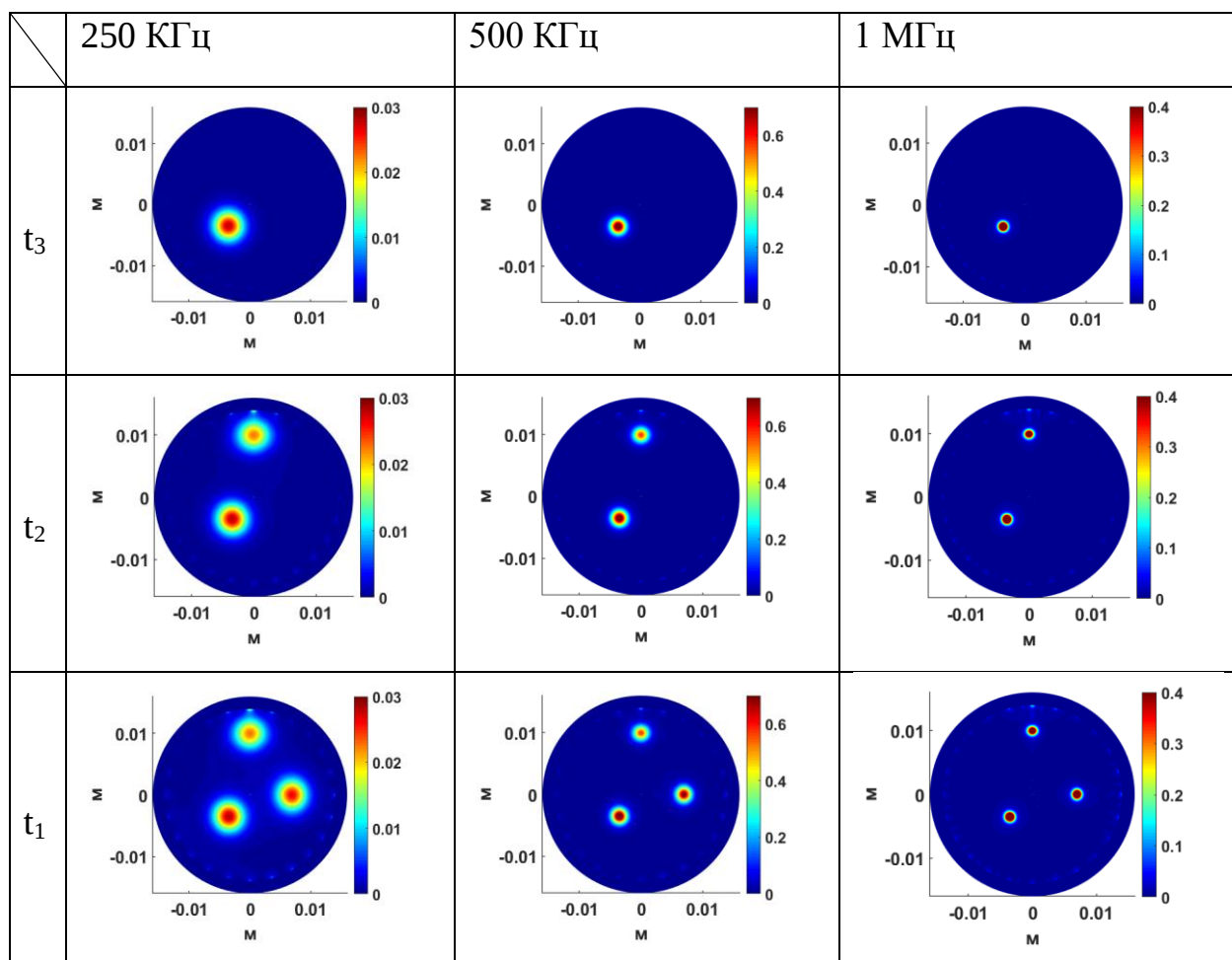


Рисунок 5.12 – Моментальные снимки суммарной энергии обращённого волнового поля для времён $t_3=10$ мкс, $t_2=20$ мкс, $t_1=30$ мкс, соответствующих включению третьего, второго и первого источников, при использовании 24 приёмников.

