

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

На правах рукописи

---

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

Диссертация  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук  
Гупало Владимир Сергеевич

Москва – 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Анализ, систематизация и обобщение существующих методов изучения трещин в массивах горных пород .....	9
1.1 Структурно-геологическая характеристика трещинных систем и зон повреждения массивов .....	9
1.2 Теоретические и методологические основы фильтрации и переноса в трещиноватых средах .....	11
1.2.1 Основы фильтрации в трещиноватых средах .....	12
1.2.2 Особенности прогноза движения жидкости в трещиноватых средах ....	14
1.3 Экспериментальные методы определения параметров трещиноватых сред	16
1.4 Ультразвуковые методы исследования трещиноватости .....	21
1.4.1 Лабораторные ультразвуковые методы исследования трещиноватости	21
1.4.2 Скважинные акустические методы исследования трещиноватости .....	26
1.5 Выводы .....	33
2 Исследование влияния шероховатости и раскрытия трещин на параметры упругих волн на основе изучения образцов пород .....	37
2.1 Подготовка образцов и проведение эксперимента .....	37
2.2 Исследование взаимосвязи особенностей распространения упругих волн и типа водопроницаемости .....	43
2.3 Исследование влияния единичной водонаполненной трещины на спектральные характеристики упругой волны .....	53
2.4 Выводы .....	63
3 Исследование влияния единичной водонаполненной трещины на параметры упругой волны на основе численного моделирования .....	64
3.1 Описание методики моделирования .....	64
3.2 Описание граничных условий .....	66
3.3 Результаты численного моделирования .....	68
3.4 Выводы .....	74

4	Создание скважинного акустического зонда и необходимых дополнительных технических устройств.....	76
4.1	Состав и назначение зонда.....	76
4.2	Акустические развязки.....	78
4.3	Ультразвуковые преобразователи.....	79
4.4	Система пневматического прижима преобразователей.....	82
4.5	Выводы.....	83
5	Исследование влияния единичной водозаполненной трещины на спектральные характеристики упругой волны в ходе физического моделирования.....	85
5.1	Разработка и создание физической модели скважины для проведения лабораторных исследований.....	87
5.2	Проведение лабораторных испытаний скважинного зонда на физической модели скважины.....	90
5.2.1	Описание процесса проведения.....	92
5.2.2	Результаты каротажа модельной скважины с различными заполнителями	95
5.3	Проведение физического моделирования с целью выделения водозаполненных трещин.....	103
5.4	Выводы.....	107
6	Проведение полевых исследований трещиноватых зон в окрестности горной выработки.....	108
6.1	Описание условий проведения исследований.....	108
6.2	Использованное исследовательское оборудование, диапазоны и состав регистрируемых параметров.....	110
6.3	Обработка полученных данных и результаты исследований.....	116
6.4	Выводы.....	121
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	137

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 водопроницаемости 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 водопроницаемости трещин в массиве горных пород.

**Идея работы** заключается в нахождении взаимосвязей параметров упругих волн и характеристик трещин, определяющих тип их водопроницаемости, и разработке оборудования для получения численных значений найденных параметров упругих волн в условиях неводонаполненных 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 водопроницаемости;

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 водопроницаемости;

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

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

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

6) Разработать порядок проведения исследований в неводонаполненных скважинах с целью определения типа водопроницаемости 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 отсутствие внешнего водопритока, и определено пороговое значение этой энергии, свидетельствующее об изменении типа водопроводимости с диффузионного на гидравлический;

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

3) Установлено, что критерием выделения водозаполненной 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 водопроводимости 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 водопроводящую трещину, при котором наблюдается переход типа водопроводимости трещины от диффузионной к гидравлической;
- установлении факта влияния шероховатости поверхности трещины на величину граничного раскрытия, при котором происходит изменение типа водопроводимости с диффузионно-проницаемой на гидравлически проницаемую;
- обосновании перечня информативных характеристик упругой волны, получаемых при проведении ультразвукового каротажа в неводозаполненной скважине, по которым можно судить о наличии единичной водозаполненной трещины в массиве горных пород.

**Методы исследований** включали анализ и обобщение литературных источников; экспериментальное исследование влияния раскрытия водопроводящей 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. Пецьку за моральную поддержку и ценные советы в ходе работы над диссертацией.

# **1 Анализ, систематизация и обобщение существующих методов изучения трещин в массивах горных пород**

Глубинное захоронение радиоактивных отходов предусматривает использование породного массива в качестве основного барьера на пути распространения радионуклидов. В мировой практике для создания таких объектов рассматриваются скальные и соляные породы, а также глины. В России для создания пункта глубинного захоронения высокоактивных отходов рассматриваются скальные породы. В таких породах присутствуют системы трещин, которые могут приводить к активному переносу подземных вод и выносу радионуклидов из области захоронения.

В ходе обоснования безопасности строительства в предполагаемом массиве горных пород для размещения ПГЗРО стоит задача проанализировать особенности геологических структур, обладающих неблагоприятными характеристиками для долговременной безопасности ПГЗРО. Такие характеристики преимущественно связаны с трещинной сетью, их гидравлической проницаемостью, а также изолирующих свойств блоков пород и разделяющих их разрывных нарушений. Это поднимает вопрос определения границ (критериев) отнесения блоков к «монолитным» и, следовательно, пригодным/непригодным для размещения упаковок с радиоактивными отходами.

## **1.1 Структурно-геологическая характеристика трещинных систем и зон повреждения массивов**

Трещиноватость горных пород является одной из важнейших структурных характеристик массива, существенно влияющей на его механические и фильтрационные свойства [1, 2]. Наличие системы трещин радикально снижает прочность и сплошность породы, предопределяя блочную структуру массива, а также создаёт пути для движения подземных вод [1, 2]. Поэтому структурно-геологические и гидрогеологические особенности горных пород во многом определяются геометрией и свойствами сетей трещин. Фундаментальные исследования 1970–1980-х гг. [1, 2] заложили основы описания трещиноватости, выделив ключевые параметры (плотность, раскрытие, ориентировка, заполнение трещин и др.) и показав их влияние на поведение скальных пород в инженерно-геологических условиях.

