

На правах рукописи



АНЧУГОВ Алексей Владимирович

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

1.6.9 - Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А Трофимука Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель:

Решетова Галина Витальевна,

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительной физики горных пород Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения РАН.

Официальные оппоненты:

Пантелеев Иван Алексеевич,

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией цифровизации горнотехнических процессов Института механики сплошных сред Уральского отделения РАН, заместитель директора по научной работе Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН;

Станциц Сергей Алексеевич,

кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник Испытательной лаборатории центра науки и технологий добычи углеводородов, профессор Сколковского института науки и технологий.

Ведущая организация:

Томский научно-исследовательский проектный институт нефтяной промышленности (АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск).

Защита состоится _26 ноября 2025 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3;

факс: 8-(383) 330-28-07;

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН.

<http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/anchugov2025/dis-Anchugov.pdf>

Автореферат разослан ____17 октября__ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 проведение исследований в пластовых условиях при температуре, превышающей 150 °С. Например, температура в нефтяных залежах Мексиканского залива, приуроченных к глубинам 6,5 км, достигает 200–230 °С. [Максимов и др., 1984]. Для месторождений нефти Западной Сибири, в частности Салымского, характерны пластовые температуры около 130 °С; а высокие пластовые давления, 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 выдерживают пластовых температур, поскольку чувствительный пьезокерамический элемент отклеивается уже по достижению 120 °С, либо не выдерживают 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.

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 горных пород, 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 написание 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 Омери, что позволило значительно снизить неопределённость 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 С1].
- 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, высокоразрешающий 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 напряжённо-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 СОРАН разработан и поставлен в рамках контракта в 2022 г. рентгенопрозрачный кернодержатель с акустическими датчиками для проведения геомеханических исследований на керне размером 10х20 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 восьми научных конференциях и симпозиумах.

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.

Объём 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, 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.

Благодарности. Автор глубоко признателен своему научному руководителю, доктору физико-математических наук Галине Витальевне Решетовой за ценные советы и поддержку во время подготовки диссертации.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** поставлены задачи и цели исследования, обоснована его актуальность, определены научно-техническая новизна и практическая значимость результатов, и защищаемые научные результаты, личный вклад.

В **Главе 1** выполнен анализ современных разработок установок и оборудования для исследования петрофизических свойств керна. Рассмотрены достоинства и недостатки известного оборудования. Существующее оборудование иностранного производства GCTS, MTS, TerraTek, Autolab,

которое закупалось в предыдущие десятилетия для исследовательских центров нефтяных и сервисных компаний, в основном рассчитано на создание пластовых условий по давлению до 70 МПа обжимного, до 40 МПа порового 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 плунжеры, 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 регистрируемого полезного сигнала. Но плунжерами, оборудованными демпфером массы, нельзя ломать образцы при одноосном нагружении без риска выхода из строя датчиков. 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 ухудшает передачу энергии от пьезокерамики к образцу из-за разницы акустических импедансов материалов. Стальной закалённый плунжер может лопнуть под нагрузкой, что и наблюдалось на одной из установок с датчиками GCTS. Конструкционным недостатком акустических плунжеров некоторых производителей является их негерметичность к обжимному давлению.

Основное преимущество иностранных систем — возможность комплектации многоканальным модулем регистрации акустической эмиссии (до 16 и более каналов) с быстродействующими аналого-цифровыми преобразователями высокой частоты дискретизации (от 15 МГц и выше) и высокого разрешения (от 16 до 24 бит).

В **Главе 2** описана разработанная автором аппаратура для акустических измерений.

В первой части главы 2 указываются особые требования к приборам и материалам для работы с образцами керна. Рассматривается блок-схема разработанной аппаратуры.