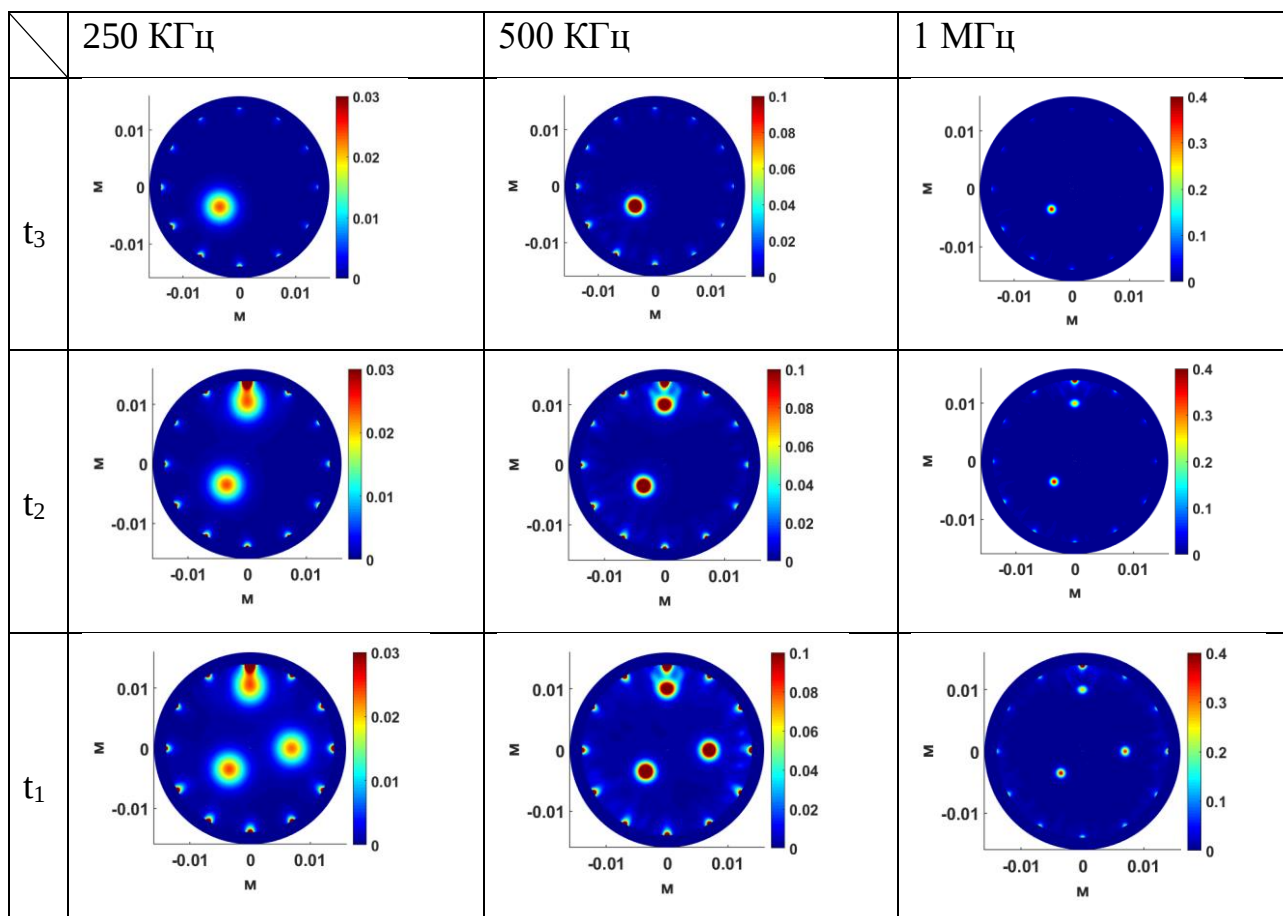
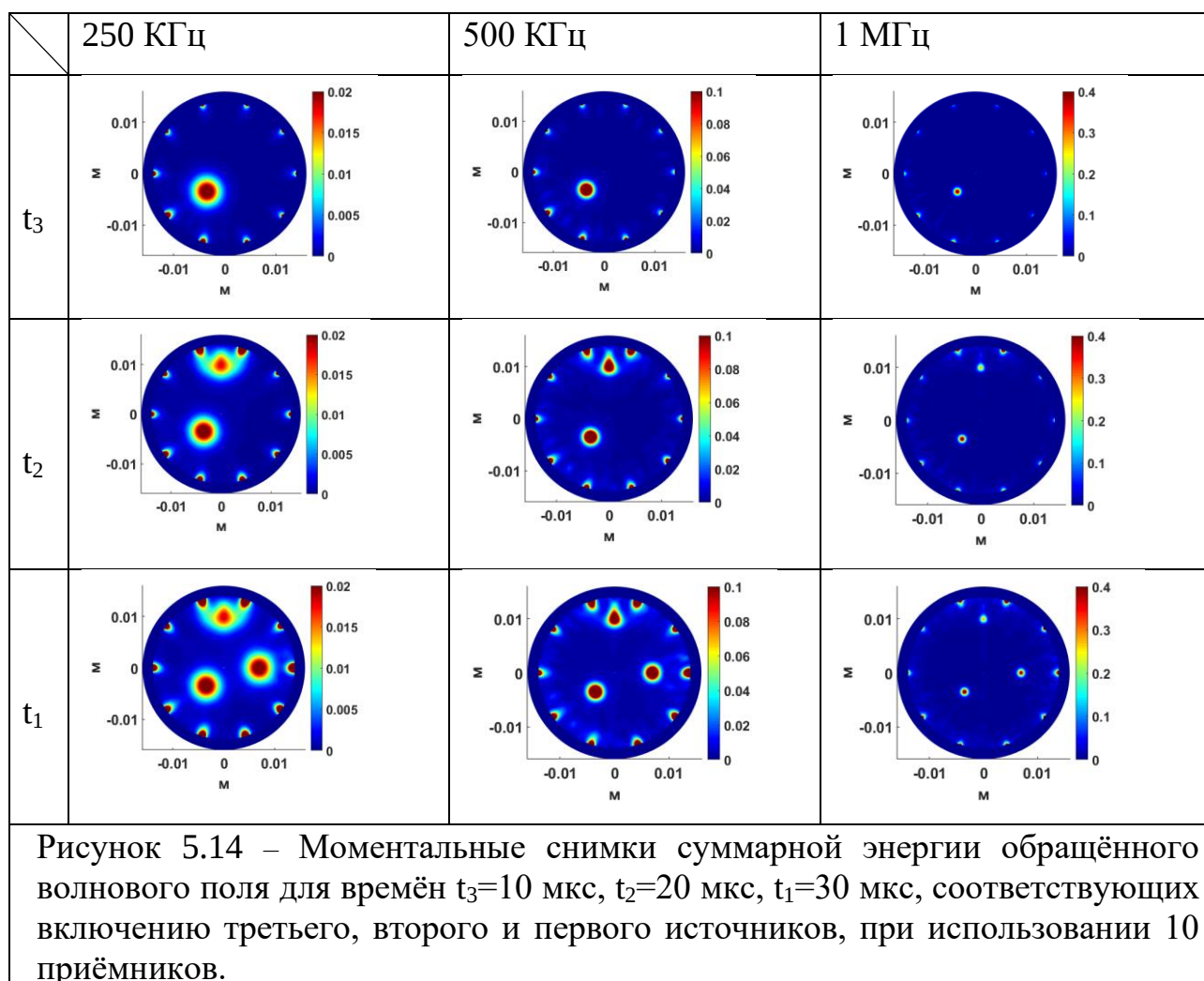