С позиций структурной геологии трещины рассматриваются как разрывы сплошности, отражающие действие тектонических напряжений и других геологических процессов. В учебниках по структурной геологии [3, 4] и классических работах по

«трещинной тектонике» [5] описаны закономерности формирования систем трещин под воздействием региональных полей напряжений и методы их структурного анализа. Тектонические трещины часто образуют системные семейства (ортогональные или косые сближенные системы), ориентированные в соответствии с главными осями напряжений, тогда как вблизи поверхности проявляются трещины разгрузки вследствие снятия давления [2]. Чернышёв [2] предложил теорию формирования сетей трещин и выявил геологические закономерности их размещения в различных породах. Как правило, сети тектонических трещин не приводят к полному расчленению массива на отдельные блоки (они прерываются и ограничены размерами породных тел), за исключением зон интенсивных разломов, где концентрация трещин значительно выше [2, 6]. Тем не менее даже умеренно трещиноватые породы требуют тщательного структурного анализа для выявления слабых плоскостей, контролирующей прочность и деформируемость массива. Развитие теоретических основ и методов изучения трещиноватости отражено и в более поздних обобщающих работах [7].

В области крупных разломов формируются зоны дробления с развитием рыхлых разрывных брекчий и глинистого материала в ядре разлома, окружённого ореолом повреждённой породы [6]. Аналогично вокруг подземных выработок возникает техногенная трещиноватость вследствие разгрузки и перераспределения напряжений [8]. Такие повреждённые зоны характеризуются повышенной плотностью трещин, изменённым напряжённым состоянием и, как правило, увеличенной фильтрацией; их необходимо учитывать при проектировании и анализе устойчивости подземных сооружений.

Разломные зоны могут состоять из одной трещины - поверхности смещения, или множественных, заполненных глиной или цементом трещин (брекчий) – зон дробления, где трещины разделяют линзы поврежденной породы.

От основной плоскости разлома могут отходить вторичные трещины. По обеим сторонам от ядра разлом содержит зоны повреждения, отделяющие его от невозмущенной горной породы. Зоны повреждений обычно характеризуются повышенной трещиноватостью, которая может меняться от микротрещин до трещин, вызванных сдвиговыми напряжениями и носящих следы катакластических деформаций.

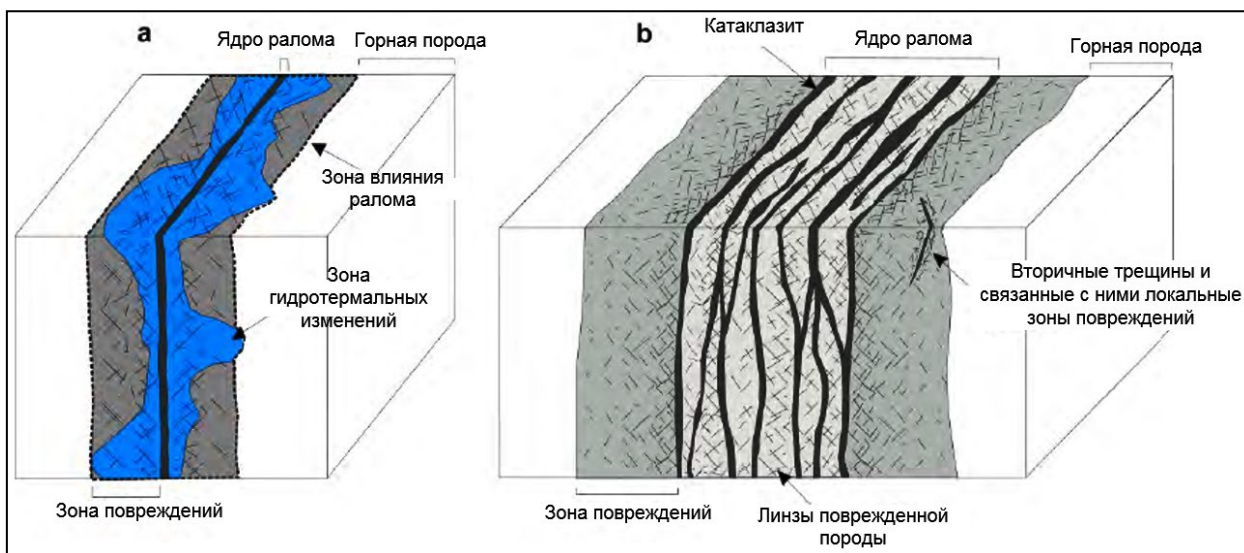


Рисунок 1.1 – Типичная структура разломной зоны в кристаллической породе: а – разлом с одним ядром и б – многоядерный разлом со связанными зонами повреждений

Понятие «зона повреждения массива» применяется как к природным, так и к техногенным сильнотрещиноватым участкам пород. Как отмечал Л. Мюллер [9], механика скальных массивов должна учитывать наличие дисконтинуитетов: сдвиг по трещинам может происходить уже при напряжениях, значительно меньших прочности цельного образца. В задачах устойчивости подземных выработок выявление зон интенсивно трещиноватых (ослабленных) пород критически важно, так как такие зоны служат очагами деформаций и обрушений. Трещиноватый массив обладает выраженной анизотропией и пониженным модулем деформации и прочностью по сравнению с монолитной породой [9]. Новейшие нормативные документы [10] прямо указывают на необходимость детального структурного изучения массива для обеспечения устойчивости горных сооружений, что подчёркивает практическую значимость структурно-геологического описания трещинных систем

## 1.2 Теоретические и методологические основы фильтрации и переноса в трещиноватых средах

Фильтрация жидкостей и перенос растворённых веществ, в т.ч. радионуклидов в трещиноватых горных породах являются ключевыми процессами в гидрогеологии и инженерной геологии. Особенность трещиноватых сред состоит в наличии системы трещин, которые создают преимущественные пути тока, резко отличающие такие среды от однородных пористых грунтов. Первые фундаментальные исследования в этой области относятся к середине XX века. Так, Г.М. Ломизе одним из первых провёл систематический