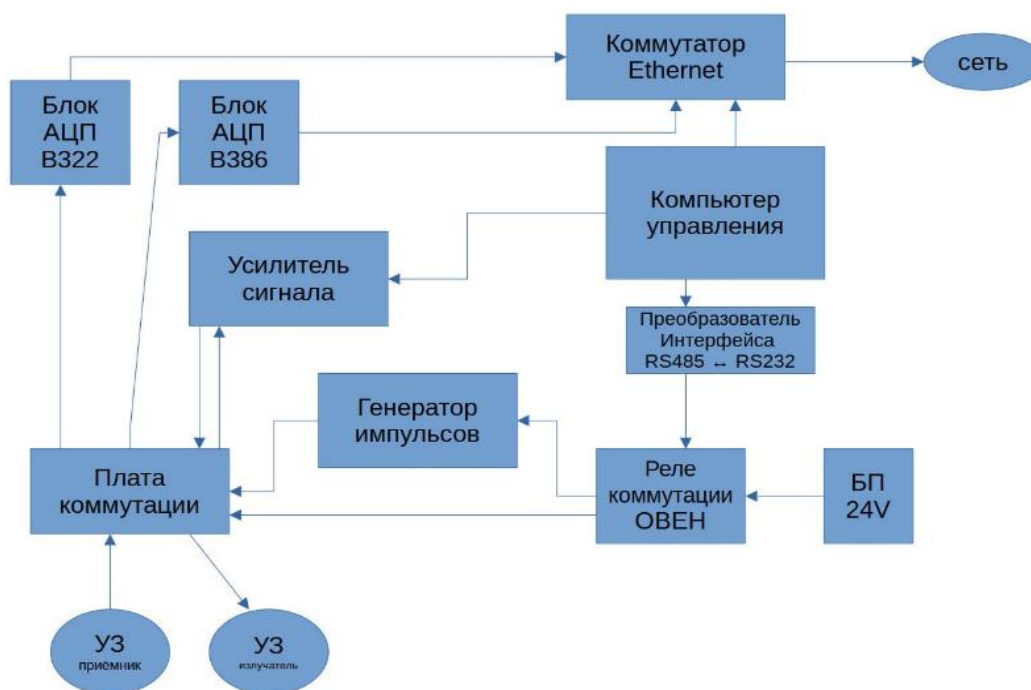


Рисунок 1 – Блок-схема измерительной системы.

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

Приводится описание каждого блока, как разработанных автором лично, так и тех, в разработке которых автор принимал непосредственное участие. Для полноты приведено описание и стандартных покупных блоков, входящих в измерительный модуль. Применение подобной системы для сбора данных описано в статьях [Решетова, Анчугов, 2019; Решетова, Анчугов, 2021; Reshetova, Anchugov, 2019; Reshetova, Anchugov, 2020]; описание компонентов системы в магистерской диссертации [Анчугов, 2021], а также соответствующем патенте [Патент № RU 2810700 C1].



Во второй части главы 2 описывается ПО управления системой регистрации акустических волн. Предложен алгоритм работы ПО, описан его принцип работы приведены сведения об использованной операционной системе Linux Debian и языке программирования Python.

Рисунок 2 – Модули различных модификаций для регистрации акустических волн.

В Главе 3 описывается конструкция и изготовление датчиков для возбуждения и регистрации акустических волн в образцах; перечисляются требования к источникам и приёмникам (температурные свойства материала, геометрические размеры и защита от внешней среды).

В первой части главы 3 приводятся сведения о параметрах пластовых условий существующих нефтегазовых скважин.

Во второй части главы 3 рассматриваются пьезопреобразователи в режиме приёма и в режиме излучения ультразвуковых волн, анализируются различные способы демпфирования пластинчатых пьезопреобразователей на специально разработанном испытательном стенде [Анчугов, 2021].

В третьей части главы 3 обосновывается выбор рабочей полосы частот пьезопреобразователей для проведения экспериментов на образцах керна.

Выполняется сравнительный анализ различных пьезокомпоновок (вертикальной и горизонтальной), исследуется скорость распространения акустического сигнала в образце с использованием измерительной компоновки из двух датчиков: излучающего и приёмного [Анчугов, 2023].

