

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

Чумаков Андрей Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА
ВОДОПРОВОДИМОСТИ ТРЕЩИН В МАССИВЕ СКАЛЬНЫХ
ПОРОД НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

2.8.3 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Гупало Владимир Сергеевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день в Российской Федерации накоплены значительные объёмы радиоактивных отходов (РАО), размещенные во временных хранилищах. В связи с принятием ФЗ-190 «Об обращении с радиоактивными отходами» в РФ были начаты работы по созданию объектов захоронения РАО. В данный момент уже эксплуатируется несколько пунктов окончательной изоляции радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Но для изоляции наиболее опасных отходов, характеризующихся наибольшим тепловыделением, длительным периодом потенциальной опасности, высокой активностью, необходимым является создание пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Это должно позволить, за счёт сотен метров горной породы, а также искусственно созданных инженерных барьеров безопасности изолировать РАО такого типа от среды обитания человека на периоды времени, сопоставимые с периодами их потенциальной опасности.

В мировой практике для создания таких объектов рассматриваются скальные и соляные породы, а также глины. В России для создания пункта глубинного захоронения высокоактивных отходов в качестве потенциального естественного барьера безопасности были выбраны скальные породы. К отличительным чертам таких пород относят их высокую прочность, низкую чувствительность к высоким температурам и низкую растворимость. Также скальные породы на ненарушенных участках характеризуются низким коэффициентом фильтрации ($1-5 \cdot 10^{-4}$ м/сут.). Однако в таких породах присутствуют системы трещин и разломные зоны, которые могут приводить к активному переносу подземных вод и выносу радионуклидов из области захоронения. Сеть трещин в таких породах представляет собой принципиально многомасштабную и структурно неоднородную систему, в которой параметры трещин такие как: раскрытие, протяжённость, ориентация, плотность и состояние контакта стенок – в большей степени определяют фильтрационные свойства массива.

Ультразвуковые и оптические методы зарекомендовали себя как мощный инструмент исследования трещиноватости и проницаемости горных пород. При этом данные методы не позволяют определять тип водопроводимости трещинных систем вплоть до единичных трещин, имея при этом, судя по опыту лабораторных испытаний, потенциал для решения этой проблемы.

Решение данной проблемы в контексте целей изучения массива горных пород для прогноза возможной миграции радионуклидов важно для прогноза безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов, и, тем самым, разработка ультразвукового метода характеристики отдельных трещин с целью определения типа их водопроводимости является актуальной научной задачей.

Целью работы является исследование особенностей изменения спектра ультразвуковой волны при ее прохождении через трещины с различной величиной раскрытия и разработка на этой основе метода определения типа водопроводимости трещин в массиве горных пород.

Идея работы заключается в нахождении взаимосвязей параметров упругих волн и характеристик трещин, определяющих тип их водопроводимости, и разработке оборудования для получения численных значений найденных параметров упругих волн в условиях неводозаполненных скважин.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1) Провести аналитический обзор современного состояния методов описания и исследования трещин в массивах горных пород, а также определения типа их водопроводимости;

2) Определить в лабораторных условиях зависящие от величины раскрытия и шероховатости поверхности трещины параметры проходящей через трещину упругой волны, а также установить величину раскрытия, являющуюся границей разделения трещин с диффузионным и гидравлическим типами водопроводимости;

3) Установить перечень информативных параметров упругих волн, позволяющих выделять водозаполненные трещины диффузионного типа водопроводимости в массиве горных пород;

4) Обосновать технические параметры и разработать ультразвуковое каротажное оборудование, позволяющее количественно определять показатели, характеризующие трещину диффузионного типа водопроводимости в условиях неводозаполненной скважины;

5) Провести полевые исследования по определению типа водопроводимости трещин массива пород участка Енисейский с использованием разработанного аппаратного ультразвукового каротажного комплекса;

6) Разработать порядок проведения исследований в неводозаполненных скважинах с целью определения типа водопроводимости выделенных в массиве трещин.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1) Установлена зависимость энергии первого вступления упругой волны при прохождении через водозаполненную трещину от шероховатости её поверхности и величины раскрытия в отсутствии внешнего водопритока, и определено пороговое значение

этой энергии, свидетельствующее об изменении типа водопроницаемости с диффузионного на гидравлический;

2) Установлена линейная связь граничного значения величины раскрытия трещины, при котором происходит изменение типа водопроницаемости с диффузионного на гидравлический, от шероховатости поверхности её поверхности;

3) Установлено, что критерием выделения водонаполненной трещины в массиве горных пород является падение амплитуды волны Рэлея не менее чем в 2,5 раза, а также падение в спектре первого вступления упругой волны амплитуд на частотах 80 кГц и 106 кГц не менее чем в 2,5 раза.

Обоснованность и достоверность выдвинутых положений и выводов обеспечена применением проверенных современных методик экспериментальных исследований; воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных данных общим законам физики, а также ранее опубликованным результатам; представительным количеством выполненных экспериментов, полученных с использованием разработанной лабораторной установки; удовлетворительным соответствием результатов лабораторных экспериментов компьютерному и физическому моделированию, а также полевым исследованиям; удовлетворительным совпадением результатов натуральных исследований по выделению и классификации единичных трещин по водопроницаемости с результатами опытных нагнетаний; положительными результатами апробации на отечественных и международных конференциях выводов диссертационного исследования.

Научная новизна работы заключается в:

– определении порогового значения энергии первого вступления упругой волны, проходящей через водопроницающую трещину, при котором наблюдается переход типа водопроницаемости трещины от диффузионной к гидравлической;

– установлении факта влияния шероховатости поверхности трещины на величину граничного раскрытия, при котором происходит изменение типа водопроницаемости с диффузионно-проницаемой на гидравлически проницаемую;

– обосновании перечня информативных характеристик упругой волны, получаемых при проведении ультразвукового каротажа в неводонаполненной скважине, по которым можно судить о наличии единичной водонаполненной трещины в массиве горных пород.

Методы исследований включали анализ и обобщение литературных источников; экспериментальное исследование влияния раскрытия водопроницающей трещины на характеристики упругой волны; лабораторные исследования шероховатости поверхности

трещин; обработку, анализ и интерпретацию результатов исследований современными методами статистики, обобщение полученных данных.

Практическая значимость работы и реализация полученных результатов:

- разработана лабораторная установка, предназначенная для ультразвукового определения величины граничного раскрытия трещин диффузионного типа водопроводимости на образцах керна горных пород;
- разработан ультразвуковой каротажный аппаратный комплекс, предназначенный для работы в неводозаполненных скважинах и позволяющий определять тип водопроводимости трещин в массиве скальных пород;
- разработан метод определения типа водопроводимости трещин в массиве скальных пород посредством ультразвукового каротажа неводозаполненных скважин;
- результаты диссертационной работы в части разработанного метода определения типа водопроводимости трещин в массиве скальных пород на основе ультразвуковых измерений приняты к использованию в лаборатории методологии обоснования безопасности ИБРАЭ РАН.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; обзоре литературных источников; обосновании методик и разработке аппаратного обеспечения проведения экспериментальных исследований, подготовке и проведении экспериментов и обработке их результатов.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2023; 2024; 2025» (Москва), научно-технической конференции «Экологические аспекты горного и перерабатывающего производств» (Москва, октябрь 2022), конференции XXIV Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН (Москва, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 публикаций, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и входящих в международную систему цитирования Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения, изложенных на 137 страницах текста, включает 78 рисунков, 10 таблиц, список источников из 121 наименований.

Благодарности. За ценные рекомендации, конструктивные замечания в процессе подготовки диссертационного исследования автор выражает благодарность научному руководителю, д. т. н. В. С. Гупало. Также автором выражается глубокая признательность заведующему кафедрой ФизГео НИТУ МИСИС, д.ф.-м.н В.А. Винникову, профессору кафедры ФизГео, д.т.н. Е.Б. Черепецкой и всему коллективу кафедры физических процессов

горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС за неоценимую помощь при подготовке и проведении исследований, а также за консультационную поддержку при написании работы. Автором также выражается искренняя благодарность М.А. Ульяновой и А.А. Пецыку за моральную поддержку и ценные советы в ходе работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён анализ современного состояния методов описания и исследования трещин в массивах горных пород, а также определения типа их водопроводимости. Проанализированы проблемы определения типа водопроводимости отдельных трещин в массиве горных пород прямыми и геофизическими методами.

Теоретическими и практическими вопросами изучения трещин в массиве горных пород в отечественной науке занимались такие учёные, как Аверин А.П., Андерсон Е.Б., Бахтеев М.К., Белов С.В., Гик Л.Д., Еникеев В.Н., Епифанцев О.Г., Жиленков В.Н., Зенченко Е.В., Ломизе Г.М., Николенко П.В., Рац М.В., Сквородников И.Г., Чернышёв С.Н., Шкуратник В.Л. и другие.

Зарубежом также была подробно освещена данная тема такими учёными, как Aguilera R., Banks D., Barton C.A., Beck J., Che X.H., Chopra M., Dudley J.W., Hadgu T., Hsieh P.A., Jia S., Lang P.S., Lei G., Li S.J., Lockner D.A., Medlin W.L., Pan J.B., Pirson S.J., Riedmüller G., Rong G., Shirole D., Singhal B.B.S., Snow D.T., Stanchits S., Webster D.S., Zhang X., Zheng J., Zimmerman R.W. и другими.