анализ фильтрации в трещиноватых породах [11]. В его классической работе показано, что наличие трещин радикально повышает проницаемость массива по сравнению с монолитной породой, что имеет большое значение при расчетах фильтрации для гидротехнических сооружений. Е.С. Ромм продолжил развитие этих идей, исследовав фильтрационные свойства трещиноватых горных пород и обобщив отечественный и зарубежный опыт к 1960-м годам [12]. Перечисленные работы заложили теоретическую базу описания двойственной природы фильтрации, как сочетание порового (межзернового) и трещинного пространства. За рубежом в работе Шедеггера [13] была сформирована общая теория потока в пористых средах, на при этом трещиноватые среды упоминались в ней лишь косвенно. Для проверки данных теорий на практике проводились полевые испытания, отражённые в работе [14]: ранние трассерные тесты в трещиноватых скальных породах выявили существование преимущественных каналов движения водных масс. Таким образом, уже к концу 1960-х была определена необходимость использования специальных методов описания фильтрации в трещиноватых средах.

### 1.2.1 Основы фильтрации в трещиноватых средах

В непористых магматических и метаморфических породах сеть открытых трещин обеспечивает основные каналы фильтрации в массиве [8, 15]. Эффективная пористость, проницаемость и направление фильтрации подземных вод зависят от степени раскрытости, взаимосвязанности и протяжённости трещин.

Специальное инженерно-геологическое рассмотрение трещиноватости массивов было выполнено в монографии М.В. Раца и С.Н. Чернышёва [1]. Авторы систематизировали морфологию трещин, их классификацию по генезису и геометрии, а также установили взаимосвязь трещинных параметров с прочностными и фильтрационными свойствами массива. Особое внимание уделено раскрытию трещин, которое на практике оказывается наиболее чувствительным параметром, определяющим водопроводящую способность. На основе анализа полевых материалов и инженерных наблюдений предложена классификация трещин по величине раскрытия, близкая к общепринятой порово-трещинной классификации:

- сверхкапиллярные трещины – с характерным раскрытием порядка десятых–сотых долей миллиметра и более, то есть свыше приблизительно 0,25 мм;
- капиллярные трещины – с раскрытием в интервале примерно от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  мм;
- субкапиллярные трещины – с раскрытием менее порядка  $10^{-4}$  мм [1].

Такое деление по величине раскрытия согласуется с физическими представлениями: в сверхкапиллярных трещинах фильтрация носит преимущественно адвективный характер, в капиллярных одновременно проявляются эффекты вязкого течения и капиллярных сил, тогда как субкапиллярные трещины практически не участвуют в переносе в качестве отдельных каналов и выполняют роль области диффузионного обмена и хранения флюида.

При этом значительная часть трещин на больших глубинах может быть залечена минеральными заполнителями или иметь минимальные ширины раскрытия, практически не проводящие воду [16]. Поэтому важно различать водопроницаемые (проницаемые) и неводопроницаемые (замкнутые, минерализованные) трещины при гидрогеологическом описании. В качестве модели фильтрации в трещиноватых средах применяются концепции двойной пористости и дискретных трещинных сетей, учитывающие сосуществование малопроницаемой матрицы породы и высокопроницаемых каналов в трещинах. Так, при изучении потенциальных хранилищ РАО проводятся испытания водоотдачи отдельных трещинных зон (например, опытные откачки или пакерные испытания в скважинах) и гидрогеологическое моделирование, отражающее анизотропию проницаемости массива [17]. Результаты исследований указывают, что сеть трещин обычно сообщает породному массиву существенную анизотропию фильтрационных свойств, приуроченную к преобладающим направлениям трещиноватости [16]. Полноценное гидрогеологическое описание трещинного массива включает также изучение режима подземных вод (пьезометрические уровни, давления), привязку наблюдаемых водопритоков к трещинным зонам и анализ гидрохимических особенностей вод [18]. Совмещение структурно-геологических и гидрогеологических данных особенно необходимо при прогнозе миграции загрязняющих веществ в геологической среде, что актуально для задач захоронения радиоактивных отходов [8].

В отличие от изотропных пористых сред, трещиноватые породы часто обладают направленной проницаемостью из-за преобладающей ориентации систем трещин. Первым количественным подтверждением этого стала работа D.T. Snow [19], показавшего, что система параллельных трещин придаёт среде анизотропный характер фильтрационных свойств. Он вывел соотношения для тензора гидропроводности, связывающие ориентацию и раскрытие трещин с эффективной проницаемостью в разных направлениях [19]. В дальнейшем методы определения анизотропии развивались, и уже в 1980-х появились полевые методики прямого измерения тензора гидропроводности. P.A. Hsieh и др. предложили подход для определения трёхмерного тензора фильтрационной проводимости *in-situ*, выполняя серии скважинных испытаний в различных направлениях [20]. На

практике это позволило экспериментально подтвердить, что массивы трещиноватых пород обладают выраженной анизотропией фильтрации, связанной с геометрией трещинных сетей [20].

Геологические исследования трещин также выявили корреляцию между структурой трещинной сети и её проницаемостью. В частности, X. Zhang и D. Sanderson проанализировали естественные трещинные системы и показали, что геометрическая анизотропия (например, наличие одного-двух предпочтительных семейств трещин) приводит к анизотропии порога перколяции и проницаемости массива [21]. То есть, при одинаковой трещинной пустотности проницаемость вдоль направления главной системы трещин значительно выше, чем в ортогональных направлениях [21]. Эти результаты подтвердили важность учёта структурной анизотропии при оценке фильтрационных свойств скальных массивов.

Помимо ориентации трещин, на эффективную водопроницаемость существенно влияют также и другие их параметры. R.W. Zimmerman с соавторами исследовали влияние контакта между неровными поверхностями трещин на их проницаемость [22]. Было показано, что площадь контакта между смыкающимися поверхностями снижает эффективную проницаемость трещины. Даже при небольшом сближении стенок гидравлический канал сужается, и фактический расход оказывается гораздо меньше, чем предсказывает идеализированный кубический закон [22]. Из этого был сделан вывод, что не только геометрия трещинной сети, но и микроструктура трещин (шероховатость, раскрытие) определяют фильтрационные свойства.