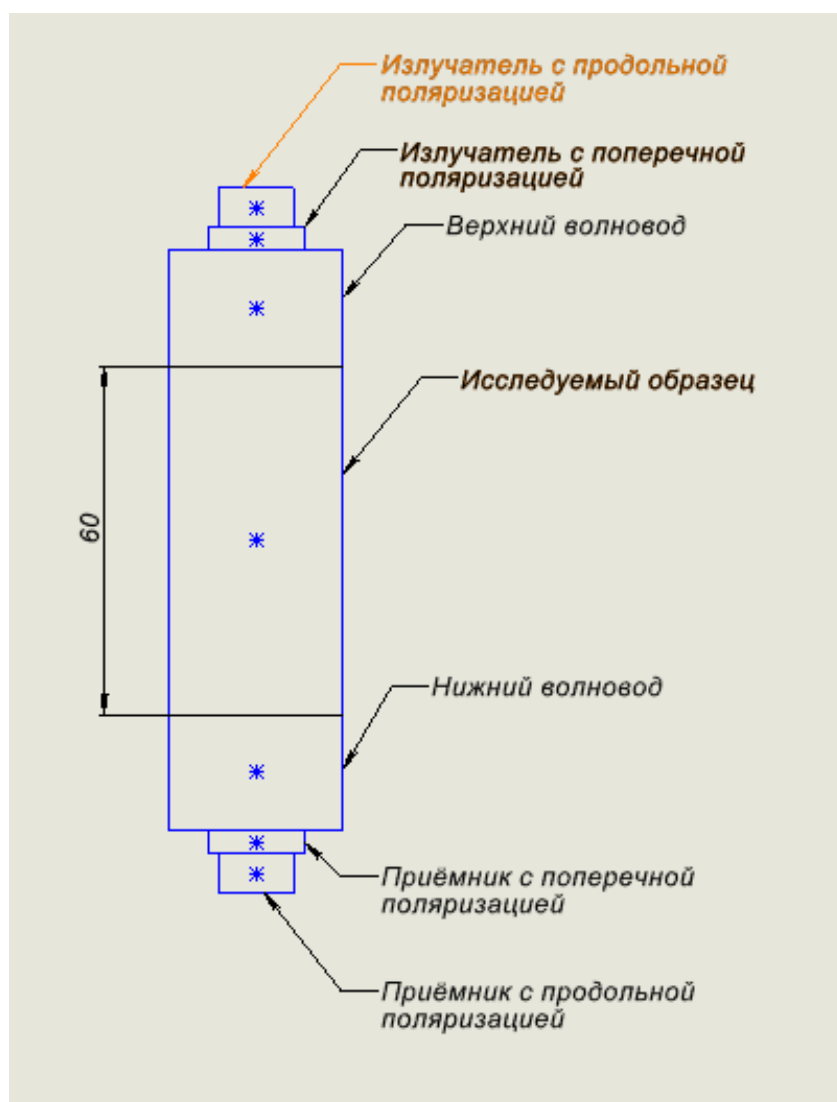


Рисунок 3 – Схематическое изображение измерительной компоновки из акустических датчиков и исследуемого образца.

В четвёртой части главы 3 с учётом свойств применяемой в датчиках пьезокерамики, рассматриваются различные способы крепления пьезопреобразователей к волноводу (корпусу) датчика.

Склейка пьезокерамической пластины с волноводом в конструкции датчика традиционно производится с помощью эпоксидного клея различных марок, в частности: MG Chemicals 8331 Conductive Epoxy Adhesive, Duralco 124 Adhesive Epoxy. Выполнены тестовые выклейки с измерением усилия на отрыв [Анчугов, 2021].

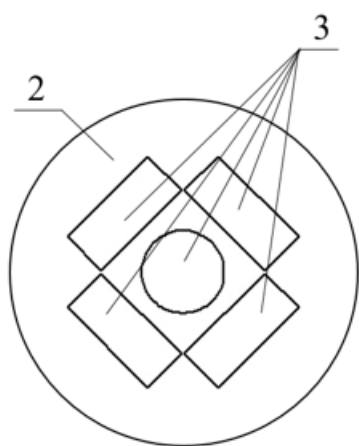
В пятой части главы 3 представлен способ надежного и повторяемого паяного соединения пьезокерамических пластин с волноводом (плунжером) мягким припоем ПОС-60 и аналогичными материалами при изготовлении акустического датчика. Разработан и внедрен на практике способ изготовления титановых акустических датчиков с использованием пайки, что

подтверждено соответствующим патентом [Патент № RU 2810700 C1. Акустический датчик и способ его изготовления]. Суть способа заключается в придании титановым деталям свойств паяемости за счёт модификации поверхности. Применение промежуточного покрытия и крепление пьезопластины методом пайки устраняет трудности, возникающие при использовании эпоксидного компаунда или механического прижима.