Трещиноватые породы представляют собой принципиально многомасштабную и структурно неоднородную систему, в которой параметры трещин: раскрытие, шероховатость поверхностей, протяжённость, ориентация, плотность – определяют фильтрационные и механические свойства массивов горных пород. Традиционно используемая классификация раскрытий трещин служит фундаментальной основой для выделения капиллярных, субкапиллярных и сверхкапиллярных трещин.

Показано, что фильтрационные и гидрогеологические свойства трещиноватых массивов в решающей степени определяются структурой и параметрами трещинной сети, при этом ключевую роль играют раскрытие, связность, ориентировка и пространственная организация трещин. Также показана необходимость комплексного структурно-геологического и гидрогеологического описания, включая разграничение водопроводящих и неводопроводящих трещин.

Акустические методы сформировали эффективную инструментальную и методическую базу для исследования трещиноватости массивов пород. Лабораторные и полевые исследования подтверждают высокую чувствительность скоростей и затухания к

наличию и развитию трещин. Однако проблема их применение для исследования отдельных трещин недостаточно проработана, большая часть результатов данных методов носит интегральный характер. Либо исследуют только поверхность скважины, подверженную сильному влиянию технологии бурения и различного рода экзогенным процессам, которые искажают некоторые параметры трещин, оказывающих наибольшее влияние на их гидрологические свойства, например, раскрытие

Всё вышеуказанное обозначило актуальность выбранной темы исследования. В заключении первой главы на основе анализа нерешенных вопросов сформулирована цель и задачи исследования, изложенные во Введении.

Вторая глава посвящена проведению лабораторных исследований по выявлению связи между раскрытием, шероховатостью поверхности трещин и параметрами ультразвуковых волн.

Для определения границы величин раскрытия трещины, при котором происходит изменение типа водопроводимости, была изготовлена лабораторная установка, позволяющая фиксировать две части одного образца и обеспечивать движение одной из его частей с заданным шагом 25-50 мкм. Фотография изготовленной установки представлена на рисунке 1.

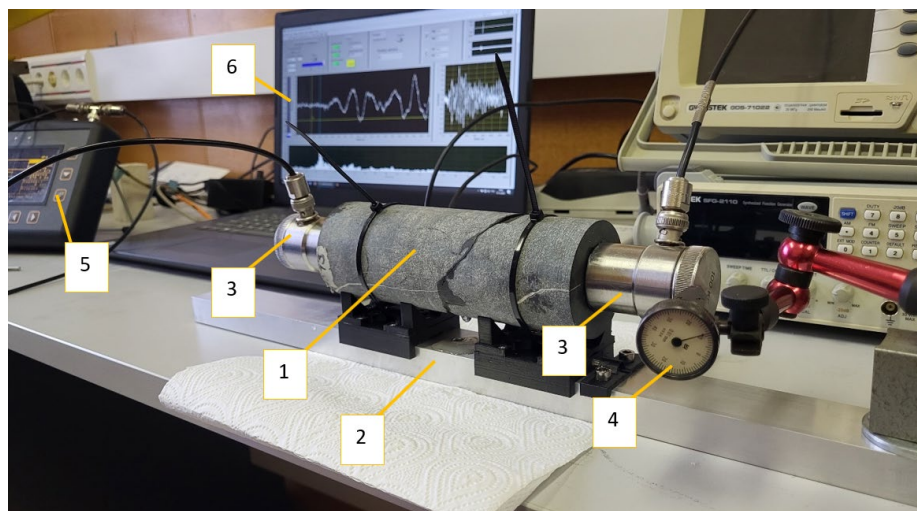


Рисунок 1 – Лабораторная установка: 1 – образец; 2 – станина; 3 – ультразвуковые преобразователи; 4 – часовой датчик перемещения; 5 – дефектоскоп; 6 – управляющий компьютер

Аппаратная часть эксперимента состояла из двух ультразвуковых преобразователей с резонансной частотой 100 кГц, дефектоскопа для генерации сигнала, АЦП производства фирмы L-CARD и ПК для фиксации и обработки УЗ сигнала. Частота зондирующего импульса на выходе из генератора также составляла 100 кГц, один период с частотой повторения импульсов 15 кГц. Исследуемые образцы представлял собой два фрагмента керна горной породы гнейсового состава диаметром 60 мм и длиной 200 мм. Один из образцов имел природную трещину, второй был предварительно распилен на две равные части для

проведения прозвучивания при разной шероховатости трещины. Торцы образцов были предварительно подготовлены для соосного закрепления на них акустических преобразователей.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем:

- 1) Торцы фрагментов керна подвергались обработке абразивными инструментами (шарошками) с различной крупностью зерна для достижения изменения шероховатости их поверхности. Затем определялась шероховатость полученной поверхности;
- 2) Подготовленные образцы помещались на каретки станда обработанными торцами друг к другу и фиксировались пластиковыми хомутами, при этом обеспечивалось минимальное начальное раскрытие трещины;
- 3) С помощью узла, обеспечивающего движение каретки, производилось передвижение на 25-50 мкм (25 мкм при исследовании распиленного образца, 50 мкм – образца с естественной трещиной), после окончания движения в трещину подавалась вода посредством медицинского шприца;
- 4) После окончания закачки воды производилась регистрация волновой формы сигнала для дальнейшей обработки (Рисунок 2).

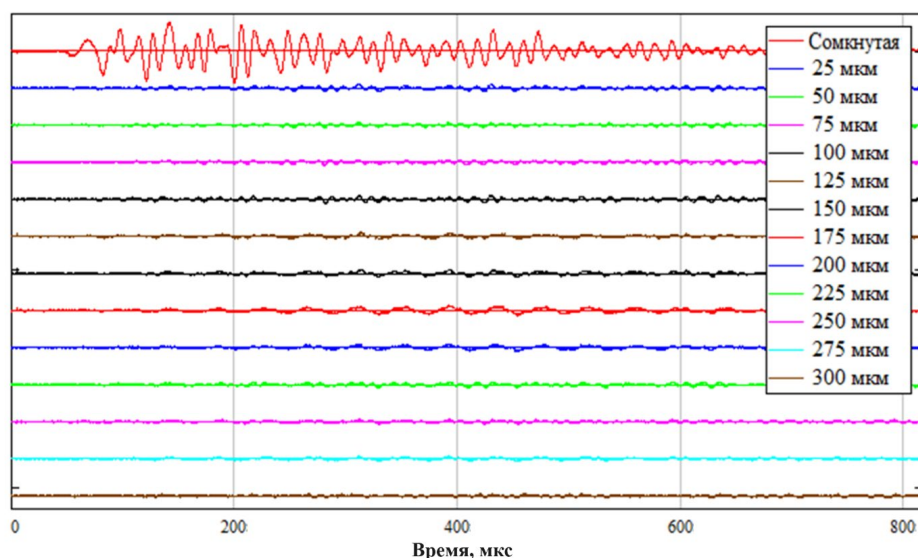


Рисунок 2 – Пример зарегистрированных волновых форм для различных значений раскрытия трещины для образца после распила до обработки абразивным инструментом

В таблице 1 представлены результаты определения шероховатости поверхностей трещины после их обработки различными типами шарошек. Определялись два показателя шероховатости: R_z – параметр оценки шероховатости поверхности, представляющий собой сумму высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля; R_a – параметр, представляющий собой среднее арифметическое абсолютных значений отклонений

профиля от его средней линии. Длина профиля составляла 12,5 мм. Расположение профилей на поверхности выбиралось произвольным образом, по 3 профиля на две поверхности трещины.

Результаты определения шероховатости поверхности для образца с естественной трещиной представлены в таблице 2. Из-за особенностей поверхности, а именно крайне высокой наблюдаемой невооружённым глазом неровности, длина исследуемого профиля была сокращена до 7,5 мм, также было уменьшено их количество до трёх.

Таблица 1 – Результаты определения шероховатости поверхностей трещины

После распила без обработки			После распила с обработкой шарошкой с размером зерна 5-10 мкм		
Номер измерения	Rz, мкм	Ra, мкм	Номер измерения	Rz, мкм	Ra, мкм
1	19,1	2,8	1	31,6	5,2
2	25,8	3,7	2	39,1	5,7
3	30,5	3,4	3	39,6	6,6
4	33,5	4,5	4	41,0	6,2
5	24,2	3,3	5	40,9	6,9
6	26,3	3,9	6	39,0	6,7
Среднее значение	26,6	3,6	Среднее значение	38,5	6,2
После распила с обработкой шарошкой с размером зерна 20-30 мкм			После распила с обработкой шарошкой с размером зерна 40-50 мкм		
Номер измерения	Rz, мкм	Ra, мкм	Номер измерения	Rz, мкм	Ra, мкм
1	53,1	10,2	1	91,6	14,2
2	56,4	10,3	2	66,2	12,4
3	60,9	9,6	3	67,8	12,7
4	69,3	10,2	4	59,6	11,5
5	74,4	11,0	5	72,3	11,7
6	61,6	11,0	6	68,0	12,9
Среднее значение	62,6	10,4	Среднее значение	70,9	12,5

Таблица 2 – Результаты определения шероховатости поверхностей естественной трещины

Номер измерения	Rz, мкм	Ra, мкм
1	103,1	17,5
2	108,8	16,2
3	93,5	19,0
Среднее значение	101,8	17,5

Для оценки взаимосвязи особенностей распространения упругих волн и типа водопроводимости был проведён применён метод анализа изменения энергии в головной части сигнала, содержащей первое вступление, что позволило проследить динамику затухания

сигнала при прохождении через трещину с различной величиной раскрытия. По результатам расчёта энергии первого вступления и рассмотрения влияния раскрытия трещины и шероховатости её поверхностей на энергию сигнала построены графики зависимости энергии от величины раскрытия для различных шероховатостей поверхности. Графики представлены на рисунке 3.

