

[Handwritten signature]

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук

В период подготовки диссертации соискатель Анчугов Алексей Владимирович 1978 г. рождения, гражданин Российской Федерации, работал в ООО «Ситен Технологии» в должности ведущего инженера-разработчика с 2020 г., работает по настоящее время.

В 2021 году зачислен в число аспирантов 1-го курса на очную форму обучения по основной профессиональной образовательной программе высшего образования: программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.6.9 – «Геофизика». Отчислен из аспирантуры в 2024 году в связи с окончанием обучения, и выдано свидетельство об успешном прохождении итоговой аттестации в аспирантуре (Протокол №1 от 28 июня 2024 года) Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Материалы диссертации представлены соискателем на заседании Учёного совета ИНГГ СО РАН 16 июня 2025 г., протокол № 7.

Члены Ученого совета:

чл.-корр. РАН Д.В. Метелкин, чл.-корр. РАН Л.М. Бурштейн, чл.-корр. РАН Б.Л. Шурыгин, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонов, д.г.-м.н. С.Б. Бортникова, д.т.н. Ю.И. Колесников, д.ф.-м.н. М.И. Протасов, д.г.-м.н. В.Д. Суворов, д.т.н. К.В. Сухорукова, д.ф.-м.н. В.Ю. Тимофеев, к.ф.-м.н. А.А. Дучков, д.т.н. В.М. Грузнов, к.г.-м.н. И.А. Губин, д.г.-м.н. О.С. Дзюба, д.г.-м.н. И.В. Коровников, к.г.-м.н. М.А. Фомин, д.э.н. И.В. Филимонова, д.г.-м.н. Н.В. Сенников, д.т.н. А.Г. Плавник, д.г.-м.н. О.Е. Лепокурова, д.ф.-м.н. Ю.П. Стефанов, д.г.-м.н. Н.К. Лебедева, д.г.-м.н. В.В. Лапковский, д.ф.-м.н. В.В. Лисица, к.г.-м.н. Б.М. Попов, к.г.-м.н. А.В. Левичева.

Сотрудники ИНГГ СО РАН: д.т.н. Е.В. Балков, д.г.-м.н. З.Н. Гнибиденко, д.т.н. И.Н. Ельцов, д.т.н. А.К. Манштейн, д.ф.-м.н. В.В. Плоткин, д.ф.-м.н. Г.В. Решетова, д.ф.-м.н. Б.П. Сибиряков, д.ф.-м.н. В.А. Чеверда, к.ф.-м.н. А.М. Айзенберг, к.ф.-м.н. Д.Г. Ардюков, к.ф.-м.н. А.Ю. Белинская, к.т.н. Н.А. Голиков, к.г.-м.н. П.Г. Дядьков, к.т.н. С.А. Казанцев, к.т.н. А.Л. Макась, к.т.н. Г.В. Нестерова, к.ф.-м.н. М.А. Новиков, к.г.-м.н. В.В. Оленченко, к.г.-м.н. Ю.К. Советов, к.ф.-м.н. Т.А. Ступина, к.ф.-м.н. И.В. Суродина, к.т.н. И.И. Фадеева, к.г.-м.н. Е.В. Цибизова, к.г.-м.н. А.Е. Шалагинов, Е.В. Батурина, П.А. Дергач, П.Э. Красин, О.Н. Кушнарченко, И.О. Шапаренко.

ВОПРОСЫ ЗАДАЛИ: д.т.н. Е.В. Балков, д.т.н. Ю.И. Колесников, д.т.н. А.К. Манштейн, д.г.-м.н. Н.Н. Неведрова, д.г.-м.н. В.Д. Суворов, к.ф.-м.н. А.М. Айзенберг, к.т.н. Н.А. Голиков, к.ф.-м.н. А.А. Дучков, к.г.-м.н. В.В. Оленченко, к.т.н. И.И. Фадеева.

ВЫСТУПИЛИ: д.т.н. Е.В. Балков, д.т.н. И.Н. Ельцов, д.т.н. Ю.И. Колесников, д.г.-м.н. Н.Н. Неведрова, д.ф.-м.н. Г.В. Решетова, д.ф.-м.н. Б.П. Сибиряков, д.г.-м.н. В.Д. Суворов, д.ф.-м.н. В.А. Чеверда.

С диссертацией ознакомились специалисты-эксперты: д.т.н., академик РАН М.И. Эпов, д.г.-м.н. Н.О. Кожевников, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонов. Текст диссертации проверен в системе «Антиплагиат» и не содержит заимствованного материала без ссылки на авторов.

Члены экспертной комиссии дали **положительную** оценку диссертационной работе А.В. Анчугова.

По итогам обсуждения диссертационного исследования «Аппаратно-методическое обеспечение изучения акусто-сейсмической эмиссии в образцах керна», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика», принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Научная деятельность соискателя Анчугова Алексея Владимировича характеризуется высоким уровнем самостоятельности, творческим подходом и способностью решать актуальные прикладные задачи в области геофизики. Представленные результаты показывают высокий уровень профессиональной подготовки и способность выполнять полноценные научные и прикладные исследования, соответствующие современным стандартам.

Выполненное исследование оригинально, с высоким практическим потенциалом. Найденные соискателем технические решения и их реализация в датчиках и аппаратуре важны для развития методов геофизического исследования скважин и лабораторных исследований петрофизических свойств образцов. А сформулированные соискателем нерешённые вопросы представляют значительный интерес. Научная значимость

выполненного исследования подтверждается рядом публикаций в авторитетных журналах из перечня ВАК. Представленные к защите результаты соискателя хорошо известны научной общественности: они докладывались на ряде конференций и получили признание специалистов.

