

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

комиссии диссертационного совета 24.1.087.02
для принятия к защите диссертации Анчугова Алексея Владимировича
«Аппаратно-методическое обеспечение изучения акусто-сейсмической эмиссии в образцах керна»
по специальности 1.6.9 – «геофизика»
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Объектом исследования в диссертации А.В. Анчугова является аппаратура для сбора данных при проведении лабораторных петрофизических экспериментов по определению скорости прохождения акустических (ультразвуковых) волн через образцы горной породы (керн) и регистрации сигналов акустической эмиссии в пластовых условиях, а именно при температуре до 170 °С и давлении до 100 МПа.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется потребностью в экспериментальном оборудовании для исследований кернов 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 зарубежные датчики, входящие в состав оборудования для исследования кернов, либо не выдерживают пластовых температур, либо не выдерживают условий при разрушении образца.

Методы исследования: Основной метод исследования – создание акустического измерительного оборудования в ультразвуковом диапазоне частот и лабораторный эксперимент на образцах горных пород, подкреплённый численным моделированием.

Исследовано более 50 образцов керна с Вертолётной площади Томской области с различными литологическими характеристиками и гранулометрическим составом. 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.

Достоверность найденных решений подтверждается:

- применением при разработке программно-аппаратного комплекса открытой операционной системы Linux Debian, существенно упрощающей процесс написания ПО, обеспечивающего выполнение высокоточных измерений с использованием современного измерительного

оборудования, такого как цифровые блоки регистрации данных комплекса Alma Meter производства НПК «Аурис»;

- удовлетворительным совпадением результатов лабораторных физических экспериментов на образцах горных пород с результатами численного моделирования;
- обеспечением требований ГОСТ по точности измерения при межлабораторных экспериментах по определению скоростей прохождения акустических волн через стандартные калибровочные образцы;
- полученными с использованием аппаратуры экспериментальными данными, удовлетворительно совпадающими с 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 4.9×10^4 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 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.

Научная новизна результатов исследования

- Создана новая технология изготовления пьезокерамических датчиков ультразвука для работы при температуре до 170 °С и давлении до 100 МПа и выше. Основа технологии включает предварительное покрытие (аргонодуговой наплавкой) титанового волновода, куда крепится пьезопластина, и поверхность пьезопластины слоями никеля и медьсодержащего сплава с последующей импульсной пайкой пьезопластины при температуре порядка 200 °С в течение времени не более постоянной времени спада пьезоэлектрической постоянной при данной температуре.

- Предложена и реализована оригинальная схема электронного модуля сбора данных ультразвукового просвечивания керна и регистрации акустической эмиссии, содержащая аналоговый источник акустических волн, формирующий импульс, близкий по форме к импульсу Берлаге, и 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 работы

1. Предложенный 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 (импульсы акустической эмиссии), возникающих 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, оценки напряжённо-деформированного состояния среды и проектирования гидроразрыва пласта.

Научные результаты, выносимые автором на защиту:

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.

К существенным достоинствам диссертации нужно отнести эксперименты по регистрации дисперсии последовательности акустической эмиссии при импульсном нагружении образцов керна. Эксперименты моделируют закон Омори. Увеличение дисперсии в опытах автора снизило вдвое число катастроф. Таким образом динамика землетрясений и акустической эмиссии оказались определенным образом тождественными. Иными словами, некоторые проблемы физики землетрясений выведены на лабораторный стол.

Всё вышеуказанное дает основание утверждать, что **диссертационная работа А.В. Анчугова** соответствует пункту 21 **паспорта научной специальности 1.6.9 – «геофизика» по техническим наукам** «Измерительная техника, средства, технологии, системы наблюдения и сбора геофизических данных; геофизические излучающие и измерительные системы».

По теме диссертации опубликовано три работы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России на соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика» («Геология и геофизика», «Сейсмические приборы»). Результаты исследования представлены на восьми научных конференциях и симпозиумах. Зарегистрировано три патента Российской Федерации.

При экспертизе текста диссертации, автореферата, публикаций, а также результатов проверки текста системой «Антиплагиат» **комиссией установлено**, что:

- оригинальных блоков в диссертации с учетом добросовестного самоцитирования 91,00 %.
- 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 изложены основные научные результаты диссертации, **достоверны**;
- **несоответствий** текста диссертации, представленного соискателем в диссертационный совет, тексту диссертации, размещённому на сайте, **не выявлено**;
- **недостоверных сведений в документах**, представленных соискателем в диссертационный совет, **не выявлено**.

Комиссия рекомендует:

1. Принять к защите диссертацию А.В. Анчугова.

2. **Ведущей организацией** назначить Томский научно-исследовательский проектный институт нефтяной промышленности (АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск). В состав организации входит экспертно-аналитическое управление, специалисты которого проводят научные исследования по тематике диссертации и способны определить научную и практическую ценность диссертации, имеют публикации по тематике диссертации соискателя.

3. В качестве официальных оппонентов рекомендуются:

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, г. Пермь;

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

Комиссия диссертационного совета:

Председатель комиссии,
д.ф.-м.н.

Б. П. Сибиряков

д.т.н.

Ю. И. Колесников

д.т.н.

В. М. Грузнов