Освоение данного способа показало, что можно изготавливать различные типы датчиков, для работы в разных пластовых условиях. Важным аспектом способа является его полная локализация: все компоненты, включая пьезокерамику отечественного производства, изготавливаются в России.

В шестой части главы 3 детально рассматривается конструкция акустического датчика для геомеханических исследований свойств горной породы и регистрации сигналов акустической эмиссии.

Горизонтальная пьезоэлектрическая компоновка состоит из нескольких пьезопластин с продольной и поперечной поляризацией имеющих соединение с общей землёй.



Пьезопластины могут располагаться на поверхности волновода различными способами [Патент № RU 2810700 C1].

Датчики для измерения времени прохождения акустических волн всегда работают в паре, при этом один из них излучает, второй принимает.

Рисунок 4 – Схема горизонтальной пьезокомпоновки для изготовления датчика. 3 – пьезопластины, 2 – поверхность волновода.

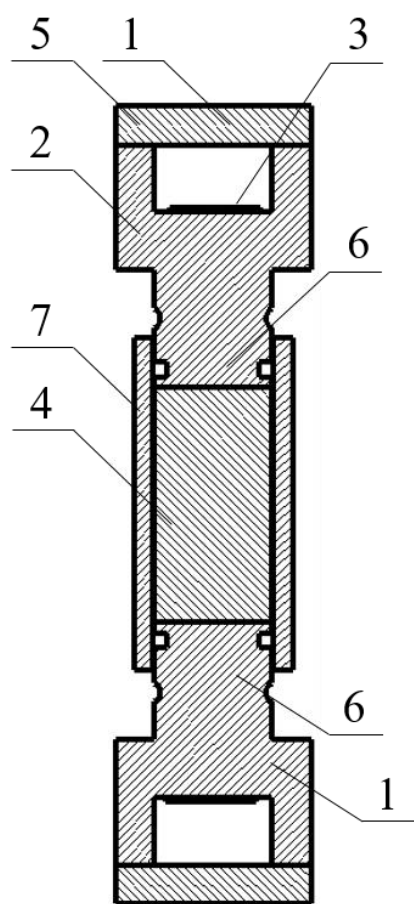
В режиме регистрации акустической эмиссии пьезопластины обоих датчиков подключаются ко входу предварительного усилителя. Так осуществляется регистрация акустической эмиссии в двухканальном режиме.

В главе 4 приведена методика измерений и область её применения.

В первой части главы 4 приведено описание геомеханического эксперимента и эксперимента по определению скорости на образце согласно ГОСТ 21153.7–75 с использованием разработанной аппаратуры.

Согласно требованиям ГОСТ 21153.7–75, точность определения времени пробега упругого импульса должна составлять не менее $0,5 \cdot 10^{-6}$ сек. Время измеряется с точностью до десятых долей микросекунды. Количество образцов при проведении измерений должно обеспечивать получение средней расчётной величины скорости распространения упругих волн с точностью не

менее 10% и уровнем надежности 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. Чтобы достичь уровня надежности 0.95 при точности 10%, необходимо исследовать не менее четырех образцов.



Образец 4 помещается в манжету 7 из термоусаживаемого материала (тонкий фторопласт или фторопласт с эластомерами толщиной не более 2 мм), зажимается между титановыми волноводами 6 акустических датчиков 1 (Рисунок 5) и устанавливается в ячейку стабилометра.

Во второй части главы 4 рассматривается 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.

Рисунок 5 – Компонировка из датчиков в сборе с образцом в манжете.