### 1.2.2 Особенности прогноза движения жидкости в трещиноватых средах

Прогноз фильтрации в трещиноватых средах эволюционировал от простых аналитических представлений к сложным численным моделям. Одним из подходов стала концепция двухсредной (двойной) пористости, в которой трещины и матрица породы рассматриваются как два сопряжённых континуума. Такие модели, изначально предложенные в 1960-х, позволяют описывать быстрый поток по трещинам и медленный обмен с поровым пространством матрицы. Их применение в гидрогеологии обосновано в ряде обзоров, например, в монографии Singhal и Gupta [23]. Однако двойная пористость оперирует усреднёнными параметрами и не учитывает явно геометрию трещинной сети.

Для установления связи между статистическими параметрами трещинной сети и эквивалентной проницаемостью были разработаны специальные методы. Классическим достижением стало решение M. Oda [24], предложившего вычислять тензор проницаемости

массива на основе ориентировки и плотности трещин. Метод М. Oda опирается на интегральные характеристики распределения трещин в объёме породы и позволяет получить компоненты тензора гидропроводности, не моделируя явно каждую трещину [24]. Это был первый шаг к аналитическому апскейлингу свойств – переходу от микроструктуры к макропараметрам. Впоследствии появились различные усовершенствования данного подхода. Например, предлагались алгоритмы расчёта полного тензора проницаемости для анизотропных трещинных сред с учётом параметров трещин [25, 26]. Кроме того, учитывались новые факторы, в своей работе J. He и соавторы включили в модели зависимость проницаемости трещин от напряжений, показав численно, как тензор проницаемости изменяется при изменениях напряжённого состояния массива горных пород [27].

Параллельно с аналитическими моделями, в 1990–2000 гг. широкое развитие получили численные методы моделирования на основе явного представления трещин. Модели *дискретных трещинных сетей* (Discrete Fracture Network, DFN) геометрически задают в расчетной области каждую трещину и напрямую рассчитывают фильтрацию по сетям трещин. T. Hadgu и коллеги выполнили сравнительный анализ DFN-модели и эквивалентной континуальной модели для потока и переноса радионуклидов вокруг геологического хранилища РАО [28]. Их результаты показали, что DFN-моделирование способно воспроизводить эффект канализации потока и быстрых путей миграции, которые сглаживаются в продолженном (континуальном) описании [28]. Однако DFN-модели требуют больших вычислительных затрат и детальных данных о трещинной сети.

Для преодоления разрыва между DFN и континуальными подходами применяется концепция представительного элементарного объёма (REV) – минимального объёма породы, внутри которого свойства (например, тензор проницаемости) можно считать усреднённо-постоянными. G. Rong и др. исследовали размер REV для трещиноватых пород и выявили, что при увеличении размера выборки проницаемость и её анизотропия стремятся к стационарным значениям [29]. Это позволяет обосновать применение континуального подхода: если область исследования существенно превышает REV, трещиноватый массив можно описывать с помощью эффективных параметров (как тензор проницаемости), полученных из детальных моделей или полевых данных.

Современные модели часто комбинируют подходы. Например, P.S. Lang, A. Paluszny и R.W. Zimmerman вычислили тензор проницаемости реального трёхмерного трещиноватого объёма породы и сравнили его с прогнозами, основанными на анализе двумерных карт трещин (трассеологических карт) [30]. Такое сравнение показало,

насколько точны упрощённые методы типа Ода при известных данных о трещинной сети, и где требуются явные 3D расчёты [30]. Другой подход предложен J.V. Pan и соавторами: они объединили модель трещинной сети с учётом проницаемости отдельных трещин для расчёта фильтрации и переноса [31]. С. Yao и др. исследовали эволюцию проницаемости при постепенном росте числа трещин, продемонстрировав, как появление новых трещин или раскрытие существующих ведёт к нелинейному увеличению проводимости массива [32]. Помимо детерминистических моделей, разрабатываются и статистические корреляционные модели. R. Liu с соавторы предложили модель, напрямую связывающую параметры плоской трещинной сети (плотность, длину трещин и др.) с эффективной проницаемостью [33]. Что позволило упростить оценку фильтрационных свойств в условиях дефицита данных, хотя это требует верификации при полевых исследованиях. Экспериментально показано, что под трёхосным сжатием и при изменении обводнённости массива проницаемость трещиноватых образцов меняется неравномерно по направлениям [34].

Таким образом при моделировании фильтрации и переноса важно учитывать проницаемость отдельных трещин и их раскрытие, а также площадь контакта между смыкающимися неровностями и их шероховатость.

### **1.3 Экспериментальные методы определения параметров трещиноватых сред**

Количественная оценка трещиноватости – одна из самых сложных задач инженерной геологии. Одним из первых методических трудов в этом направлении стало исследование Л.И. Нейштадта [35]. Он предложил подходы к измерению параметров трещиноватости (размер блоков, частота трещин) при изысканиях. Анализ характера и закономерностей трещиноватости скальных пород при инженерно-геологической съёмке местности выполнен, например, Н.С. Красиловой [36].

В дальнейшем акцент исследований делался на применение статистических методов обработки данных о трещинах [2] и на моделирование перехода от дискретной трещиноватой среды к эквивалентной сплошной (гидромеханические модели двойной пористости) [2]. Современные руководства [37, 38] регламентируют подробную методику изучения трещиноватости. Рекомендуют проводить полевые наблюдения (описание трещин в обнажениях и керне скважин) и камеральный анализ с использованием стереографических проекций и роз диаграмм для определения преобладающих направлений систем трещин. Применение этих методов позволяет выявить преобладающие

системы трещин и углы их падения. Важно отметить, что ещё М. В. Рац указывал на недостаточность какого-либо одного показателя (например, коэффициента пустотности трещин) для оценки водопроницаемости или устойчивости массива [1]. Для надёжной характеристики трещинного массива требуется комплекс показателей: частота и протяжённость трещин, их взаимосвязанность, ширина раскрытия, свойства заполнителя и т. д.