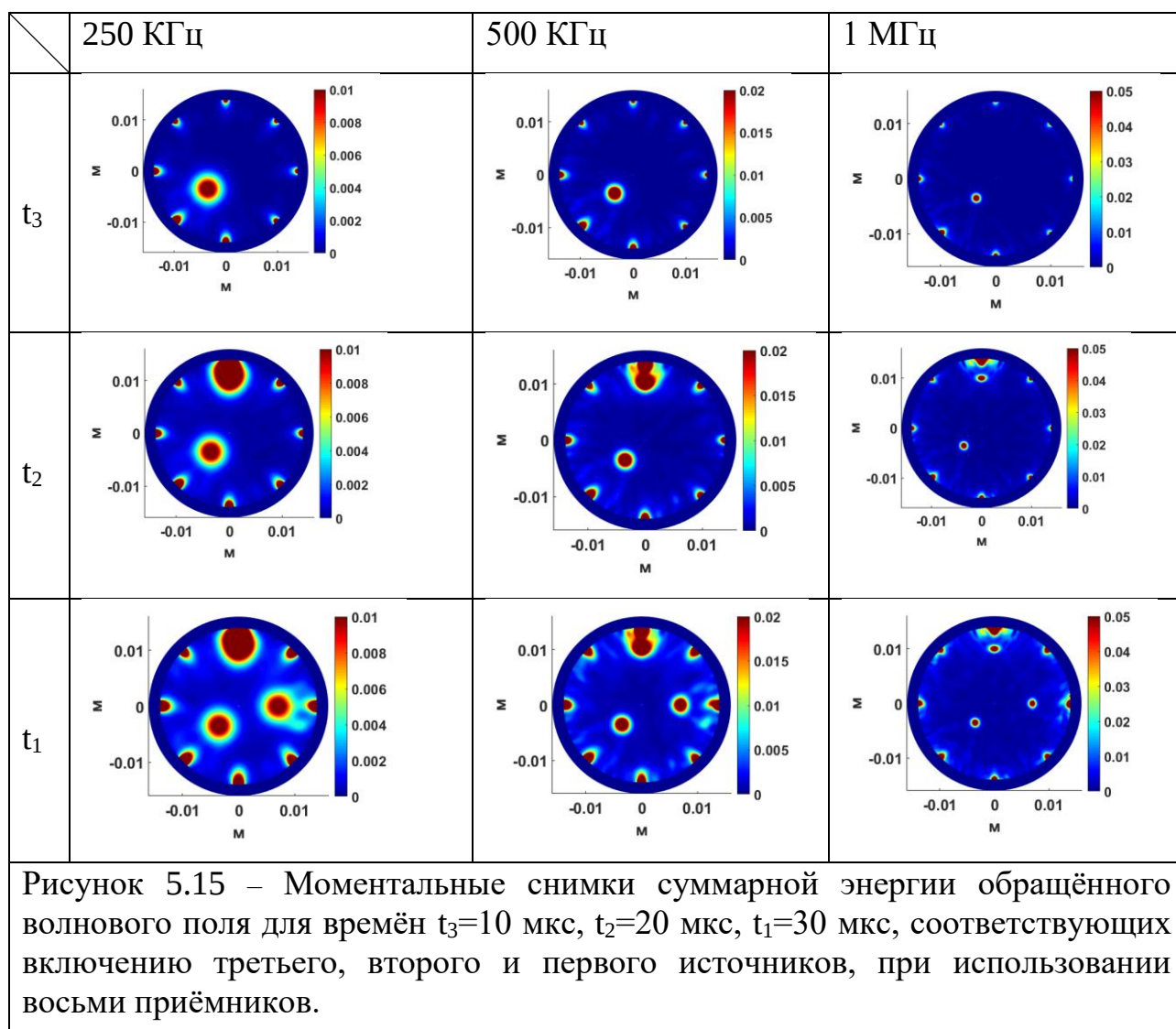
Рисунок 5.13 – Моментальные снимки суммарной энергии обращённого волнового поля для времён $t_3=10$ мкс, $t_2=20$ мкс, $t_1=30$ мкс, соответствующих включению третьего, второго и первого источников, при использовании 12 приёмников.