Для регистрации акустической эмиссии в двухканальном режиме достаточно подключить ко входу предварительного усилителя обе пьезокерамические продольно поляризованные пьезопластины с излучающего и приёмного плунжера (датчика). Регистрация сигналов акустической эмиссии производится специализированным блоком АЦП Аурис В320. 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 гидравлический управляемый пресс и плиты нагружения (акустические плунжеры) с установленными внутри пьезопластинами с резонансной частотой 1 МГц. Скорость осевого нагружения составляет 60 МПа/мин, без обжимного давления. Ячейка стабилометра оборудована датчиками продольной и поперечной деформации образца и датчиком усилия на оси.

Калининым С. А. с коллегами экспериментально исследовался эффект Кайзера [Lavrov, 2003; Цветков и др., 2022]. Были подготовлены специальные ориентированные образцы керна. Для регистрации сигналов акустической эмиссии собранная измерительная система включала датчики, контактирующие с образцом (через них передавалась нагрузка), и двухканальный усилитель. [Решетова, Анчугов, 2021].

Каждый эксперимент заканчивается разрушением образца в первые минуты тестирования [Цветков и др., 2022]. 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 записей закон Омори [Omori, 1894] обычно представляют степенной функцией известной как “закон Омори-Утсу”. Такое наименование и формула предложена Хирано в 1924 году [Hirano, 1924]:

$$n(t) = \frac{k}{(c + t)^p} . \quad (4.1)$$

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 использован алгоритм Байера-Крадольфера [Анчугов, 2023] а также простой пороговый алгоритм.

Из анализа временных рядов данных следует, что:

- Закон Омори применим к лабораторным данным с поправкой на условия 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.

В третьей части главы 4 рассматривается использование данных акустической эмиссии для управления ходом эксперимента при многостадийном нагружении образца для построения паспорта прочности горной породы и изучению эффекта Кайзера [Цветков и др., 2022]. Известно, что паспорт прочности (ГОСТ 21153.8–88) горных пород строится на основе

тестов не менее 4 образцов. Основной проблемой построения паспорта прочности является несовершенство образцов керна в виду их высокой неоднородности, а в некоторых случаях, некачественной подготовки образцов к тестированию.

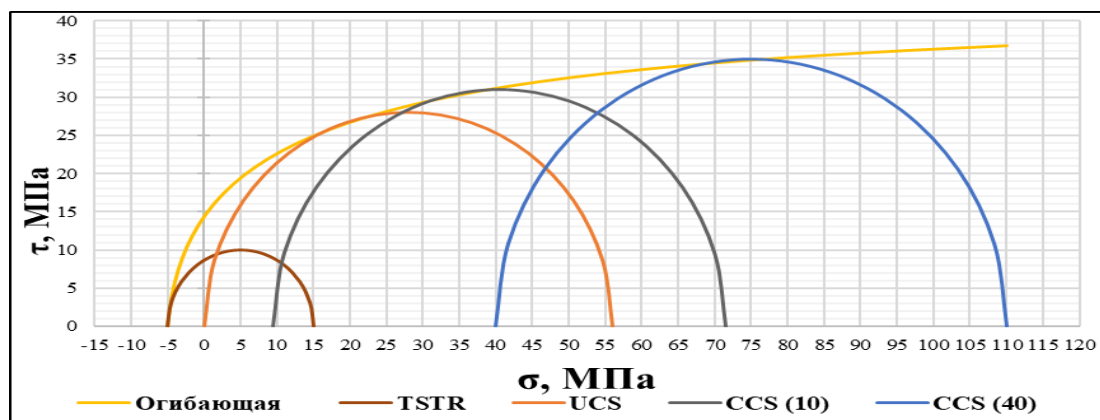


Рисунок 6 – Построение паспорта прочности горной породы. Рисунок согласно ГОСТ 21153.8–88.

Перспективным направлением исследования образцов керна является построение паспорта прочности горной породы в результате многостадийного нагружения одного образца. Образец помещается в камеру прочности (стабилометр) в манжету, и подвергается псевдотрёхосному многостадийному сжатию. Система регистрации сигналов акустической эмиссии дополняет информацию о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) образца. В частности, для некоторых пород, до момента слома, возрастает количество сигналов акустической эмиссии. Использование этого факта предоставляет возможность контролировать степень близости состояния образца к разрушению на отдельной стадии. Как только суммарное количество событий начинает резко возрастать осевое усилие понижается с одновременным увеличением обжимного [Решетова, Анчугов, 2021; Цветков и др., 2022].