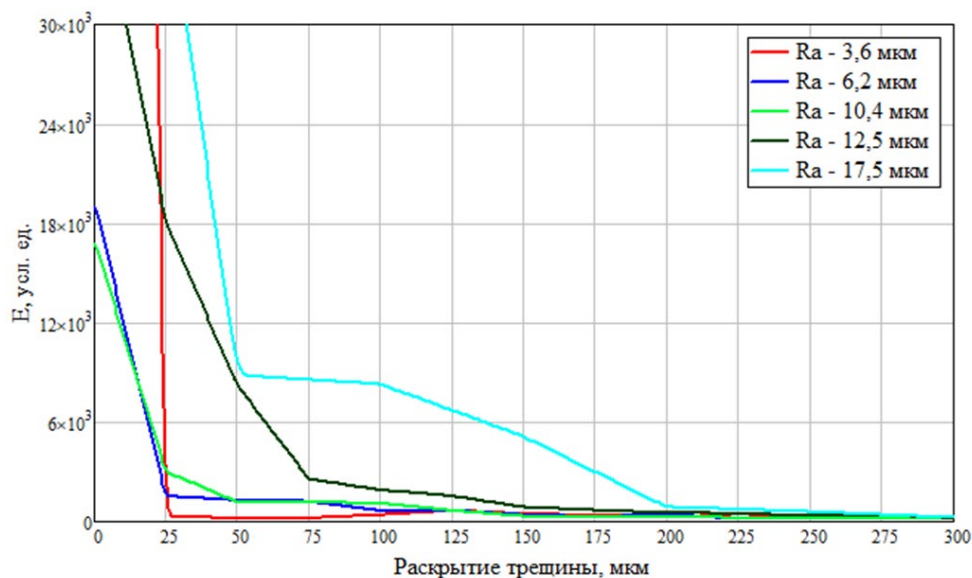


Рисунок 3 – Зависимость энергии E первого вступления от величины раскрытия трещины для образцов с различной шероховатостью поверхностей трещины

Из вышеприведённых графиков был сделан вывод, что энергия первого вступления продольной волны, пройденной через водозаполненную трещину, зависит от шероховатости поверхностей и раскрытия трещины, влияющих на количество воды в трещине и площадь контакта двух сред с меньшей разностью акустических плотностей (вода/порода). Для наглядного отображения этой зависимости была построена карта распределения энергии от шероховатости и раскрытия трещины (Рисунок 4). Энергия, соответствующая нулевому раскрытию, не учитывалась при построении карты, так как не соответствует случаю наличия водозаполненной трещины.

Для определения граничного значения энергии первого вступления при котором можно говорить об изменении гидродинамических характеристик трещины и подтверждения вышеприведённого вывода был дополнительно проанализирован график изменения энергии от раскрытия трещины с шероховатостью поверхностей равным $Ra = 10,4$ мкм (Рисунок 5)

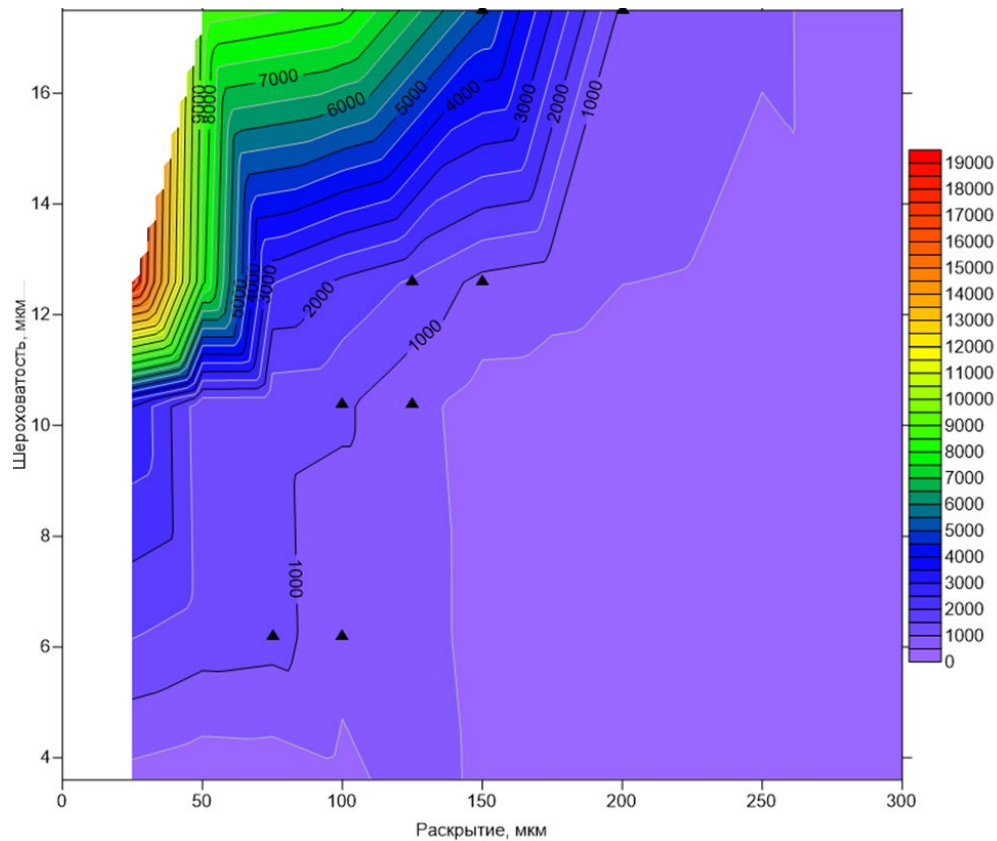


Рисунок 4 – Карта распределения энергии первого вступления продольной волны от раскрытия и шероховатости поверхностей трещины: треугольниками отмечены точки, в окрестностях которых наблюдается изменение гидродинамических характеристик трещин

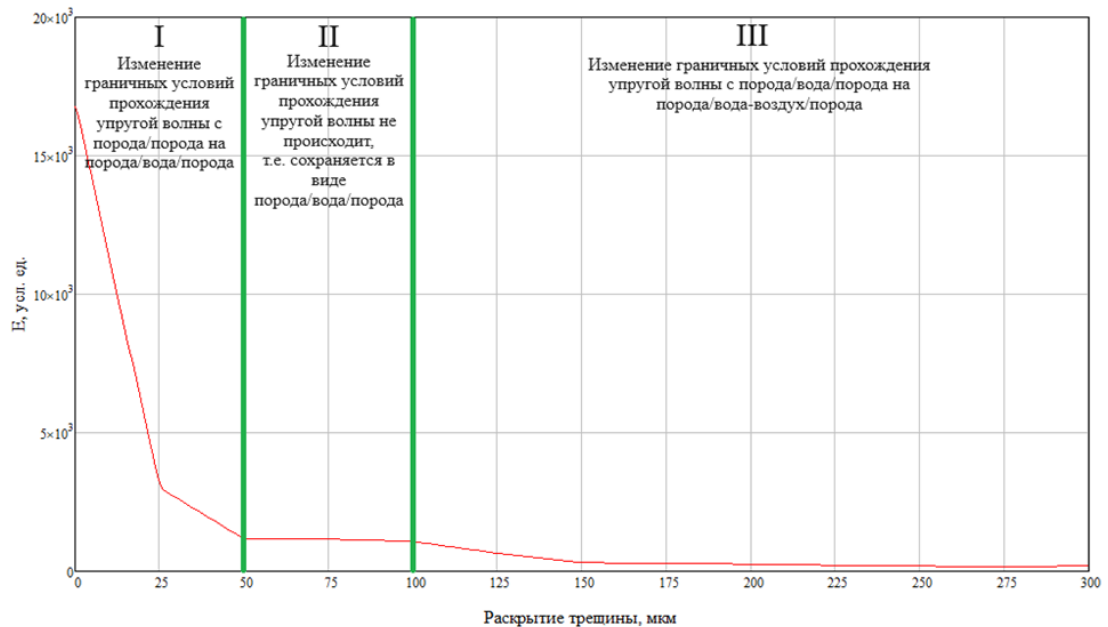


Рисунок 5 – Зависимость энергии первого вступления от величины раскрытия трещины и её производной для образца после обработки шарошкой со средним зерном ($Ra = 10,4$ мкм)

Из рисунка 5 видно, что график можно разделить на три участка: **Первый (I)** – падение энергии в связи с изменением условий прохождения сигнала с порода/порода на порода/вода/порода; **Второй (II)** – участок, на котором не происходит изменения энергии

первого вступления ввиду сохранения граничных условий порода/вода/порода; **Третий (III)** – уменьшение энергии первого вступления упругой волны, связанные с изменением граничных условий с порода/вода /порода на порода/вода-воздух/порода.

