

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата технических наук Анчугова Алексея Владимировича
на тему: «АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗУЧЕНИЯ АКУСТО-СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ
КЕРНА» по специальности 1.6.9 – «Геофизика»

Актуальность темы

Представленная работа посвящена разработке новой измерительной системы для проведения лабораторных испытаний образцов керна в условиях, приближенных к пластовым при температуре до 170 °С и обжимном давлении до 100 МПа. Автором были поставлены основные цели поиска нового экспериментального решения разработки надёжно работающих датчиков, а также аппаратуры, позволяющей проводить исследования образцов керна в термобарических условиях, аналогичных пластовым условиям залегания породы. Я подтверждаю, что тема диссертации и поставленная цель являются весьма актуальными. Для достижения цели автор поставил задачу поиска нового технического решения изготовления пьезоэлектрических датчиков, надёжно работающих в термобарических условиях как для посылки ультразвуковых импульсов, необходимых для измерения динамических модулей исследуемого материала, так и для регистрации сигналов акустической эмиссии, позволяющей осуществлять мониторинг динамики процесса образования трещин под нагрузкой. Кроме этого, автор поставил задачу разработки аппаратуры и её программного обеспечения, не уступающих по своим характеристикам лучшим зарубежным аналогам. Я считаю, что автор успешно справился со всеми поставленными задачами, что подтверждается как публикациями автора, так и успешным применением разработанной автором аппаратуры и датчиков в исследовательском центре

ГПН «Геосфера», в Институте Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, других компаниях и институтах нефтегазового сектора.

Общая характеристика работы и публикации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 135 страницы с 65 иллюстрациями. Список литературы состоит из 86 наименований.

Первая глава состоит из трёх частей. В начале главы автор привёл достаточно подробный анализ современных разработок, проанализировав их достоинства и недостатки. Автор показал актуальность лабораторных исследований осадочных пород, обусловленную существованием тесной связи акустических параметров горных пород с их петрофизическими и физико-механическими свойствами, а также с термодинамическим состоянием и структурными особенностями среды. Автор подчеркнул необходимость проведения лабораторных петрофизических экспериментов именно в пластовых условиях, при повышенных температуре и давлении, соответствующих условиям залегания породы на глубине. В первой главе автор показал некоторые недостатки известного импортного оборудования и поставил задачу разработки отечественных аналогов, свободных от этих недостатков, предложив новую конструкцию датчиков с новым запатентованным методом крепления пьезоэлектрического элемента.

Вторая глава состоит из шести частей, в ней приведен достаточно полный обзор основных требований к приборам и материалам, применяемым в различных компаниях для исследований образцов горных пород, на основании которого автор разработал и создал новую измерительную систему, состоящую из источника акустических колебаний, датчиков (излучателя и приёмника), усилителя принятого сигнала, блока аналогово-цифрового преобразования и компьютера для управления системой и регистрации данных

с оригинальным программным обеспечением, написанным на языке программирования Python.

Третья Глава состоит из двенадцати частей, и в ней автор подробно рассмотрел различные конструкции акустических датчиков, применяемых для возбуждения и регистрации акустических волн в образцах горных пород. На основе проведённого рассмотрения, автор предложил новый способ надёжного и повторяемого соединения пьезокерамических пластин с датчиком, подтверждённый соответствующим патентом. Важной особенностью предложенного способа является то, что все компоненты новых датчиков изготавливаются на территории РФ, поэтому производство подобных надёжных датчиков не связано ни с какими санкционными ограничениями.

В **Четвертой главе** автор привёл подробное описание методики измерений и областей её применения. В большинстве проведённых автором измерений акустические датчики использовались для измерения скоростей упругих волн, однако во второй части главы 4 автор продемонстрировал возможность использования этих датчиков в режиме пассивных приёмников сигналов акустической эмиссии, появляющихся при образовании трещин в образце породы под нагрузкой. Наличие лишь двух пьезоэлектрических датчиков, установленных по оси цилиндрического образца, не позволило автору рассчитать трёхмерную локализацию источников излучения, однако автор показал принципиальную возможность проанализировать наличие как эффекта Кайзера, так и закономерность образования трещин в нагруженном образце (закономерность Омори), широко применяемой для анализа микросейсмичности в полевых условиях.

В **Пятой главе** автор подробно описывает моделирование акустической эмиссии для двумерного случая расположения датчиков. На первом этапе автор решает прямую задачу и проводит расчёт волнового поля, которое могло бы быть зарегистрировано датчиками, установленными на цилиндрической

поверхности моделируемого образца. На втором этапе автор решает обратную задачу и определяет двумерные координаты модельного источника излучения, используя метод «зеркального обращения времени», применяемый некоторыми исследователями для расчёта координат источников излучения сигналов акустической эмиссии и микросейсмичности. Численное моделирование позволило автору проанализировать влияние доминирующих частот источников, а также числа приёмников на надёжность и точность определения координат модельных источников излучения.

В целом, следует отметить, что диссертационная работа Анчугова А.В. представляет собой самостоятельную завершённую научно-исследовательскую работу, обладающую актуальностью и научной новизной. Автор разработал новую измерительную систему, включающую акустические датчики и блок регистрации, позволяющий измерять время прохождения акустических волн через образец и регистрацию сигналов акустической эмиссии. Основные положения и выводы диссертационной работы подтверждены анализом результатов проведённых автором многочисленных тестирований образцов керна при повышенных давлении и температуре, соответствующих пластовым условиям залегания керна.