Для подтверждения теорий и калибровки моделей чрезвычайно важны экспериментальные исследования – как полевые, так и лабораторные. Основным параметр фильтрации – коэффициент фильтрации (гидропроводность) – в трещиноватых средах измеряется полевыми методами, прежде всего опытными откачками и притоками воды в скважинах. В 1980-е годы в СССР были разработаны нормативные документы, регламентирующие эти методы применительно к различным условиям. Руководство Гидропроекта (П-717-80) [39] и последовавшие Рекомендации Стройиздата (1986) [40] описывают методики опытной откачки для определения фильтрационных свойств водоносных пород, включая трещиноватые. В них приведены схемы расположения наблюдательных скважин, методы обработки кривых откачки и оценки анизотропии по разности радиусов влияния. В более новой редакции стандартов (ГОСТ 23278–2014 [41]) учтён накопленный опыт: регламентированы полевые испытания проницаемости как пористых, так и скальных грунтов, в том числе с использованием методики прессуризационных испытаний (леф-тестов) для скальных трещиноватых массивов [41].

Однако интерпретация результатов таких испытаний в трещиноватых средах не тривиальна. Нередко наблюдаются отклонения от классических теоретических кривых из-за влияния неоднородности и канализированного потока по трещинам. Поэтому в дополнение к откачкам применяются трассерные методы, позволяющие напрямую отследить путь движения воды. Классическим примером является двухскважинный трассерный тест в кристаллических породах, описанный Webster и др. [14]. В этом эксперименте краситель вводился в одну скважину и отбирался из другой; обнаружено быстрое появление трассера, что свидетельствовало о наличии прямых трещинных каналов между скважинами. Такие данные подтвердили, что в реальных трещиноватых массивах поток концентрируется по ограниченному числу проводящих трещин, а значительная часть породы обтекается потоком. Это стало важным аргументом в пользу использования сложных моделей вроде DFN при прогнозе переноса загрязнений.

Лабораторные исследования на образцах пород дополняют полевые данные, позволяя детально изучить влияние структуры пустотного пространства на проницаемость.

Ещё Г.М. Ломизе в 1950-х проводил лабораторные опыты по фильтрации через трещиноватые образцы, имитируя различную степень трещиноватости [11]. В наше время методы лабораторного моделирования ушли далеко вперед. Например, проводятся испытания горных пород в трёхосных камерах: образец с искусственно созданными трещинами нагружается со всех сторон, и измеряется фильтрация при различном давлении нагнетания. Исследование Y. Liu и соавт. с такими испытаниями на угольных образцах показало, что направленная проницаемость может существенно изменяться при изменении напряжений и насыщении: в сухом состоянии одна система трещин может доминировать, но при насыщении водой проницаемость по ней снижается сильнее, и общий характер анизотропии меняется [34]. Также выявлено, что с ростом общего эффективного напряжения проницаемость по всем направлениям падает, но неодинаково, в результате чего анизотропия может либо усилиться, либо ослабнуть в зависимости от конфигурации трещин [34].

Полевые наблюдения подтверждают зависимость фильтрационных параметров от геомеханических условий. D. Banks и др. проанализировали в скважинах Норвегии проницаемость скальных пород при различных напряжениях и выявили тренд снижения проводимости с глубиной (то есть при возрастании литостатического давления) [42]. Что свидетельствует о частичном закрытии трещин на больших глубинах и, как следствие, необходимости учитывать эффект, оказываемыми напряжениями, при оценке проводимости.

В.С. Жуков и В.В. Моторыгин исследовали роль межзерновой (поровой) и трещинной пустотности в общей проницаемости коллекторов [43]. Они показали, что даже при незначительной трещиноватости общий коэффициент фильтрации может возрастать на порядки по сравнению с монолитной породой за счёт высокой проводимости открытых трещин [43]. Межзерновая пористость при присутствии открытых трещин, наоборот, играет меньшую роль в фильтрационных процессах. Эти экспериментальные данные согласуются с теорией двойной пористости и подтверждают, что именно трещины определяют гидравлическую проницаемость скальных массивов.

### **Применение к хранилищам радиоактивных отходов**

При этом одной из важнейших областей применения теории фильтрации в трещиноватых средах является обоснование безопасности геологических захоронений радиоактивных отходов. В них именно трещины определяют возможные пути миграции радионуклидов. За последние десятилетия было выполнено множество исследований,

направленных на понимание и моделирование этих процессов. С.-F. Tsang, I. Neretnieks и Y. Tsang опубликовали обзор ключевых гидрогеологических проблем, связанных с захоронением радиоактивных отходов в трещиноватых породах [44]. Они отметили, что для надежного прогноза нужно учитывать широкий диапазон масштабов, от микротрещин в зоне повреждения вокруг выработок до региональных разломов, и связанные с этим явления, такие как: канализация потока, масштабная изменчивость проницаемости, диффузионный обмен с матрицей и др. [44]. Одной из главных трудностей является переход от точечных сведений (например, карт трещин в разведочных штольнях) к параметрам, пригодным для долгосрочного прогноза на масштабах всего захоронения. Здесь востребованы методы определения представительного тензора проницаемости и REV, а также стохастические подходы к генерации трещинных сетей.

Трещины представляют особую опасность с точки зрения нарушения изолирующих свойств массива, поскольку являются потенциальными каналами для выноса радионуклидов вместе с водными массами на поверхность. В зависимости от скорости движения водных масс по трещинам выделяют два основных типа миграции радионуклидов [45; 46]: **диффузионный тип**, при котором скорость потока воды минимальна, и движение радионуклидов происходит преимущественно за счёт молекулярной диффузии; **гидравлический тип**, характеризующийся тем, что скорость потока воды значительно преобладает над диффузионным движением радионуклидов. При этом механизм переноса радионуклидов по трещинам существенно влияет на скорость их возможного распространения и требует различных подходов к оценке рисков.