На первом участке наблюдается резкое падение энергии, связанное с появлением водозаполненной трещиной, а именно появление контрастных акустических границ порода/вода и вода/порода. Переход со второго на третий участок наблюдается между 100 и 125 мкм. При таких значениях раскрытия энергия принимает значения равные 1081 усл. ед и 643 усл. ед. соответственно. В связи с вышесказанным пороговым значением энергии первого вступления, при котором наблюдается изменение гидродинамических характеристик трещины, можно принять равным 1000 усл. ед.

По результатам определения величины граничного раскрытия, при котором происходит изменение типа водопроводимости, и порогового значения энергии для всех типов поверхности трещины были полученные данные, представленные в таблице 3. Получено регрессионное уравнение связи шероховатости поверхности трещины и граничного раскрытия вида: $b = 6.8 * Ra + 33.5$ ($R^2 = 0.98$), где b – граничное раскрытие трещины, мкм; Ra – шероховатость, мкм (Рисунок 6).

Таблица 3 – Результаты определения различного граничного раскрытия в зависимости от значений шероховатости поверхностей трещины

Шероховатость, мкм	3,6	6,2	10,4	12,5	17,5 (естественная трещина)
Граничное раскрытие, мкм	>25	75	100	125	150

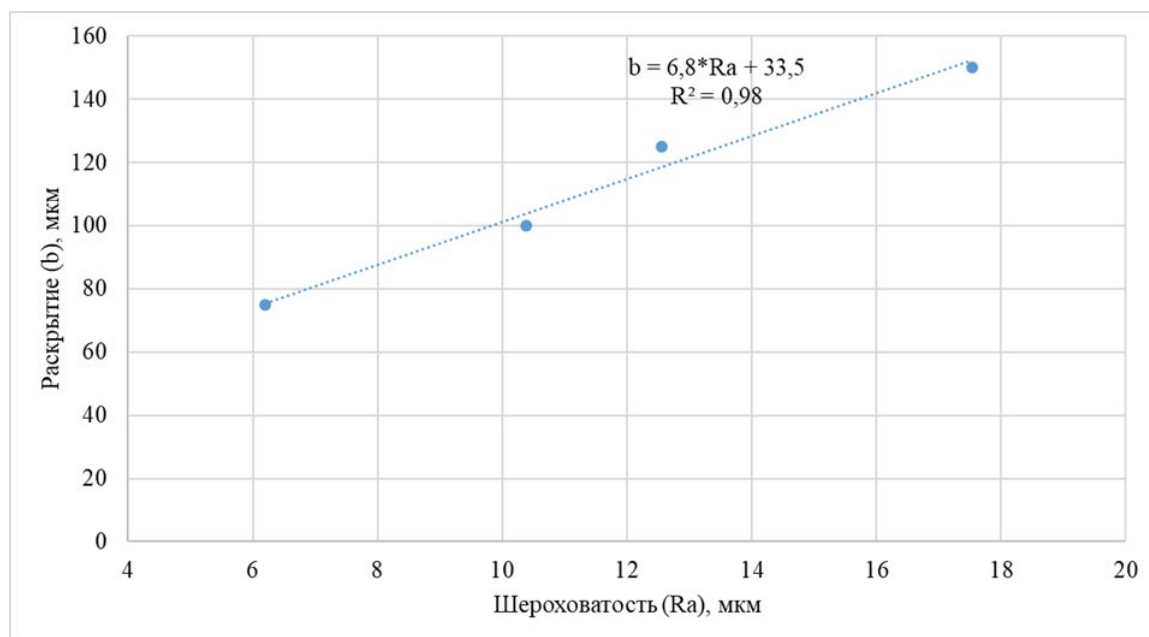


Рисунок 6 – Зависимость величины граничного раскрытия трещины от шероховатости

Таким образом установлено, что при величине раскрытия трещины, равном 150 мкм, и шероховатости, равной 17,5 мкм, происходит качественное изменение гидродинамических характеристик естественной трещины (изменение типа водопроницаемости с диффузионного на гидравлический), связанное с переходом от капиллярного раскрытия к сверхкапиллярному.

Далее с целью определения критерия выделения водонаполненной трещины в массиве горных пород были проанализированы спектры первых вступлений полученных волновых форм сигналов (Рисунок 7 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Для рассмотрения брались только те формы, которые попадали в диапазон в пределах граничного раскрытия трещины диффузионного типа водопроницаемости.

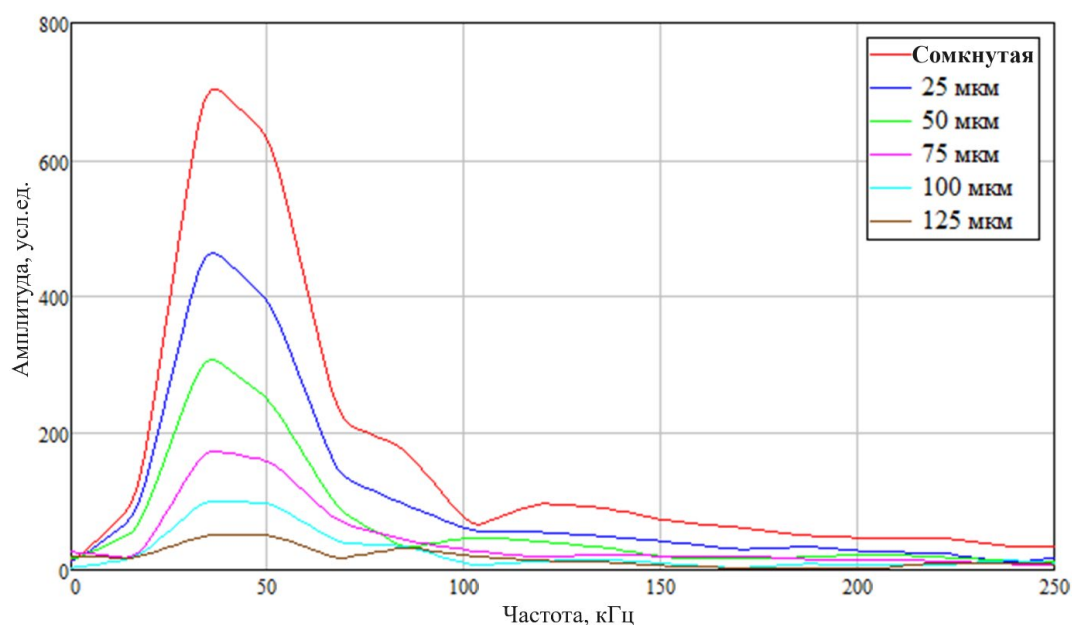


Рисунок 7 – Пример графика амплитудно-частотного спектра для различных величин раскрытия водонаполненной трещины после обработки шарошкой с крупным зерном для участка с первым вступлением

Полученные результаты были разделены на две группы, связанные с типами образцов: образец с искусственно полученной трещиной и естественной.

Для первой группы было определено, что амплитудный пик на частоте 35 кГц имеет наибольшую амплитуду при нулевом раскрытии водонаполненной трещины. При увеличении раскрытия до 25 мкм амплитуда данного пика снижается неравномерно в зависимости от шероховатости поверхности трещины от полного затухания при шероховатости 3,6 мкм до падения в 1,5 раза при шероховатости 12,6 мкм. При дальнейшем увеличении раскрытия происходит дальнейшее падение амплитуды данной области, при этом при меньшей шероховатости падение происходит на меньших значениях раскрытия, что может объясняться более быстрым уменьшением количества воды в трещине и, как следствие, уменьшению площади водного контакта между двумя частями образца.

Для второго типа образца с естественной трещиной с шероховатостью поверхностей

трещины 17,5 мкм определено, что для случая монолитного участка выделяется два пика на частотах 35 кГц и 100 кГц. При появлении водозаполненной трещины на пути прохождения упругой волны наблюдается значительное снижение пика в области 100 кГц (в 3,85 раза, или на 74%). Амплитуда в области 35 кГц также снижается (в 2,32 раза, или на 57%). При этом для техногенной трещины с шероховатостью поверхностей 12,5 мкм при раскрытии 50 мкм амплитуда данного пика снижается в 2,29 раза, что близко к значению при естественной трещине.

Очевидно, что соотношение между амплитудами данных пиков с появлением и ростом раскрытия водозаполненной трещины изменяется. Для определения данного изменения были рассчитаны отношения амплитуд в области частот 100 кГц к амплитудам в области 30 кГц (Таблица 4).

Таблица 4 – Отношения амплитуд в области частот 100 кГц к амплитудам в области 30 кГц.