В работе показано, что разработанная автором измерительная система повышает информативность лабораторных исследований, в настоящее время лабораторное оборудование эксплуатируется в исследовательском центре ГПН «Геосфера», Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, и других компаниях, и институтах нефтегазового сектора.

Серьёзных недостатков проведённых исследований не обнаружено. Однако, следует отметить следующие моменты, которые можно отнести к рекомендациям автору для продолжения исследований в будущем:

1. В четвёртой части главы 4 диссертации автор провёл анализ акустической эмиссии после момента разрушения образца при одноосном нагружении керна, делая на странице 91 вывод о том, что *«Закон Омори применим к лабораторным данным ...»*, а также, что *«Одноосное нагружение образцов при простом эксперименте позволяет моделировать природные явления»*. Я считаю, что результаты подобного анализа были бы ещё более применимы к моделированию природных явлений, если бы автор использовал результаты акустической эмиссии, зарегистрированной при разрушении образцов, нагруженных в камере стабилометра под обжимным давлением, соответствующим определённой глубине залегания породы. В этом случае в образце был бы сформирован сдвиговой разлом, аналогичный разломам в природных условиях, и представлял бы определённый интерес анализ зависимости параметра p от величины приложенного обжимного давления. Надеюсь, что в будущем автор сможет провести подобные исследования, которые были бы ещё более применимы к моделированию природных явлений.
2. Также, в четвёртой главе автор предложил использовать анализ сигналов акустической эмиссии для управления ходом эксперимента при многостадийном нагружении образца. На странице 94 автор написал: *«Как только суммарное количество событий акустической эмиссии начинает резко возрастать осевое усилие понижается с одновременным увеличением обжимного»*. Во-первых, я хотел бы отметить, что более правильно было бы написать *«...осевое усилие понижается с **последующим** увеличением обжимного»*, поскольку как следует из анализа результатов, приведённых на Рисунке 4.20, увеличение обжимного давления происходит лишь после снижения осевого усилия до величины обжимного давления. Во-вторых,

автором не описаны формальные критерии принятия решения о начале понижения осевого усилия, указано лишь, что это делается, *«Как только суммарное количество событий акустической эмиссии начинает резко возрастать...»*. Какой критерий может быть предложен автором для того, чтобы оператор смог отличить резкое возрастание от нерезкого возрастания числа событий? В качестве рекомендаций для будущих исследований, я могу посоветовать автору разработать комбинированный критерий, основанный на анализе не только резкого возрастания числа сигналов акустической эмиссии, но и деформационных параметров образца, поскольку для построения надёжного паспорта прочности очень важно останавливать нагружение при каждом приложенном обжимном давлении в момент времени, определённый согласно специально разработанному формальному критерию.

3. В пятой главе автор определяет двумерные координаты модельного источника излучения, используя метод «зеркального обращения времени», указав на странице 112, что *«Ключевым условием успешного выполнения такого подхода является наличие идеальной абсорбирующей границы ... обеспечивающей минимальное отражение энергии на границе расчётной области. Такое условие эквивалентно реальной обстановке, где датчик закреплён в демпфирующей резиновой манжете, устраняющей вторичные эффекты»*. Во-первых, я советую автору в последующих исследованиях, используя реальные волновые формы, зарегистрированные в камере стабилметра, оценить влияние отражённых от цилиндрической поверхности образца упругих волн на суммарную волновую картину. Без такой проверки очень сложно подтвердить предположение автора, что резиновая манжета действительно создаёт *идеальную абсорбирующую границу*, что

позволяет автору пренебречь отражёнными волнами. Во-вторых, я надеюсь, что в будущем автор сможет провести сравнение локализации координат источников акустической эмиссии, используя предложенный автором метод «зеркального обращения времени» и общепринятый метод триангуляции источников, основанный на расчёте с использованием моментов прихода упругой волны на каждый из приёмников. Я надеюсь, что подобные исследования позволят автору в будущем определить преимущества и недостатки каждого из методов.

Я хотел бы отметить, что указанные выше комментарии не умаляют значимости диссертационного исследования и могут рассматриваться лишь как рекомендации к последующим исследованиям. Диссертация полностью отвечает требованиям, установленным диссертационным советом 24.1.087.02 при Институте Нефтегазовой Геологии и Геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.9 – «Геофизика» (технические науки), а также требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (утверждено постановлением правительства РФ от 24.09.13 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Таким образом, соискатель Анчугов Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,

Профессор, Центр науки и технологий добычи углеводородов,

Сколковский институт науки и технологий

СТАНЧИЦ Сергей Алексеевич

29 октября 2025

Контактные данные:

тел.: +7 (911) 772 03 19, e-mail: S.Stanchits@skoltech.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
кандидатская диссертация: 01.04.07 - «Физика твёрдого тела»

Адрес места работы:

121205, г. Москва, Большой б-р, д. 30, стр. 1

Центр науки и технологий добычи углеводородов,

Сколковский институт науки и технологий

Подпись С.А. Станчица удостоверяю:

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
Гук О.С.



29 октября 2025