В четвёртой части главы 4 приведены примеры внедрения разработанного оборудования. К примеру, в Институте физики Земли 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. Также разработанное оборудование эксплуатируется в исследовательском центре ГПН «Геосфера» г. Тюмень.

В главе 5 численно моделируется акустическая эмиссия для двумерного случая. Результаты численного моделирования применяются для оценки возможной конфигурации многоканальной системы сбора данных, частотного состава целевых сигналов АЭ, определения необходимого количества каналов

регистрации и положения датчиков относительно керна.

В первой части главы 5 на первом этапе моделирования имитируется сжатие образца, при котором вследствие внутренних напряжений и деформаций, возникают локальные источники сейсмических волн в разные моменты времени. Возникающее суммарное волновое поле регистрируется на виртуальных датчиках, расположенных с внешней стороны моделируемого образца [Решетова, Анчугов, 2021; Reshetova, Anchugov, 2020; Reshetova, Anchugov, 2019].

На втором этапе восстанавливается положение источников. Доступной информацией являются только данные регистрации в датчиках, полученные на этапе 1. При этом необходимо восстановить не только положение источников в пространстве, но и время их возникновения. Для решения обратной задачи применяется метод зеркального обращения времени, также 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]. 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.

Моделирование акустической эмиссии даёт возможность проводить виртуальные эксперименты с цифровой моделью керна. 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

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

Система дифференциальных уравнений первого порядка (5.1-5.3) предназначена для моделирования распространения упругих волн, характеризуемых радиальным u_r и азимутальным u_θ смещением, а также компонент тензора напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{r\theta}$.

Правые части в уравнениях (5.2) позволяют моделировать разные виды источников возмущений. Для задания точечного источника в виде сферического расширения, расположенного в точке (r_0, θ_0) , достаточно задать условие, что

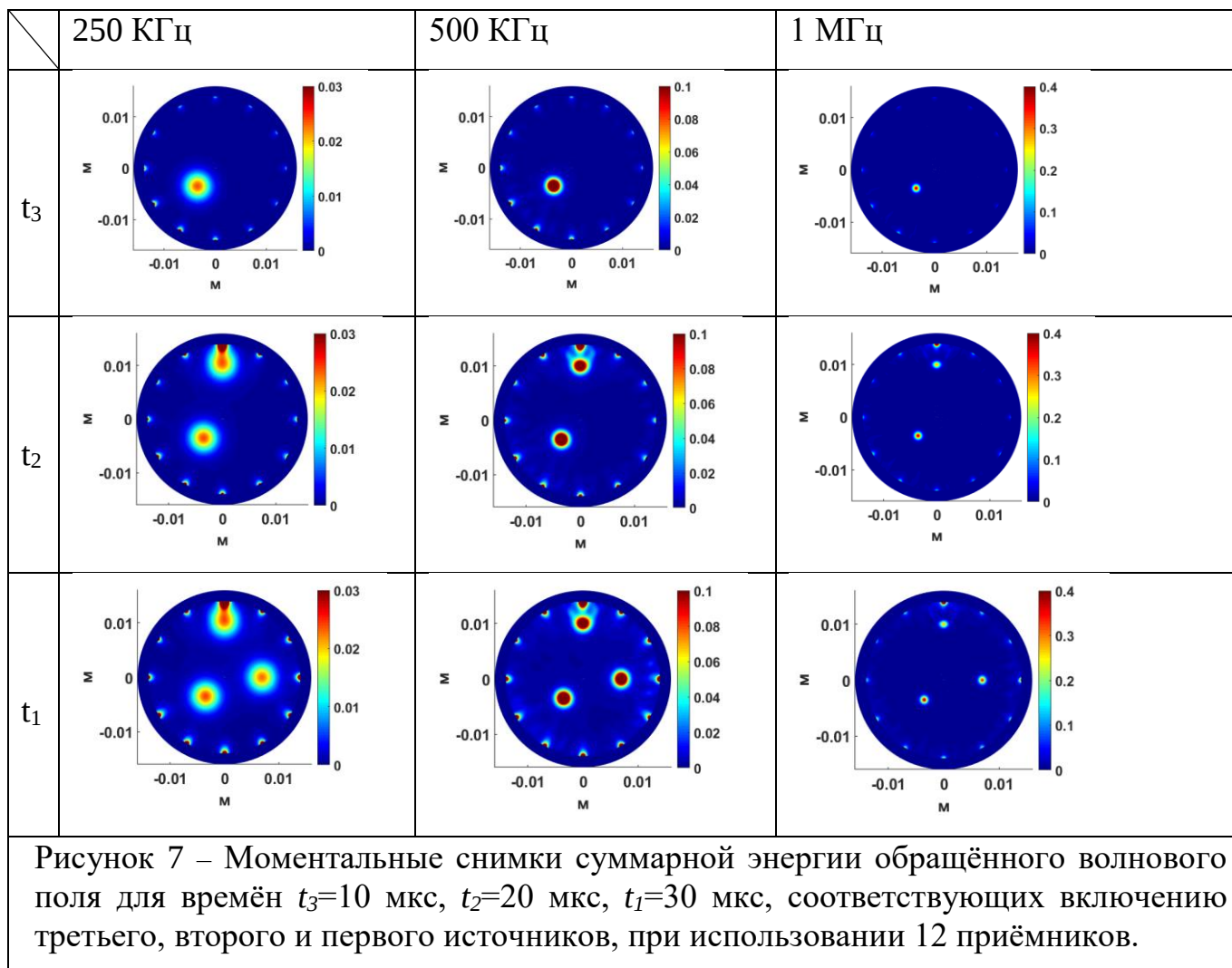
$$F_r = F_\theta = f(t) \frac{\delta(r - r_0, \theta - \theta_0)}{2\pi r} \quad (5.4)$$