Монолит	Раскрытие 50 мкм	Раскрытие 100 мкм	Раскрытие 150 мкм
0.62	0.34	0.39	0.2

Представленные в данной главе результаты исследований позволили сформулировать первые два научных положения.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию ультразвукового каротажа с целью выделения водозаполненной трещины.

Для определения возможности выделения в ходе проведения ультразвукового каротажа капиллярных трещин, обеспечивающих диффузионный тип миграции радионуклидов, было проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics с использованием модулей *Elastic wave* и *Acoustic pressure*.

Моделирование производилось в двумерном осесимметричном пространстве, в котором ось модели совпадала с осью измерительной скважины ($r = 0$), диаметр скважины равен 76 мм. На этой границе радиальная составляющая скорости, а также тангенциальная составляющая напряжения, приравниваются к нулю.

Свойства материала среды: модуль Юнга – 30 ГПа; коэффициент Пуассона – 0.18; плотность – 2400 кг/м³. Трещина с задаваемым раскрытием была расположена посередине задаваемой модели. В качестве заполнителя трещины выступала вода со скоростью распространения упругих волн, равной 1500 м/с, и плотностью 1000 кг/м³.

Ввод упругой волны осуществлялся на участок твердой среды протяженностью 6 мм на расстоянии 100 мм от трещины.

Поверхность контура скважины представляет собой свободную границу, где тензор напряжений равен 0, аналитически выражается как: $\sigma \vec{n} = 0$. Так как рассматривается участок

массива со скважиной, то границы твёрдой среды со стороны массива не должны отражать от себя упругие колебания. Для этого принимается, что на удалённой границе на больших расстояниях от источника происходит затухание упругих колебаний/

Регистрация сигнала производится в точке на расстоянии 100 мм на противоположной стороне нагружаемой границы от трещины. Расстояние между зоной подачи давления и регистрации сигнала, равное 200 мм, обусловлено предполагаемым расстоянием между излучающим и приёмным преобразователем разрабатываемого ультразвукового зонда.

Общая схема модели с указанием граничных условий представлена на рисунке 8.

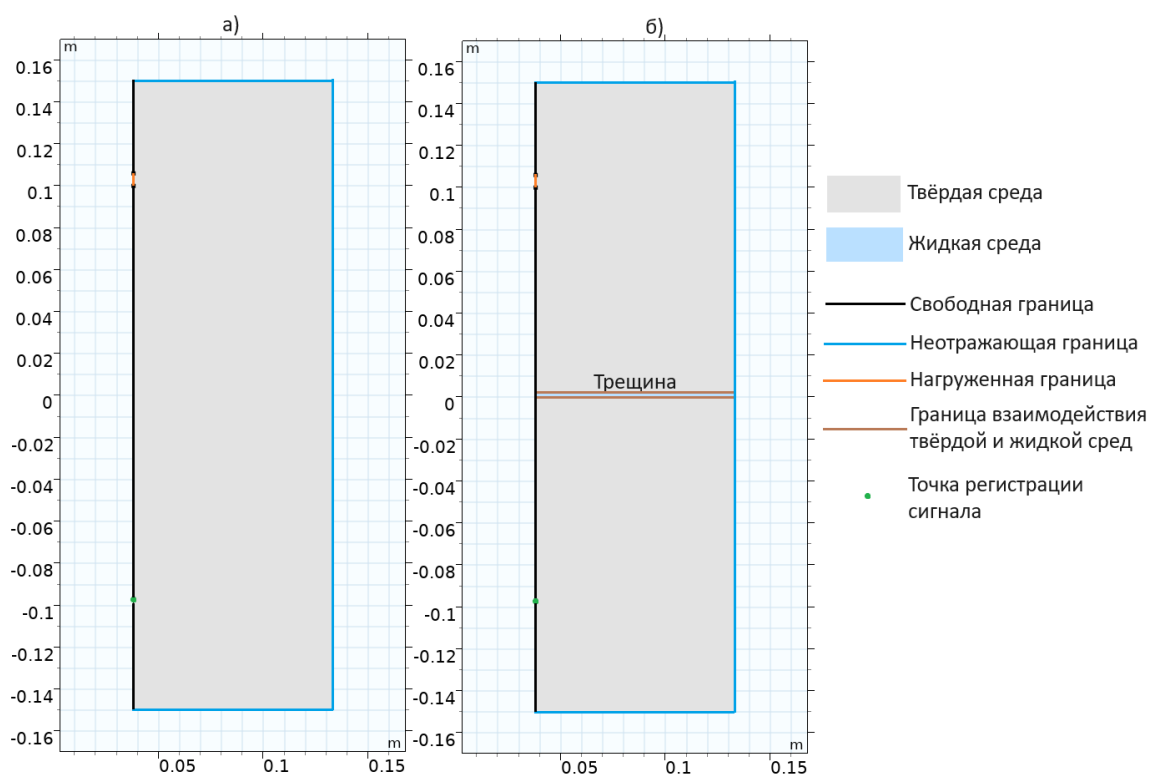


Рисунок 8 – Общая схема базовой компьютерной модели: а) без трещины; б) с трещиной

Решение производилось во временном интервале 0-300 мкс с шагом решения 36.6 нс. В качестве регистрируемого параметра выбрана радиальная компонента колебательная скорость v_r , определяемая вдоль радиального направления от оси скважины. Зарегистрированные волновые формы показаны на рисунке 9.

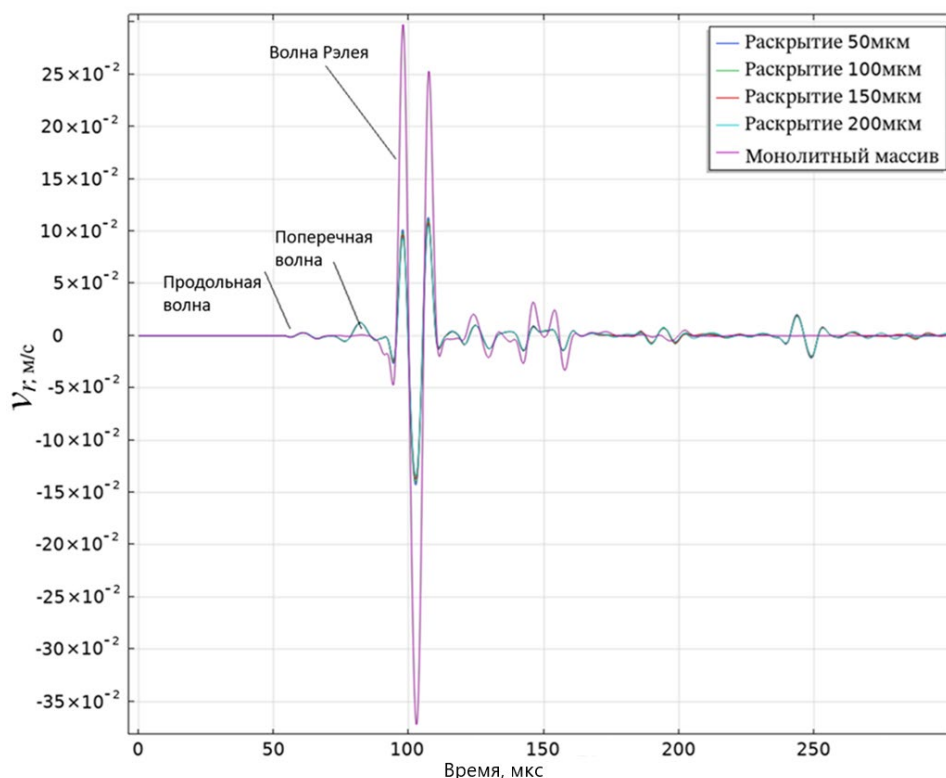


Рисунок 9 – Полные волновые формы зарегистрированных импульсов для случаев монолитного массива и наличия водозаполненной трещины различного раскрытия

При анализе волновых форм было определено, что явно выделяются три типа упругих волн: продольная, поперечная и Рэлея. При появлении водозаполненной трещины не происходит значительного изменения времени прихода продольной волны. Последнее представляется логичным, т.к. основной вклад в затухание сигнала вносит отражение на границах контакта сред с контрастными акустическими импедансами $z = \rho_s c_p$, где ρ_s – плотность среды; c_p – скорость продольной волны. В данном случае очевидно, что количество таких границ не меняется.

Однако при этом явно заметно значительное падение амплитуды волны Рэлея при появлении на пути распространения упругих волн водозаполненной трещины. Падение амплитуды произошло в 2,5 раза, причем по вышеописанной причине время прихода данной волны не изменяется с ростом раскрытия трещины.

Далее, для анализа влияния наличия водозаполненной трещины на спектральные характеристики упругой волны были рассчитаны спектры ограниченного во времени участка волны длительностью 150 мкс (Рисунок 10).