Ранее было установлено, что приемники, участвующие в процедуре продолжения волнового поля в обратном времени, располагаются на наружной стороне цилиндрического образца керна диаметром 30 мм, чья длина окружности составляет около 100 мм. Очевидно, что размещение 24 приемников на столь ограниченной площади приведет к недопустимо малым промежуткам между соседними элементами, порядка четырёх мм. Поэтому дальнейшие численные эксперименты направлены на исследование эффективности локализации источников и фиксации моментов их активации при сокращении числа приемников, то есть увеличении расстояний между ними.

На (рис. 6.13) показаны результаты расчетов, выполненных для конфигурации с 12 приемниками, где среднее расстояние между соседними приборами

возрастает до примерно 1 см. Судя по результатам, разрешение восстанавливаемых изображений, оцениваемое по размеру пятна единичного источника, сохраняется примерно на том же уровне, что и в случае 24 приемников. Одновременно наблюдается усиление артефактов, связанных с приемниками, действующими в качестве источников при обработке в обратном времени. Отметим важную тенденцию: артефакты начинают проявляться уже в момент активации источника и уменьшаются по величине с увеличением доминирующей частоты сигнала. Наибольший артефакт возникает возле приемника, ближайшего к внутреннему источнику. Еще раз подтверждается тенденция улучшения качества изображений при повышении рабочей частоты, связанная с ослаблением артефактов. Внешний вид полученных картинок качественно схож с результатами, представленными ранее для случаев с 24 и 12 приемниками. Интенсивность артефактов заметно возрастает, однако, как и ранее, они четко локализованы вблизи приемников и могут быть однозначно отнесены к источникам-приёмникам, не искажая информацию о положении и моменте активации реальных источников акустической эмиссии.



Выводы по Главе 5

1. Предложенная модификация метода зеркального обращения времени (TRM) с использованием суммарной накопленной упругой энергии даёт возможность локализовывать источники акустической эмиссии тем точнее, чем больше используется приёмных датчиков. Проведенные численные эксперименты показали, что уже при восьми датчиках может быть достигнута приемлемая точность локализации событий акустической эмиссии.
2. Для повышения точности метода следует использовать блоки АЦП с частотой дискретизации от 5 МГц, так как полоса частот сигналов

акустической эмиссии на различных образцах керна возможно шире 500 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана новая измерительная система, включающая блок регистрации сигналов и акустические датчики. Она предназначена для проведения лабораторных экспериментов в условиях, приближенных к пластовым, включая измерение времени прохождения акустических волн через образец керна и регистрацию сигналов акустической эмиссии. Достоинством конструкции аналогового двухканального блока возбуждения акустических волн является его простота и надёжность что удешевляет стоимость изделия, упрощает его настройку, регулировку и управление. Основную часть модулей сбора данных и пьезочувствительные элементы производят в России и Беларуси, что гарантирует независимость от поставок комплектующих из-за рубежа.

Выполнен эксперимент по исследованию эффекта Кайзера на образцах горной породы, а также экспериментально проверено выполнение закона Омори для этих образцов. Разработан новый способ изготовления акустических датчиков для измерения скорости акустических волн и регистрации сигналов акустической эмиссии. Эти датчики пригодны для проведения геомеханических исследований при высоких температурах (до 170 °С), давлениях (более 100 МПа) и ударных нагрузках, возникающих при разрушении образца керна.

Несомненным преимуществом датчиков, изготовленных предложенным способом, является сохранение работоспособности во всём диапазоне пластовых условий и возможность проводить измерение времени распространения волн и регистрацию сигналов акустической эмиссии вплоть до разрушения образца. Более того, датчики свободны от недостатков присущих склейке:

1. При использовании припоя достигается максимальная прочность соединения пьезокерамики с титановым плунжером, а следовательно, и максимально возможная механическая связь перехода титан-пьезопластина, за счёт чего энергия колебаний пьезопластины передаётся в титановый материал волновода наиболее эффективно.
2. Термостойкость полученного соединения находится в диапазоне температур до точки плавления припоя. Можно использовать припои разного состава с различной температурой плавления, как и пьезопластины из различных типов пьезокерамики с более высокой температурой точки Кюри при необходимости.
3. Получаемое соединение обладает свойством электропроводности, что необходимо для электрического подключения к пьезопластине.
4. Обеспечивается повторяемость параметров паяного соединения при серийном производстве датчиков, механическая прочность и качество крепления больше не зависят условий хранения клея и степени его старения.

Важным результатом является предложенный способ обработки данных акустической эмиссии с восстановлением координат событий с использованием обращения волнового поля в обратном времени.

Представленная измерительная система повышает информативность лабораторных исследований, к примеру при проведении многостадийного нагружения образца по наблюдению роста количества событий акустической эмиссии определяется момент, когда необходимо поднимать обжимное давление. Допускается комбинировать разные геофизические методы при лабораторных петрофизических исследованиях. В частности, возможно измерение времени прохождения акустических волн параллельно с измерением сопротивления образца с последующим вычислением удельного электрического

сопротивления с помощью RLC-метра или блока сбора данных электротомографии.