где δ - дельта-функция и $f(t)$ - временной сигнал в источнике.

В численных расчетах события АЭ моделируется путем задания совокупности объемных источников, определяемых правыми частями $\vec{F} = (F_r, F_\theta)$ уравнений (5.2). В расчетах используется набор из трёх точечных источников типа 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.

Во второй части главы 5 проводится восстановление начальных положений источников и моментов активации по записанным волновым полям в наборе приемников.

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. На снимках (Рисунок 7) представлено обращённое волновое поле суммарной энергии, рассчитанное по формуле (5.6) для времен, соответствующих моментам включения первого, второго и третьего источников для различной доминирующей частоты в источнике. Выбор частот производится, исходя из анализа записи волнового поля, сделанной для реального лабораторного эксперимента [Цветков и др., 2022, Анчугов, 2025]. На имеющемся оборудовании получены сигналы, на которых надёжно наблюдаются частоты 200–300 кГц. Поэтому представленные расчёты и начинаются с 250 кГц [Решетова, Анчугов, 2021]. Вместе с тем повышение частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя позволяет регистрировать спектральные составляющие вплоть до 1,5 МГц.



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 припой 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 АЭ 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 замером удельного электрического сопротивления образца 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, 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 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. 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 (K1). — 2021. — Т. 62, № 4. — С. 597–609.
2. 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 (K2). — 2023. — Т. 59, № 3. — С. 5–17.
3. 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 (K2). — 2023. — Т. 59, № 4. — С. 24–35.

Патенты

4. 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.
5. 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.

6. 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.

Наиболее значимые доклады на конференциях

7. 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.
8. 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.
9. 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 Международной конференции. — М., 2023. — С. 21–24.
10. 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 Международной конференции. — М., 2023. — С. 25–28.
11. 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.
12. Reshetova, G. V. Acoustic Emission Events Reconstruction Method from Physical Experiment Records / G. V. Reshetova, A. V. Anchugov, N. V. Yurkevich // GEOMODEL 2019 — 21st Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. — Gelendzhik, 2019.

Технический редактор Т. С. Курганова.

Подписано в печать 30.09.2025

Бумага 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс.

Печ.л. 1,0. Тираж 105. Заказ № 250.

ИНГГ СОРАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3.