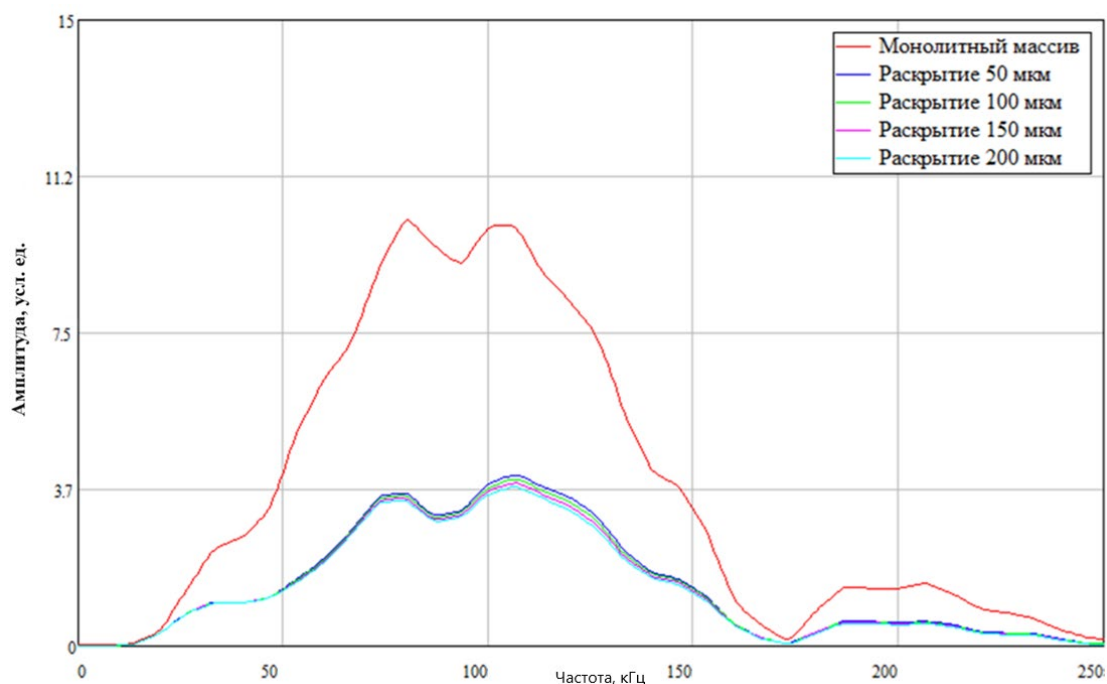


Рисунок 10 – Амплитудные спектры для монолитного участка и участков с трещиной фронтов волн длительностью 150 мкс

При анализе полученных спектров было установлено, что в спектре части волны также, как и при лабораторных испытаниях, выделяется две высокоамплитудных области на частотах 80 кГц и 106 кГц. Падение амплитуды на этих частотах в спектре сигнала при раскрытии трещины 50 мкм относительно случая с монолитным массивом происходит в не менее чем 2,8 раза и 2,5 раза, что эквивалентно падению на 64% и 59% соответственно. При дальнейшем увеличении раскрытия трещины до значения 200 мкм происходит дальнейшее падение амплитуды на 5% и 7% соответственно.

Таким образом результаты, полученных в данной главе, позволили сформулировать третье научное положение.

Четвёртая глава посвящена разработке скважинного акустического зонда и необходимых дополнительных технических устройств, обеспечивающих выполнение исследований приконтурной части массива скальных пород в неводозаполненных скважинах.

К оборудованию для реализации ультразвукового каротажа с учётом условия неводозаполненности скважины предъявляется ряд обязательных требований:

- зонд должен обеспечивать надежный и повторяемый ввод акустических колебаний в исследуемую среду, а также их прием и регистрацию;
- с целью формирования устойчивого волнового фронта на базе прозвучивания должно укладываться не менее трех длин волн;
- акустические развязки между преобразователями должны исключать влияние проходящего по ним сигнала на первое вступление продольных волн, полученное из объекта

исследования. В идеале акустические развязки должны полностью исключать прохождение ультразвукового сигнала по корпусу зонда;

- зонд должен надежно работать в условиях частичного погружения в воду (водоприток в скважину через трещины в массиве пород не исключен);
- система прижима преобразователей к стенкам скважины должна обеспечивать достаточное усилие и постоянство прижима. Конструкция прижимных узлов должна исключать их заклинивание из-за попадания пыли и остатков буровой мелочи.

Все вышеуказанные требования были учтены при создании каротажного оборудования. Разработанный акустический зонд предназначен для проведения каротажных ультразвуковых измерений в неводозаполненных скважинах диаметром 76 мм. Общий вид скважинного зонда представлен на рисунке 11.

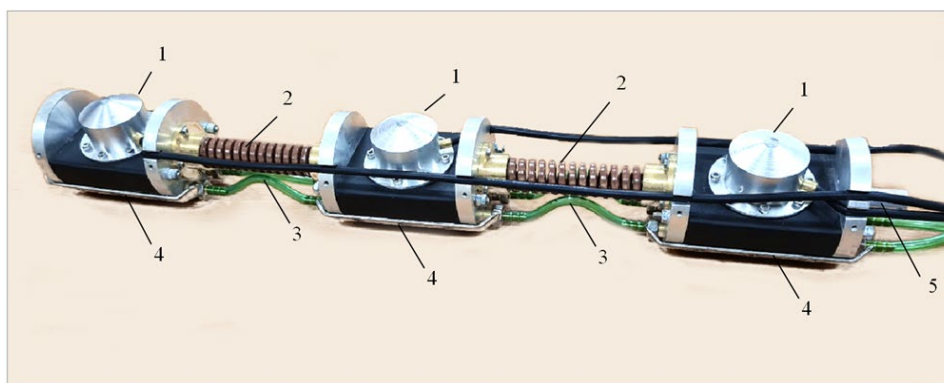


Рисунок 11 – Общий вид скважинного зонда: 1 – пьезоэлектрические преобразователи; 2 – акустические развязки; 3 – пневматические трубки системы прижима преобразователей; 4 – защитные направляющие; 5 – узел крепления досылочных штанг

Зонд имеет модульную структуру и состоит из трех взаимозаменяемых модулей (излучающего и двух приемных), каждый из которых содержит ультразвуковой преобразователь, защитные направляющие и систему пневматического прижима. Соединение модулей осуществляется с помощью сменных акустических развязок и пневматических трубок.

Разработанный акустический зонд предназначен для работы в составе каротажного комплекса и позволяет производить измерения скоростей и амплитуд первого вступления продольных волн в измерительных скважинах, пробуренных из горных выработок. Реализованные технические решения позволяют повысить надежность работы устройства и его помехозащищенность, а также гарантировать высокую степень постоянства контактных условий на границе «преобразователь-порода». Основные технические характеристики зонда представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные технические характеристики ультразвукового каротажного зонда

Характеристика	Значение
База прозвучивания, мм	205
Резонансная частота преобразователей, кГц	80
Рабочее давление системы прижима, атм	3
Общая длина зонда без досылочных устройств, мм	520

Пятая глава посвящена проведению физического моделированию ультразвукового каротажа неводозаполненной скважины с использованием разработанного зонда для проверки его работоспособности, а также проверки возможности классификации трещин.

Для проведения ультразвуковых каротажных исследований была создана физическая модель, представляющей собой бетонный цилиндр с центральной скважиной, содержащий магистральные трещины с возможностью их заполнения водой, схема которой представлена на рисунке 12

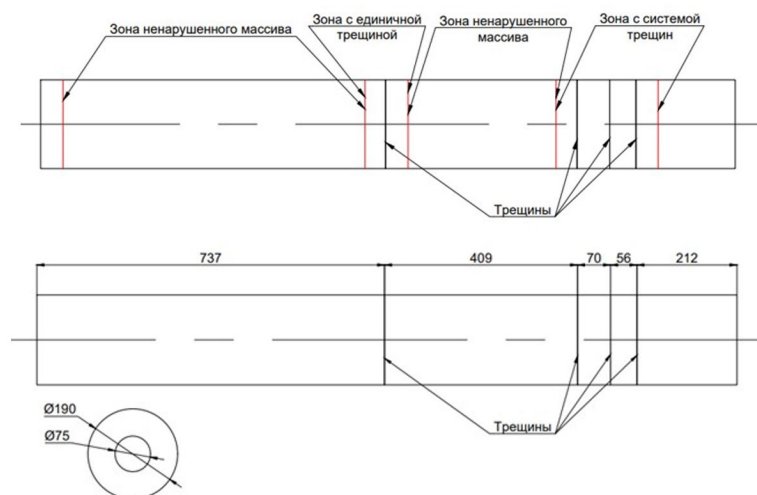


Рисунок 12 – Схема конструкции физической модели скважины

В качестве модельного материала была использована песчано-цементная смесь, скорость продольной волны в которой равна $c_p = 3250$ м/с, а плотность $\rho = 2400$ кг/м³. Таким образом, акустический импеданс z равен $7,8 \cdot 10^6$ кг/(м²с).

Местоположение единичной трещины выбиралось исходя из конструкции зонда, а именно расстояния между излучателем и приёмником, так чтобы одновременно между датчиками находилась только одна эта трещина, что позволяет смоделировать нахождение единичного нарушения, пересекающего ось скважины в массиве горных пород. Толщина «породного» слоя в прискважинной области физической модели составила 60 мм.

При проведении моделирования использовался разработанный ультразвуковой зонд в составе каротажного комплекса (Рисунок 13).