Разработанные научные методы прямо внедряются в моделирование безопасности хранилищ. Используются как детальные DFN-модели для локальных участков (около контейнеров с отходами), так и более грубые континуальные модели для масштаба всего полигона. В работе T. Nadgu и соавт. [28] рассмотрена дальняя зона влияния гипотетического хранилища в скальном массиве, проведены расчёты миграции радиоактивного трассера методом DFN и эквивалентной пористой среды, давшие сходные по порядку оценки распространения. Но были выявлены различия в чувствительности к отдельным высокопроводящим трещинам [28]. DFN-модель показала более неравномерное (кластеризованное) поле скоростей и концентраций, тогда как континуальная модель сгладила пиковые значения, требуя введения консервативных повышенных коэффициентов диффузии или дисперсии для учета неопределённостей.

Большой вклад в понимание переноса радионуклидов в трещинных средах для захоронений внесли I. Neretnieks и соавторы [44]. Ими показано, что медленная диффузия

в поровую матрицу вокруг трещин способна существенно задерживать распространение радионуклидов (так называемый эффект «медленной пленки» или *matrix diffusion*), что повышает иммобилизационный потенциал породы [44]. Однако при расчётах важно правильно задавать коэффициенты диффузии и адсорбции, что достигается сочетанием лабораторных экспериментов и натурных замеров на опытных участках. Современные концепции многоуровневого моделирования подразумевают, что детальные модели учитывают все выявленные механизмы (адвекция по трещинам, диффузия в матрицу, сорбция, затухание трещинной проводимости со временем из-за осадкообразования и др.), а их результаты передаются в крупномасштабные модели прогноза с помощью эффективных параметров.

В целом, исследования фильтрации и переноса в трещиноватых средах, развивающиеся на протяжении более 70 лет, достигли уровня, позволяющего с уверенностью учитывать эти явления в инженерной практике. Произошёл значительный логический прогресс: от первых осознаний влияния трещин на фильтрацию [11, 12] – к формированию теории анизотропии и методов её измерения [19, 20] – далее к разработке моделей разного уровня сложности [24, 30, 28] – и, наконец, к интеграции этих знаний в критически важные приложения, такие как безопасность хранилищ ОЯТ [44, 28]. Вклад ключевых авторов, таких как Г.М. Ломизе и Е.С. Ромм (фундаментальные основы), D.T. Snow (анализ анизотропии), R.W. Zimmerman (связь микроструктуры трещин с проницаемостью), M. Oda (моделирование тензора проницаемости), С.-F. Tsang и И. Неретникс (применение к ядерным хранилищам) и многих других, последовательно сформировал современное научное понимание трещиноватых коллекторов.

В крупных обзорах и методических трудах [47, 15] обоснованы научные принципы выбора площадок для глубинного захоронения РАО и подчёркнута необходимость комплексного изучения трещиноватости и гидрогеологии массива на завершающих этапах исследований. Международный опыт в области геологической изоляции отходов подтверждает ключевую роль таких исследований: значительные результаты получены при изучении гранитных массивов на опытных полигонах и в подземных лабораториях Швеции, Финляндии, Швейцарии (Stripa, Äspö, Olkiluoto, Grimsel), где детально охарактеризованы системы трещин, проницаемость и напряжённое состояние пород [8, 48]. В частности, в шведской лаборатории Äspö выполнен эксперимент Äspö Pillar Stability Experiment с детальным картированием трещиноватости и зон повреждения вокруг выработки [49, 50]. Сформирована международная кооперация по обмену знаниями о

захоронении РАО в кристаллических породах («Кристаллический клуб»), о чём свидетельствуют публикации [48].

В России аналогичные исследования выполняются на перспективном участке «Енисейский» в Нижнеканском гранито-гнейсовом массиве (Красноярский край) ; проведена комплексная оценка геологического строения, трещиноватости и современного состояния массива пород [51]. Серия работ [52, 16, 53, 18] освещает различные аспекты этого объекта: от структурно-геологического картирования трещинных зон и видеокаротажа скважин для определения ориентировок основных систем трещин [16] до изучения состояния пород при сооружении подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) [52, 53] и анализа гидродинамических и гидрохимических условий [18]. Комплексный подход к изучению массива «Енисейский» обеспечивает всестороннее описание трещинных систем и гидрогеологических параметров, необходимое для последующей оценки эффективности геологического барьера и прогноза миграции радионуклидов [51].

#### **1.4 Ультразвуковые методы исследования трещиноватости**

Традиционные методы изучения трещин (геологическое картирование, фильтрационные испытания, керновый анализ) часто локальны и трудоёмки. В этой связи всё более востребованы акустические методы, позволяющие в лабораторных и полевых условиях выявлять наличие и развитие трещин по изменениям скоростей и затухания упругих волн, а также регистрировать акустическую эмиссию от зарождения микротрещин. Ультразвук обладает высокой чувствительностью к структурным изменениям породы и способен непрерывно мониторить состояние образцов или массива. Ниже рассматриваются современные лабораторные и натурные ультразвуковые исследования трещин и трещинных систем.

##### **1.4.1 Лабораторные ультразвуковые методы исследования трещиноватости**

###### **1.4.1.1 Скорость и затухание ультразвуковых волн как индикаторы трещиноватости**

Присутствие пор и особенно трещин в породе существенно снижает скорость распространения ультразвуковых волн. Ещё в классических работах установлено, что скорость продольной волны в идеальном монолите определяется упругими свойствами минералов, тогда как поры и трещины замедляют прохождение волны. Жуков и Моторыгин провели специальные лабораторные исследования влияния двух типов пустотности –

межзерновой пористости и трещинной пустотности – на скорость ультразвука в горных породах [55]. Ими показано, что увеличение объёма трещин снижает скорость Р-волн значительно сильнее, чем равное по объёму увеличение межзерновых пор. Это связано с геометрией трещин: поры обычно близки к изометричной форме, тогда как трещины имеют крайне малую ширину раскрытия по сравнению с протяжённостью. Данное различие позволило авторам ввести показатель «добротность» – отношение измеренной скорости к расчётной в бездефектном монолите – и по нему отдельно оценивать вклад пористости и трещиноватости в уменьшение скорости. Таким образом, определяя ультразвуковую скорость, можно диагностировать степень трещиноватости породы.