Данные получаемые при лабораторных экспериментах на керне с использованием разработанного оборудования, находят непосредственное применение при разведке, бурении скважин и эксплуатации месторождений нефти и газа, лабораторное оборудование эксплуатируется в исследовательском центре ГПН «Геосфера», Институт физики Земли РАН, и других компаниях и институтах нефтегазового сектора.

Направления исследований на будущее и нерешённые вопросы

Перспективным направлением на будущее является разработка широкополосных акустических датчиков с расширенным рабочим спектром и сжатым импульсом во временной области увеличенной амплитуды. Полезный сигнал такого датчика значительно проще выделять как вручную, так и автоматическими алгоритмами на уровне шума.

Акустические низкочастотные датчики для одностороннего поверхностного измерения времени прохождения волн могут быть совмещены с устройством профильного геомеханического исследования керна скретчер [Парначёв, Анчугов, 2020]. Следует пересмотреть и улучшить конструкцию таких датчиков для расширения спектра акустического сигнала. В настоящий момент датчики для профильных измерений имеющейся конструкции обеспечивают лишь удовлетворительное качество сигналов и требуют высокой квалификации оператора для обработки записанных акустических сигналов.

В отдельное направление исследования следует выделить поиск способов изготовления синтетических образцов с разными петрофизическими свойствами для калибровки акустических датчиков, настройки, проверки и подтверждению целевых характеристик и режимов работы, а также расчётных параметров

измерительного оборудования в целом. [Черныш, Анчугов, 2015]. Образцы должны удовлетворять свойствам повторяемости петрофизических свойств. Интерес представляет способ изготовления образцов со свойствами анизотропии и специально заложенными дефектами внутренней структуры в виде сетки трещин и других дефектов.

Автором в составе коллектива разработан и испытан настольный прибор ПИК-УЗ, в котором были испытаны согласующие алюминиевые слои для титановых датчиков и пластиковые волноводы для исследования акустических свойств образцов на частотах порядка 300 кГц, по контракту с компанией «Лукойл», г. Кунгур в том числе для работы со слабо сцементированными образцами, не допускающими высокие осевые нагрузки. Данный прибор изначально был задуман как учебно-лабораторный, хотелось бы продолжить исследования по улучшению характеристик данного прибора [Анчугов, 2023].

Необходимо перейти к моделированию акустической эмиссии для трёхмерного случая.

Вместе с тем ряд вопросов так и остался нерешёнными:

1. Не закончена разработка многоканальной системы регистрации сигналов акустической эмиссии на основе оборудования Аурис Alma Meter с частотой дискретизации до 10 МГц. Для которой уже разработаны и изготовлены, но не испытаны 10 датчиков акустической эмиссии, а также разработан и изготовлен габаритный макет манжеты для размещения датчиков на цилиндрическом образце керна размером 60х30 мм.
2. Для экспериментов на кубических образцах хотелось бы иметь доступную ячейку истинного трёхосного нагружения для пластовых условий работы.
3. Достижение работоспособности акустических датчиков для работы при температурах выше 200 °С, потребует применения специальных высокотемпературных пьезоматериалов и припоев, что нужно будет проверить экспериментально.

4. Нужно разработать новый источник для питания пьезопреобразователей с цифровой регулировкой амплитуды выходных импульсов выбором формы питающего импульса.

Благодарности

Автор глубоко признателен своему научному руководителю: доктору физико-математических наук Галине Витальевне Решетовой, за ценные советы и поддержку за весь период подготовки диссертации.

Автор искренне благодарен коллегам из Института нефтегазовой геологии и геофизики, из Института физики Земли РАН, а также коллегам из компаний ООО «Ситен Технологии» и АО «Геологика» в лице директора Баракат Нурии Рафиковны за неоценимую помощь в подготовке данной диссертации.

Автор глубоко благодарен своему научному руководителю по магистратуре д.ф.-м. н., профессору В. А. Чеверде за ценные советы по подготовке работы.

Автор выражает благодарность исполнительному директору ООО НПП ГА «Луч» к.т.н В. Н. Ерёмину за своевременно указанное направление поиска решения для разработки конструкции датчиков.

Автор признателен В. И. Самойловой за методические рекомендации по оформлению работы и научных статей.

Автор выражает глубокую благодарность к.х.н А. П. Чупахину за ценные советы и за то, что когда-то показал нам, молодым студентам, на что мы способны на самом деле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акустическая эмиссия гетерогенных материалов: темат. сб. / ФТИ им. А. Ф. Иоффе. — Л., 1986. — 176 с.
2. Акустическая эмиссия материалов и конструкций: материалы I-й Всесоюз. конф.: в 2 ч. / под ред. И. И. Воровича, А. С. Трипалина, В. И. Иванова и др. — Ростов н/Д, 1989. — 192 с.
3. Акустическая эмиссия и её применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К. Б. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
4. Андрейкин, А. Е. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкин, Н. В. Лысак; отв. ред. В. В. Панасюк. — Киев: Наукова думка, 1989. — 176 с.
5. Анцыферов, М. С. Сейсмоакустические исследования и проблемы прогноза динамических явлений / М. С. Анцыферов, Н. Г. Анцыферова, Я. Я. Каган. — М.: Наука, 1971. — 136 с.
6. Анчугов, А. В. Анализ экспериментальных данных на соответствие закону Омори для образцов керна горной породы при одноосном нагружении до разрушения: от лабораторных данных к сейсмическим закономерностям / А. В. Анчугов, К. Л. Тарасенко // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2025. — Новосибирск. — Т. 2, № 2. — С. 98–105.
7. Анчугов, А. В. Акустический сепаратор для измерения объёма вытесненного флюида из образца керна горной породы и применение алгоритма Байера для автоматического определения времени первого вступления ультразвуковых волн / А. В. Анчугов // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: материалы XXIV междунар. конф. — М., 2023. — С. 21–24.
8. Анчугов, А. В. Применение просветляющих слоёв в конструкции ультразвуковых датчиков для измерения скоростей прохождения