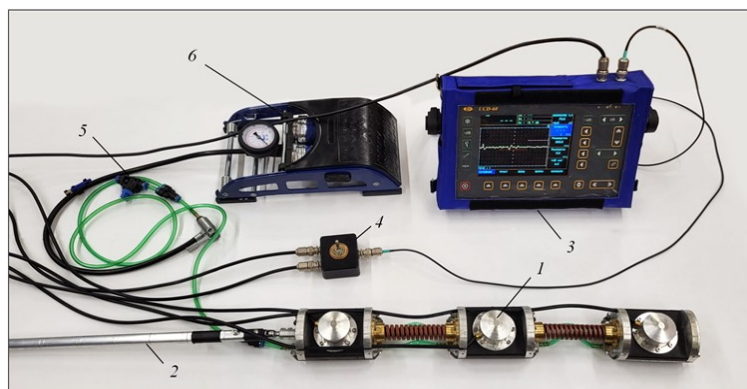


Рисунок 13 – Общий вид каротажного комплекса: 1 – ультразвуковой каротажный зонд; 2 – досылочная штанга; 3 – дефектоскоп УСД-60Н; 4 – коммутатор; 5 – воздушный клапан; 6 – пневматический насос

Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе акустический зонд помещался в зону ненарушенного массива (Рисунок 12) для получения волнового фронта неискажённого трещиной. На втором этапе модель наполовину заполнялась водой, чтобы обеспечить водозаполненность единичной трещины, затем зонд помещался так, чтобы единичная трещина оказалась ровно посередине между излучателем и приёмником ультразвукового сигнала.

На обоих этапах производилась запись волнового фронта длительностью 416 мкс с шагом дискретизации 25 нс. Для исключения искажений рассматриваемые волновые фронты были сокращены в 2 раза до 208 мкс и были рассчитаны аналогичным в предыдущим главах способом их амплитудно-частотные спектры. Полученные амплитудно-частотные спектры представлены на рисунке 14.

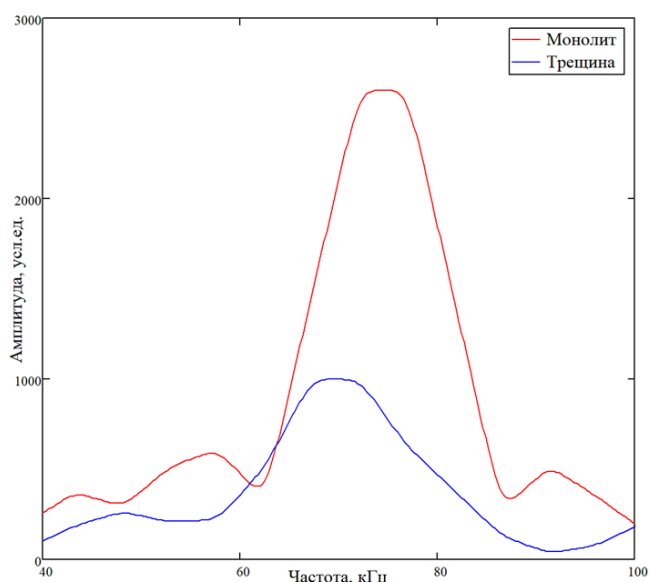


Рисунок 14 – Амплитудно-частотные спектры для монолитного участка и участков с водозаполненной трещиной для сигнала длительностью 208 мкс

Установлено, что на частоте 75 кГц происходит значительное снижение амплитуды гармоники в 2,6 раза. Сравнивая амплитудно-частотные характеристики с полученными при

компьютерном моделировании (Рисунок 10), можно заметить подобие форм графиков спектров для случая с наличием водозаполненной трещины. В случае монолитного массива картины спектра отличаются. Однако можно заметить, что в области 55 кГц также присутствует незначительный пик, схожий с полученной при компьютерном моделировании картиной.

Шестая глава посвящена проведению полевых исследований трещиноватых зон в окрестности горной выработки разработанным ультразвуковым каротажным зондом.

Обследуемый горный массив сложен метаморфическим комплексом пород докембрийского возраста, в основном (до 80-90%) представленным биотит-плагиоклазовыми гнейсами различных оттенков серого цвета (серыми, темно-серыми и зеленовато-серыми) с однородной массивной, реже полосчатой и пятнисто-очковой текстурой. Массив прорублен мелкими штоками гранитов и дайками основного состава, относящимися к исаевскому метакомплексу позднего архея.

Гидрогеологические условия участка определяются наличием и характером заполнения трещин в породах. Обводненность неравномерная, с глубоко расчлененными водораздельными областями. Участок характеризуется присутствием вод рыхлых отложений и связанных с ними трещинных вод коренных пород. Водопритоки варьируются от 0,01-0,05 до 0,1-0,2 л/мин. Коэффициенты фильтрации составляют 0,007-0,3 м/сут. Зоны повышенной проводимости, связанные с тектоническими нарушениями, имеют сложный характер и подтверждаются данными расходомерии, пониженным выходом керна и значительным поглощением промывочной жидкости.

Для проведения ультразвукового каротажа использовался каротажный комплекс, состоящий из модульного скважинного зонда, низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н, пневматического насоса и комплекта дополнительных устройств (Рисунок 13).

Каротаж скважины производился от устья к забою. Шаг измерений выбирался исходя из соображений минимизации временных затрат на выполнение каротажа по всей протяжённости скважины, соответственно, шаг измерений был выбран равным 30 см, т.е. перекрытие интервала прозвучивания составило 10 см. Это позволило увеличить количество обследованных точек и получить данные о скорости прохождения УЗ волны на интервале перекрытия дважды, что даёт возможность исключить из дальнейшей интерпретации аномальные значения, связанные с неверным определением момента прихода упругой волны, а также недостаточным прижимом протекторов пьезопреобразователей.

Акустический каротаж в скважинах был выполнен дважды – до опытных фильтрационных работ (ОФР) и после.

Первичным результатом реализации описанного алгоритма измерений явился журнал записей, содержащий информацию о скважине, значения скоростей продольных волн с отметками координат зонда. Далее строились каротажные кривые (Рисунок 15). По результатам сравнения полученных данных до и после ОФР произведено разделение трещин по типу водопроницаемости на диффузионные и гидравлические.

Таким образом, если после опытного нагнетания (ОФР) удавалось зарегистрировать ультразвуковой сигнал (на том интервале, где до ОФР сигнал отсутствовал), то принималось решение об отнесении выявленной трещины к диффузионному типу, в противном случае – к гидравлическому.

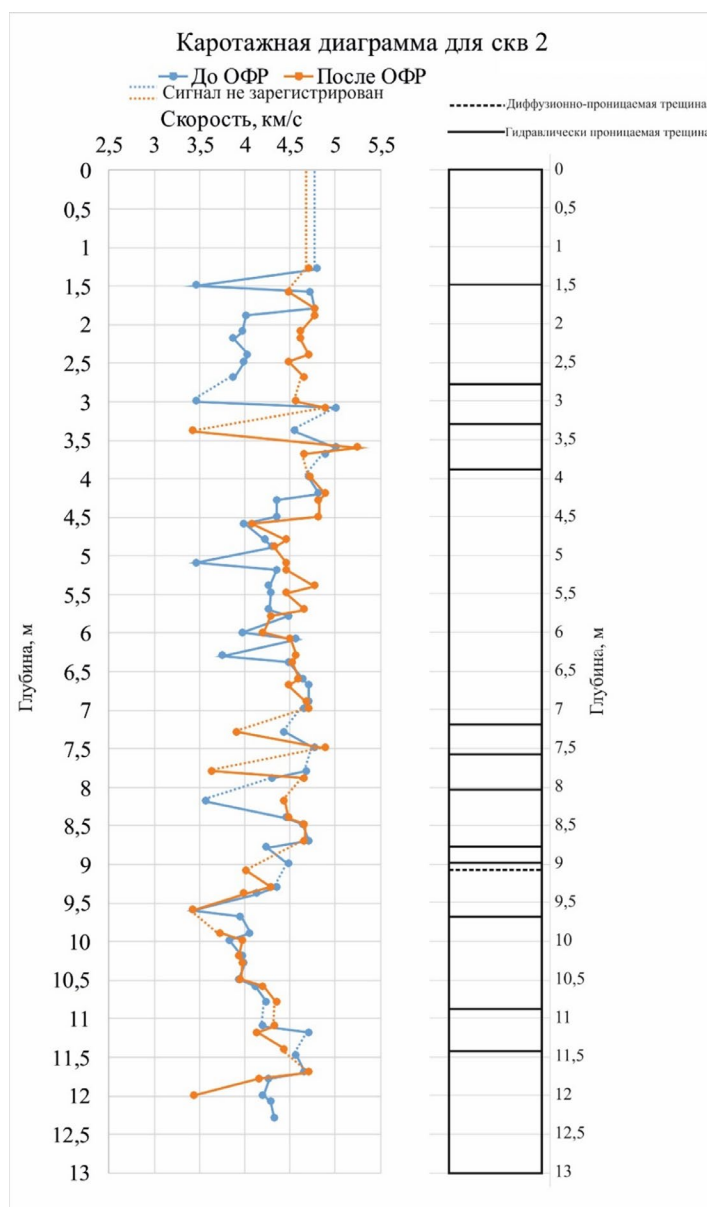


Рисунок 15 – Каротажная диаграмма для скважины

В ходе проведения опытно-фильтрационных работ и дальнейшей обработки их результатов были получены величины удельного водопоглощения по глубине скважины.