Новейшие работы подтверждают высокую корреляцию между скоростью ультразвука, пористостью и прочностью пород. Например, Chen с коллегами выполнили обширные измерения на 165 образцах базальта и выявили статистически значимые эмпирические зависимости: с ростом пористости скорость продольных волн монотонно падает (коэффициент корреляции  $R \approx 0,84$ ), а прочность при сжатии UCS падает сходным образом ( $R \approx 0,78$ ). Напротив, высокопрочные образцы демонстрировали минимальную пористость и, как правило, повышенные скорости ультразвука. Более того, получена прямая линейная зависимость между скоростью Р-волн и пределом прочности UCS ( $R \approx 0,79$ ). На этой основе предложены уравнения для прогноза прочностных и упругих параметров (модуля Юнга, плотности и др.) по данным ультразвукового каротажа [54]. Практическая ценность таких корреляций состоит в возможности по данным скважинных акустических измерений оценивать прочность и косвенно проницаемость пород, минуя трудоёмкие отборы образцов.

Наряду со скоростью, коэффициент затухания (поглощения) упругих волн также чувствителен к дефектам. Распространяющаяся ультразвуковая волна теряет энергию как за счёт поглощения в материале, так и из-за рассеяния на неоднородностях, зернах и трещинах. Поэтому возрастание трещиноватости обычно проявляется усилением затухания. Уже в 2004 г. Аверин исследовал параметры затухания ультразвуковых сигналов при контроле состояния горных пород [56]. Установлено, что по мере накопления повреждений (микротрещин) амплитуда прошедших импульсов снижается, а затухание возрастает, причём характер этих изменений зависит от структуры породы и частоты зондирующего сигнала. Позднее Машинский [57] подробно изучил влияние амплитуды возбуждающего импульса на измеренную добротность в песчанике, как в сухом, так и в насыщенном водой состоянии. Он показал, что при разных уровнях амплитуды возбуждающего импульса результаты измерений затухания могут различаться. Это

указывает на наличие нелинейных эффектов. При более мощных ультразвуковых воздействиях в образце могут инициироваться дополнительные микроповреждения, повышая при этом затухание. Кроме того, обнаружены различия между затуханием продольных и поперечных волн. Затухание S-волн, как правило, сильнее реагирует на наличие трещин. Также подтверждено, что водонасыщение породы снижает рассеяние на сухих микротрещинах, т.к. заполненные водой трещины меньше контрастны для упругой волны, поэтому эффективное затухание продольных волн уменьшается, тогда как в сухом состоянии трещины дают больший вклад в рассеяние энергии волны.

Наконец, новейшие эксперименты *прямо связали изменение затухания с процессом зарождения трещин*. Широле с соавторами измеряли скорость и затухание продольных волн и контролировали поле деформаций на поверхности нагружаемых образцов с помощью цифровой корреляции изображений (DIC). Показано, что начало интенсивного роста микротрещин под нагрузкой явно проявляется в росте коэффициента затухания [58]. Иными словами, по увеличению затухания можно диагностировать стадию накопления растяжимых (открывающихся) микротрещин в хрупкой породе. Вплоть до определённого порога нагрузки затухание оставалось почти постоянным, но при приближении к прочностному пределу – когда зарождаются и раскрываются трещинки – оно резко возрастало. Этот закономерный рост аттенуации при накоплении повреждений предложено использовать как индикатор предразрушения наряду с традиционными критериями [58]. В целом, измерения скорости и затухания ультразвука в сочетании дают ценную информацию: скорость отражает общее упругое ослабление породы из-за пустот, а затухание чувствительно к появлению и развитию трещин, особенно в динамике нагружения.

Если в объёме отсутствуют дефекты, регистрируется сильный прямой сигнал; с появлением трещины амплитуда прошедшей волны падает, а во времени может появляться задержка или дополнительные фазы от дифрагированных волн. На этом основана работа Туронтаева с коллегами [59], которые наблюдали динамику роста гидравлической трещины в лабораторных условиях методом ультразвукового просвечивания. В образец из горной породы нагнетали жидкость до разрыва, а с противоположных сторон были установлены пьезоизлучатель и приёмник. Установлено, что амплитуда прошедшей ультразвуковой волны заметно уменьшается по мере распространения трещины гидроразрыва – вплоть до полного исчезновения сигнала, когда трещина пересекает образец насквозь. По изменению времени пробега ультразвука определяли также изменение эффективной скорости, что позволило косвенно оценить длину трещины во времени (аналог томографического

подхода) [59]. Таким образом, ультразвук дал динамическую картину зарождения и роста трещины, недоступную обычным методом вскрытия образца после испытания.