Актуальность исследования

Для определения свойств горных пород в пластовых условиях при лабораторных экспериментах требуется соответствующее оборудование, способное эти пластовые условия создавать и успешно осуществлять сбор петрофизических данных. Известное оборудование для лабораторных экспериментов для пластовых условий 120 °С и 70 МПа обжимного давления в последние годы развития экспериментальной техники не удовлетворяет требованиям, предъявляемым нефтяными и сервисными компаниями. На сегодня при освоении месторождений в связи с повышением целевых глубин бурения оборудование должно работать при температуре 170 °С и давлении 100 МПа, это требование времени.

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.

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.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

- 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 Аурус 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 определением 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.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Высокая степень достоверности полученных 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.

Полученные экспериментальные данные использовались для задания начальных условий для проведения численных экспериментов, в частности, частотная полоса

сигналов акустической эмиссии была определена экспериментально. А результаты численных экспериментов использованы для разработки конструкции датчиков и измерительной системы. Верификация численных экспериментов выполнялась сериями лабораторных экспериментов, а также сопоставлением результатов расчётов и лабораторных измерений.

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 и теоретическая 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.

Ценность научно-технических работ соискателя ученой степени

Расширен температурный диапазон, при котором возможно исследование акустических свойств и получение данных акустической эмиссии на образцах керна горной породы без повреждения датчиков в пластовых условиях, в принципе не ограничивающийся уже достигнутыми условиями по температуре и давлению (170 °С и 100 МПа).

Обосновано применение метода зеркального обращения времени для локализации событий акустической эмиссии в образцах керна.

Проверенный в работе способ изготовления датчика с помощью пайки предназначен для использования при разработке новых акустических датчиков для проведения экспериментов на образцах керна, для создания скважинных ультразвуковых акустических датчиков различного назначения, эксплуатирующихся при высоких температурах, давлениях и ударных нагрузках, и перспективных измерительных комплексов.

Внедрение результатов диссертационного исследования в практику

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 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.

Научная специальность, которой соответствует диссертация

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.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Изложенные в диссертации материалы опубликованы полностью:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

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 (К1). — 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 (К2). — 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 (К2). — 2023. — Т. 59, № 4. — С. 24–35.

Патенты

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Доклады на научных конференциях и получили одобрение (признание) специалистов:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 Международной геолого-геофизической конференции. — М., 2020. — 71 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Reshetova, G. Reconstruction of the Acoustic Emission Events in a Core Sample by Time Reversal Mirror / G. Reshetova, A. Anchugov, V. Pozdnyakov // Saint Petersburg 2020 — Geosciences: Converting Knowledge into Resources. — Saint Petersburg, 2020.

10. Reshetova, G. Reconstruction of the Acoustic Emission Events in a Core Sample by Time Reversal Mirror / G. Reshetova, A. Anchugov, V. Pozdnyakov // Saint Petersburg 2020. Geosciences: Converting Knowledge into Resources: материалы IX Международной геолого-геофизической конференции. — Москва, 2020. — С. 56.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–14 раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 18.03.2023)

Диссертация Анчугова Алексея Владимировича «Аппаратно-методическое обеспечение изучения акусто-сейсмической эмиссии в образцах керна» является научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в ней найдено новое решение научно-технической задачи: разработан датчик для изучения в лабораторных условиях акусто-сейсмической эмиссии на образцах керна, который работает при температуре 170 °С. и давлении до 100 МПа. А также разработана аппаратура для работы с датчиками для определения скоростей прохождения ультразвуковых волн и регистрации сигналов акустической эмиссии; модифицирован метод зеркального обращения времени для локализации событий акустической эмиссии.

При экспертизе текста диссертации, автореферата, публикаций, а также результатов проверки текста системой «Антиплагиат.Эксперт» **установлено**, что оригинальность текста диссертации с учетом добросовестного самоцитирования составляет 84,24%; диссертация соответствует всем требованиям п.14 «Положения о присуждении ученых степеней»:

- соискателем сделаны ссылки на все источники заимствования материалов, **фактов некорректного цитирования или заимствования без ссылки на соавторов в тексте диссертации и автореферате не обнаружено**;
- **сведения, представленные соискателем, об опубликованных им работах, в которых полностью изложены основные научные результаты диссертации, достоверны**;
- в тексте диссертации соискателем отмечено, какие результаты получены им лично, а какие – в соавторстве.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Анчугова Алексея Владимировича «Аппаратно-методическое обеспечение изучения акусто-сейсмической эмиссии в образцах керна» **рекомендуется к защите по специальности 1.6.9 – «Геофизика»** на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Заключение принято на заседании Учёного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Присутствовало на заседании 26 чел. Результаты голосования: «за» – 26 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 7 от 16 июня 2025 г.

Заключение оформила:

Ученый секретарь ИНГГ СО РАН, к.г.-м.н.



А.В. Левичева

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.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

- 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 Аурус 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 определением 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.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Высокая степень достоверности полученных 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.

Полученные экспериментальные данные использовались для задания начальных условий для проведения численных экспериментов, в частности, частотная полоса

сигналов акустической эмиссии была определена экспериментально. А результаты численных экспериментов использованы для разработки конструкции датчиков и измерительной системы. Верификация численных экспериментов выполнялась сериями лабораторных экспериментов, а также сопоставлением результатов расчётов и лабораторных измерений.

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.