В ходе анализа результатов проведённых исследований были получены следующие результаты:

– В массиве были выделены зоны с различным напряжённо-деформированным состоянием: зона разгрузки, опорного давления и естественного состояния. Для каждой зоны были определены характерные скорости распространения упругих волн, а именно 3.9 км/с, 4.8 км/с и 4.3 км/с соответственно. Определена протяжённость каждой зоны, составившая 1,5 м, 1,2 м и далее соответственно;

– Было обследовано состояние контактной зоны между бетонной крепью и массивом. Установлено, что произошло отслоение крепи от массива с образованием водопроницающей зоны, выразившейся в невозможности установления постоянного давления на интервале с контактом крепи и массива в следствие обильного водопоглощения;

– На протяжении обследуемого интервала скважины были выделены отдельные трещины. При совместном анализе результатов каротажа и опытных нагнетаний удалось классифицировать каждую трещину по типу водопроницаемости на 2 группы: двенадцать гидравлически проницаемых и одна диффузионно-проницаемая трещина;

По результатам ультразвукового исследования образца керна, изъятых с интервала $9,1 \pm 0,1$ м, по определению граничного значения раскрытия трещины между гидравлическим и диффузионным типом водопроницаемости, представленных в главе 2, установлено, что данная трещина имеет граничное раскрытие до 150 мкм с шероховатостью поверхности трещины 17,5 мкм. Наличие данной трещины на этом интервале было подтверждено в ходе проведения видеокаротажа. Совокупные результаты ультразвукового каротажа, лабораторных исследований и опытных нагнетаний однозначно указывают, что данная трещина не вносит вклад в гидравлическую проницаемость данного интервала, по сравнению с соседними трещинами сверхкапиллярного раскрытия, вносящими основной вклад в проницаемость описываемого интервала.

По итогам исследований, представленных в данной главе, был разработан алгоритм проведения исследований в неводозаполненных скважинах с целью выделения в массиве трещин и определения типа их водопроницаемости. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 16.

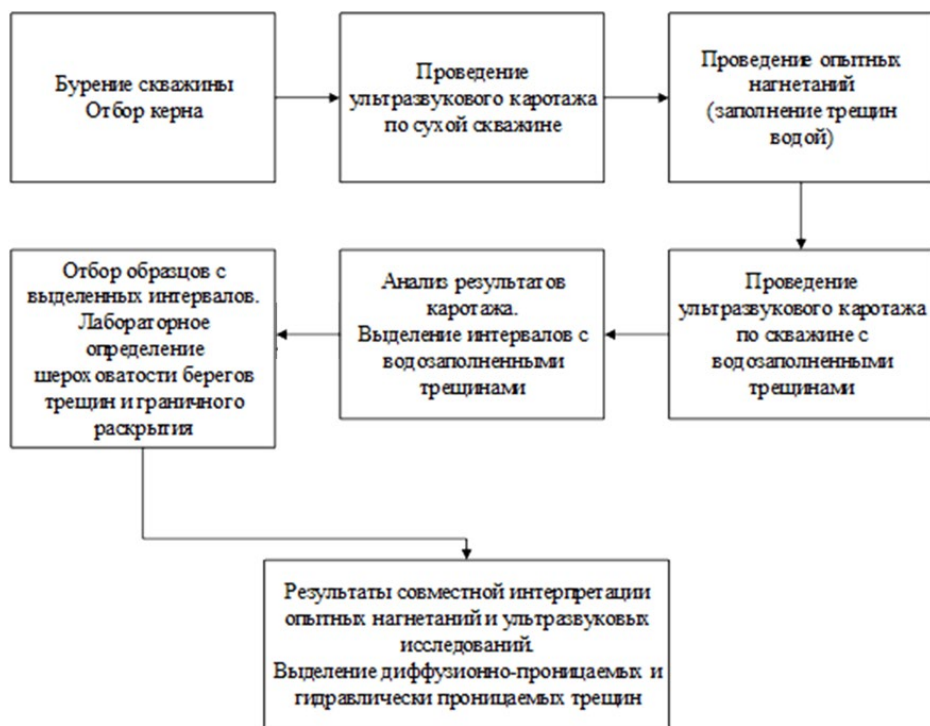


Рисунок 16 – Блок-схема алгоритма определения типа водопроводимости трещин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований изложено решение актуальной научной задачи определения типа водопроводимости единичных трещин в массиве горных пород, что имеет важное значение для обоснования безопасности объектов глубинного захоронения РАО.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1) Проведён анализ современного состояния методов описания и исследования трещин в массивах горных пород, а также определения типа их водопроводимости. Установлено, что существующие прямые и косвенные (геофизические) методы не позволяют определять тип водопроводимости отдельных трещин в массиве в силу особенностей применяемых методик исследования и оборудования;

2) Проанализированы теоретические предпосылки определения раскрытия отдельных трещин на основе определения изменений в характеристиках упругих волн после их прохождения через водозаполненную трещину при проведении ультразвуковых исследований. Установлено, что основными информативными параметрами могут быть амплитуда волны Рэлея, а также значения амплитуд в спектре первого вступления;

3) Исследовано влияние шероховатости поверхности водозаполненной трещины и

величины её раскрытия на параметры проходящей упругой волны. Установлена зависимость энергии первого вступления упругой волны от шероховатости поверхности трещины и величины её раскрытия. Выбрано и обосновано пороговое значение энергии первого вступления упругой волны, соответствующее качественному изменению типа водопроводимости трещины с диффузионного на гидравлический;

4) Установлено, что пороговое значение раскрытия трещины, при котором происходит качественное изменение типа водопроводимости с диффузионного на гидравлический, зависит от шероховатости поверхности трещины. Данная зависимость имеет вид: $b=6.8*Ra+33.5$ ($R^2=0.98$), где b – граничное раскрытие трещины, мкм; Ra – шероховатость, мкм;

5) Исследовано влияние единичной водозаполненной трещины на характеристики упругой волны при проведении ультразвукового каротажа в неводозаполненной скважине. Установлено, что при прохождении волны через водозаполненную трещину по сравнению с её отсутствием происходит падение амплитуды волны Рэлея не менее чем в 2,5 раза, а также падение в спектре первого вступления упругой волны амплитуд на частотах 80 кГц и 106 кГц не менее чем 2,8 раз и 2,5 раза соответственно;

6) Разработан ультразвуковой каротажный зонд, позволяющий проводить исследования в условиях неводозаполненных скважин. Применённые технические решения позволили обеспечить ввод в массив достаточного количества энергии для надёжного выделения единичных трещин различного раскрытия и типа водопроводимости;

7) По результатам полевых исследований было определено, что проведение ультразвукового каротажа, совмещённого с опытно-фильтрационными работами, позволяет выделять на водопроводящих интервалах единичные трещины, а также определять тип их водопроводимости. Лабораторные исследования образцов керна с выделенных интервалов нахождения трещин обеспечивают возможность определить максимально возможного раскрытия трещин диффузионного типа водопроводимости;

8) Разработан алгоритм проведения исследований в неводозаполненных скважинах с целью выделения в массиве трещин и определения типа их водопроводимости.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ, а также статьи, индексируемые

научнометрической базой Scopus:

1. Чумаков, А. А. Модульный ультразвуковой каротажный комплекс: конструкция и результаты измерений на физической модели скважины / А. А. Чумаков, П. В. Николенко, В. С. Гупало // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 3. – С. 119-129. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_119. – EDN PMARUC (Автору принадлежит: разработка конструкции зонда, изготовление физической модели, проведение и обработка результатов испытаний);

2. Чумаков А. А. Определение типа водопроводимости трещин в массиве скальных пород на основе ультразвуковых измерений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5 (специальный выпуск 7). – С. 3–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_7_3;

3. Чумаков А.А. Об особенностях прохождения упругих волн через водозаполненные трещины при различных величинах их раскрытия и шероховатости берегов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 2 (специальный выпуск 5). — С. 3–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_5_3;

4. Чумаков А. А. Численное моделирование ультразвукового каротажа водозаполненных трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 3 (специальный выпуск 8). — С. 3–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_8_3.

Статьи в прочих изданиях:

5. Гупало В. С., Печатников В. А., Шрамко И. В., Николенко П. В., Чумаков А. А., Неуважаев Г. Д. Отработка методов и оборудования, планируемых к применению в ходе выполнения исследований при проходке выработок подземной исследовательской лаборатории // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30). С. 88—97. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-88-97 (Автору принадлежит: проведение ультразвукового каротажа, обработка его результатов, совместная интерпретация результатов ультразвукового и видеокаротажа с результатами опытных нагнетаний);

6. А.А. Чумаков. Определение критерия классификации трещин по водопроводимости в массиве горных пород методом ультразвукового каротажа // Сборник тезисов XXIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, Москва, 22–23 апреля 2025 г. / под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова – М. : ИБРАЭ РАН, 2025. — 93 с.