- ультразвуковых волн через образцы керна горной породы в атмосферных условиях / А. В. Анчугов // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: материалы XXIV междунар. конф. — М., 2023. — С. 25–28.
9. Анчугов, А. В. Конструкция датчиков для измерения скорости прохождения ультразвуковых волн через образцы керна горной породы в атмосферных условиях с применением согласующих слоев / А. В. Анчугов // Сейсмические приборы. — 2023. — Т. 59, № 4. — С. 24–35.
 10. Анчугов, А. В. Применение алгоритма Бэра-Крадольфера для автоматического выделения первого вступления отражённой ультразвуковой волны, возбуждаемой излучателем и регистрируемой от границы вода-нефть в сепараторе / А. В. Анчугов // Сейсмические приборы. — 2023. — Т. 59, № 3. — С. 5–17.
 11. Анчугов А. В. Сбор сигналов акустической эмиссии и их обработка методом продолжения волнового поля в обратном времени // Магистерская диссертация / Новосибирский нац. науч.-исследоват. гос. университет. Новосибирск., 2021. — 60 с.
 12. Анчугов, А. В. Устройство и способ исследования пористых образцов, система и способ построения распределения удельного электрического сопротивления пористых образцов с их использованием: патент № 2778498 С1 Рос. Федерация: заявл. 28.01.2022; опубл. 22.08.2022 / А. В. Анчугов, Н. Р. Баракат, Н. В. Юркевич, Д. О. Кучер. — 3 с.
 13. Баранов, В. М. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики / В. М. Баранов, К. И. Молодцов. — М.: Атомиздат, 1980. — 144 с.
 14. Бартенев, О. А. Применение акустической эмиссии в механических испытаниях: обзор / О. А. Бартенев, Ю. И. Фадеев // Заводская лаборатория. — 1990. — № 1. — С. 34–39.

15. Баранов, В. М. Применение акустической эмиссии для исследования и контроля коррозионных процессов / В. М. Баранов, Т. В. Губина. — М. : МИФИ, 1990. — 72 с.
16. Баранов, В. М. Акустикоэмиссионные приборы ядерной энергетики / В. М. Баранов, К. И. Молодцов. — М.: Атомиздат, 1980. — 144 с.
17. Бачегов, В. Н. Акустическое контактное течеискание / В. Н. Бачегов, Ю. Б. Дробот, В. В. Лупанос. — Хабаровск: НТО машиностроительной промышленности, 1987. — 77 с.
18. Башков, О. В. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О. В. Башков, С. В. Панин, П. С. Любутин, А. В. Бяков, С. Рамасуббу. — Томск: Изд-во нац. исслед. Томского политехн. ун-та, 2014. — 301 с.
19. Буденков, Г. А. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г. А. Буденков, О. Н. Недзвецкая. — М.: Физматлит, 2004. — 136 с.
20. Буйло, С. И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики / С. И. Буйло. — Ростов н/Д: Изд-во Юж. федер. ун-та, 2008. — 192 с.
21. Бунина, Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии / Н. А. Бунина. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. — 156 с.
22. ГОСТ Р 52727–2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
23. ГОСТ 27655–88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
24. ГОСТ 21153.8–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объёмном сжатии.

- 25.ГОСТ 21153.7–75. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
- 26.Грешников, В. А. Акустическая эмиссия / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 276 с.
- 27.Гусев, О. В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов / О. В. Гусев. — М.: Наука, 1982. — 108 с.
- 28.Дробот, Ю. Б. Акустическое контактное течеискание / Ю. Б. Дробот, В. А. Грешников, В. Н. Бачегов. — М.: Машиностроение, 1989. — 120 с.
- 29.Дробот, Ю. Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 128 с.
- 30.Иванов, В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
- 31.Иванов, В. И. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2005. — Т. 7. — Кн. 1. — 829 с.
- 32.Иванов, В. И. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. / В. И. Иванов, В. А. Барат. — М.: Спектр, 2017. — 368 с.
- 33.Иванов, В. И. Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов // Неразрушающий контроль: справ.: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. — 2-е изд., переработанное. — М.: Машиностроение, 2006. — Т. 7. — Кн. 1. — 340 с.
- 34.Капранов, Б. И. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учеб. пособие / Б. И. Капранов, М. М. Коротков. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 186 с.
- 35.Клюев, В. В. Неразрушающий контроль. Россия. 1990–2000 гг.: справ. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, С. В. Румянцев ; под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2001. — 616 с.

- 36.Кириякин, А. В. Акустическая диагностика узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Кириякин, И. Л. Железная. — М. : Радио и связь, 1984. — 192 с.
- 37.Костин, В. И. Численное моделирование трехмерного акустического каротажа с использованием многопроцессорных вычислительных систем / В. И. Костин, Г. В. Решетова, В. А. Чеверда // Математическое моделирование. — 2008. — Т. 20, № 9. — С. 51–66.
- 38.Максимов, С. П. Формирование и размещение залежей нефти и газа на больших глубинах / С. П. Максимов, Г. Х. Дикенштейн, М. И. Лоджевская. — М.: Недра, 1984. — 287 с.
- 39.Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран: в 3 т. — М.: Наука и техника, 1994–1995. — Т. 2–3.
- 40.Нестеров, И. И. Методика обоснования начального пластового давления в залежах нефти баженковского типа / И. И. Нестеров, М. Е. Стасюк, А. Д. Сторожев // Геология нефти и газа. — 1985. — № 8. — С. 1–6.
- 41.Парначев, С. В. Оптимизация протокола исследований механических свойств горных пород / С. В. Парначев, С. А. Калинин, А. Ю. Кушней, С. С. Цветков, К. Л. Тарасенко, А. В. Анчугов // Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы: материалы IX Междунар. геолого-геофизической конф. — М., 2020. — 71 с.
- 42.ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
- 43.РД 03-299-99. Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов.
- 44.РД 03-300-99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов.
- 45.Решетова, Г. В. Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в целях локализации её источников методом обращения волнового поля в

- обратном времени / Г. В. Решетова, А. В. Анчугов // Геология и геофизика. — 2021. — Т. 62, № 4. — С. 597–609.
46. Решетова, Г. В. Цифровой керн: разработка численного метода восстановления событий акустической эмиссии для реальных образцов керна / Г. В. Решетова, А. В. Анчугов // Марчуковские научные чтения — 2019: тезисы Международной конференции. — 2019. — С. 120–121.
47. Решетова, Г. В. Моделирование акустической эмиссии для реальных образцов керна / Г. В. Решетова, А. В. Анчугов // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2019. — Т. 2, № 3. — Новосибирск. — С. 160–167.
48. Свириденко, А. И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А. И. Свириденко, Н. К. Мышкин, Т. Ф. Калмыкова, О. В. Холодилов ; под ред. В. А. Белого. — Минск: Наука и техника, 1987. — 280 с.
49. Серьёзов, А. Н. Акустико-эмиссионный контроль конструкций / А. Н. Серьёзов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов и др. — М.: Машиностроение, 2008. — 440 с.
50. Серьёзов, А. Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьёзов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьёв. — М.: Машиностроение, 2004. — 368 с.
51. Серьёзов, А. Н. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А. Н. Серьёзов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, А. Е. Кареев. — М.: Машиностроение, 2008. — 440 с.
52. Семашко, Н. А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин и др.; под общ. ред. Н. А. Семашко, В. И. Шпорта. — М.: Машиностроение, 2002. — 240 с.
53. Стрижало, В. А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В. А. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В. А.

- Стрельченко и др. ; отв. ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Ин-т проблем прочности, 1990. — 232 с.
54. Трипалин, А. С. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты / А. С. Трипалин, С. И. Буйло. — Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1986. — 160 с.
55. Цветков, С. С. Эффект Кайзера в осадочных горных породах на примере отложений Вертолётной площади Томской области / С. С. Цветков, Ю. И. Колесников, Д. К. Жарасбаева // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 2, № 2. — Новосибирск. — С. 196–201.
56. Черныш, П. С. Методические аспекты определения упругих свойств горных пород сложного состава / П. С. Черныш, А. В. Анчугов, А. А. Горбатенко // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: сборник тезисов докладов Международной научной школы молодых учёных. — 2015. — С. 153–154.
57. Юркевич, Н. В. Применение метода электротомографии для контроля хода фильтрационного эксперимента на образцах керна / Н. В. Юркевич, А. В. Анчугов, Д. О. Кучер // Материалы конференции Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 2, № 2. — Новосибирск. — С. 45–53.
58. Юркевич, Н. В. Гидравлическая система с обратной связью и способ её использования: патент № 2808325 С1 Рос. Федерация: заявл. 29.12.2022; опубл. 28.11.2023 / Н. В. Юркевич, А. В. Анчугов, Н. Р. Баракат, Р. В. Золотухин. — 3 с.
59. Юркевич, Н. В. Акустический датчик и способ его изготовления: патент № 2810700 С1 Рос. Федерация: заявл. 23.06.2023; опубл. 28.12.2023 / Н. В. Юркевич, А. В. Анчугов. — 3 с.
60. Acoustic Emission Techniques and Applications / ed. J. C. Spanner. — Evanston, Illinois: Intex Publishing Company, 1974. — 274 p.

61. Hardy, H. R., Jr. Outline of activities during 1986 sabbatical leave: internal report RML-IR/87-0. Department of Mineral Engineering, Pennsylvania State University, University Park. — March 1987.
62. Drouillard, T. F. Anecdotal history of acoustic emission from wood / T. F. Drouillard // *Journal of Acoustic Emission*. — 1990. — No. 9(3). — July–September. — P. 155–176.
63. Fink, M. Acoustic time-reversal mirrors / M. Fink // *Topics Appl. Phys.* — 2002. — Vol. 84. — P. 17–43.
64. Fink, M. Time-reversal acoustics / M. Fink // *J. Phys.: Conf. Ser* — 2008. — Vol. 118, no. 1. — Article no. 012001.
65. Fink, M., Prada, C. Acoustic time-reversal mirrors / M. Fink, C. Prada // *Inverse Problems*. — 2001. — Vol. 17, no. 1. — P. R1–R38.
66. Givoli, D. Time reversal as computational tool in acoustics and elastodynamics / D. Givoli // *Journal of Computational Acoustics*. — 2014. — Vol. 22, no. 3. — Art. no. 1430001.
67. Hirano, R. Investigation of aftershocks of the great Kanto earthquake at Kumagaya / R. Hirano // *Kishoshushi. Ser. 2*. — 1924. — Vol. 2. — P. 77–83.
68. Kishinouye, F. An Experiment on the Progression of Fracture (A Preliminary Report) / F. Kishinouye // *Jishin*. — 1934. — No. 6. — P. 25–31. (In Japanese).
69. Kishinouye, F. Frequency-distribution of the Ito earthquake swarm of 1930 / F. Kishinouye // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*. — 1937. — Vol. 15, part 2. — P. 785–826.
70. Kishinouye, F. An Experiment on the Progression of Fracture (A Preliminary Report) / F. Kishinouye // *Journal of Acoustic Emission*. — 1990. — July–September. — No. 9(3). — P. 177–180.
71. Lavrov, A. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques / A. Lavrov // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2003. — Vol. 40, issue 2. — P. 151–171.

72. Mason, W. P., McSkimin, H. J., Shockley, W. Ultrasonic observations of twinning in tin / W. P. Mason et al. // *Physical Review*. — 1948. — May. — Vol. 73, no. 10. — P. 1213–1214.
73. Mason, W. P. Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics / W. P. Mason. — New York, 1950. — P. 433–437.
74. *Nondestructive testing handbook*. Vol. 5. Acoustic emission testing. — 1987. — 603 p.
75. Omori, F. J. On the aftershocks of earthquakes / F. J. Omori // *Collected Scientific Papers of the Imperial University of Tokyo*. — 1894. — Vol. 7, Part 2. — P. 111.
76. Panasian, L. L., Kolegov, S. A., Morgunov, A. N. Stress memory studies in rocks by means of acoustic emission / L. L. Panasian et al. // *Proceedings of the International Conference Mechanics of Jointed and Faulted Rock (MJFR)*. — Rotterdam, 1990. — P. 9–435.
77. Parvasi, S. M., Ho, Siu Chun M., Kong, Q., Mousavi, R., Song, G. Real-time bolt preload monitoring using piezoceramic transducers and time reversal technique — a numerical study with experimental verification / S. M. Parvasi et al. // *Smart Materials and Structures*. — 2016. — Vol. 25, no. 8.
78. Pissarenko, D., Reshetova, G. V., Tcheverda, V. A. 3D finite-difference synthetic acoustic logging in cylindrical coordinates / D. Pissarenko et al. // *Geophysical Prospecting*. — 2009. — Vol. 57, no. 3. — P. 367–377.
79. Reshetova, G., Anchugov, A., Pozdnyakov, V. Reconstruction of the acoustic emission events in a core sample by time reversal mirror / G. Reshetova et al. // *Saint Petersburg 2020 — Geosciences: Converting Knowledge into Resources*. — Saint Petersburg, 2020.
80. Reshetova, G., Anchugov, A., Pozdnyakov, V. Reconstruction of the acoustic emission events in a core sample by time reversal mirror / G. Reshetova et al. // *Saint Petersburg 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources: materials of IX Intern. geologo-geophys. conf.*— Moscow, 2020. — P. 56.

81. Reshetova, G. V., Anchugov, A. V., Yurkevich, N. V. Acoustic emission events reconstruction method from the physical experiment records / G. V. Reshetova et al. // GEOMODEL 2019 — 21st Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. — Gelendzhik, 2019.
82. Skalskyi, V. R., Koval, P. M. Some methodological aspects of application of acoustic emission / V. R. Skalskyi, P. M. Koval. — Lviv: Publishing House Spolom, 2007. — 336 p.
83. Förster, F., Scheil, E. Akustische Untersuchung der Bildung von Martensitnadeln / F. Förster, E. Scheil // Zeitschrift für Metallkunde. — 1936. — Bd. 28, Nr. 9. — S. 245–247.
84. Förster, F., Scheil, E. Untersuchung des zeitlichen Ablaufs von Umklappvorgängen in Metallen / F. Förster, E. Scheil // Zeitschrift für Metallkunde. — 1940. — Bd. 32, Nr. 6. — S. 165–173.
85. Williams, R. V. Acoustic emission / R. V. Williams. — Bristol: Adam Hilger Ltd, 1980. — 118 p.
86. James, D. R., Carpenter, S. H. Relationship between acoustic emission and dislocation kinetics in crystalline solids / D. R. James, S. H. Carpenter // Journal of Applied Physics. — 1971. — November. — Vol. 42, no. 12. — P. 4685–4697.