#### 1.4.1.2 Ультразвуковая интерферометрия и повышение чувствительности контроля

При небольших изменениях напряжённого состояния или зарождении микротрещин слабо меняются прямые показатели – время пробега первой волны, средняя скорость. Для улавливания едва заметных эффектов активно внедряются интерферометрические методы обработки сигналов, в частности анализ кода-волн. Ультразвуковая интерферометрия по хвостовой части сигнала (множественно рассеянными волнами) позволяет выявлять микроскопические изменения структуры породы, недоступные традиционным замерам времени пробега. Так, Николенко и Зайцев выполнили серию лабораторных экспериментов с ультразвуком на цилиндрических образцах горных пород, подвергнутых нагрузке до 20 МПа и последующему гидроразрыву для создания сквозной трещины [60]. В ненарушенном образце увеличение осевого давления от 0 до 20 МПа почти не отразилось на скорости продольной волны. Однако после создания горизонтальной трещины в образце при приложении давления наблюдалась чёткая зависимость. Скорость продольных волн возрастала по мере увеличения нагрузки, что обусловлено постепенным смыканием раскрытых трещин. Однако при частичном закрытии единственной трещины скорость растёт незначительно. Для того чтобы уловить и количественно оценить эти малые изменения, авторы применили алгоритм интерферометрии на кодовых волнах. Суть метода заключается в корреляционном сопоставлении множественно рассеянных волн (кода-сигнала) до и после изменения образца, с высокоточным определением сдвига фаз/времен прихода. В результате авторам удалось существенно повысить чувствительность ультразвукового контроля к изменению напряжения. Интерферометрический анализ показал заметное различие кода-волн в нагруженном и разгруженном состоянии даже для однородного образца без трещин. А при наличии трещины чувствительность возрастает многократно. В работе [60] подчёркивается, что такой подход с использованием кода-волн способен фиксировать минимальные эволюционные изменения в горном массиве, обеспечивая мониторинг зарождения трещиноватости задолго до её проявления в изменении обычных акустических параметров. Вклад авторов заключается в экспериментальном обосновании метода для горных пород и демонстрации его эффективности при контроле как целостных, так и трещиноватых образцов.

Отметим, что развитие интерферометрических подходов в геоакустике опирается на фундаментальные исследования В. Л. Шкуратника, изложенные им в курсе «Горная геофизика. Ультразвуковые методы» [61] и учебном пособии [62]. Ещё ранее В.С. Ямщиков в классическом труде «Введение в геоакустику» [63] описал принципы распространения упругих волн в блоково-трещиноватых средах, заложив теоретические основы, которые современные методы (включая интерферометрию) используют для интерпретации наблюдаемых эффектов.

#### 1.4.1.3 Акустическая эмиссия в исследовании разрушения пород

Акустическая эмиссия (АЭ) – это упругие импульсы, излучаемые материалом при зарождении и росте трещин. Регистрация АЭ широко используется для мониторинга процесса разрушения хрупких материалов, в том числе горных пород. Вклад Д. Локнера [64] стал поворотным в понимании роли акустической эмиссии в механике горных пород. В обзорной работе 1993 г. Локнер обобщил, что каждое микротрещинообразование сопровождается всплеском АЭ-событий, а суммарная сейсмическая активность материала служит «акустическим барометром» его повреждённости. Он показал, что акустическая эмиссия позволяет отслеживать эволюцию трещинных систем во времени, выявляя этапы зарождения трещин (редкие низкоэнергетичные события), стадию интенсивного роста (резкое учащение АЭ-событий с повышением их энергии) и нечто вроде «форшоков» перед разрушением, когда крупные разломы излучают мощные сигналы незадолго до обвала. Тем самым было доказано, что АЭ-мониторинг может служить эффективным средством прогноза динамического разрушения горных пород в лаборатории и шахтных условиях.

Современные исследования развивают методику АЭ и совмещают её с другими измерениями для детального анализа механизма разрушения. Например, Штанциц и соавторы выполнили серию лабораторных экспериментов по гидроразрыву в цилиндрических образцах, оснащённых сетью АЭ-датчиков и измерителями объёмной деформации [65]. Они зарегистрировали сигналы акустической эмиссии в момент инициации появления гидравлической трещины: непосредственно перед началом разрыва наблюдался рост гидроактивности (числа АЭ-импульсов), а по их локации удалось пространственно привязать место зарождения трещины [65]. Одновременно датчики объёмных деформаций фиксировали изменение радиального расширения образца. Сопоставление данных показало, что момент возникновения главной трещины соответствует пику АЭ-активности и скачку деформации – тем самым АЭ надёжно указывает на начало разрушения. В дальнейшем Штанциц с коллегами выполнили

гидроразрыв неоднородных образцов породы (с включениями, прослоями) при контроле АЭ [66]. Они обнаружили, что геологическая неоднородность существенно влияет на характер распространения гидроразрыва: АЭ-события группировались в зонах вокруг твёрдых включений, где трещина отклонялась или временно задерживалась, и их спектральные характеристики отличались от АЭ в однородном случае. Кроме того, авторами показано, что АЭ-мониторинг позволяет выявить зарождение побочных («вторичных») микротрещин вдали от основной трещины гидроразрыва, вызванных неравномерным распределением напряжений [66]. Эти результаты имеют большое значение для понимания динамики гидроразрыва пласта и контроля сейсмоактивности при инженерных работах.

В отечественной практике акустическая эмиссия также давно применяется для целей геоконтроля. Ещё работы 1970–80-х гг. предпринимали попытки использовать АЭ в шахтных условиях: так, в диссертации В.П. Негурицы [67] предложена аппаратура для регистрации АЭ и ультразвуковых параметров вокруг выработок, а Д.Н. Сирота [68] развивал методы геоакустического контроля в условиях интенсивных помех (шум оборудования, взрывные работы). Современные российские исследования продолжают эту линию. К примеру, Зенченко Е.В. с соавторами реализовали совместный акустический и деформационный мониторинг роста трещины гидроразрыва в лабораторном эксперименте [69]. Применялось одновременное слежение за АЭ (пассивная акустика) и за деформациями/смещениями горной породы (активная оптическая съёмка или тензометры). Благодаря этому удалось детально проследить динамику роста трещины во времени: от зарождения, через стадию устойчивого распространения, до остановки разрыва при разгрузке. Акустические сигналы подтвердили прерывистый характер разрастания трещины – серия циклов «затухание АЭ — новый всплеск при следующем росте трещины» – и позволили оценить скорость фронта разрыва. Вклад этих работ [69, 65, 66] состоит в экспериментальном подтверждении высокой информативности АЭ для определения фаз развития трещин и взаимодействия трещины с неоднородностями, что важно для прогнозирования проницаемости трещинных коллекторов при их нагружении.

#### 1.4.2 Скважинные акустические методы исследования трещиноватости

##### 1.4.2.1 Традиционные акустические методы каротажа для оценки трещиноватости

Классический акустический каротаж (измерение скоростей продольных и поперечных волн) давно стал стандартным элементом геофизических исследований скважин [70, 71]. Ещё в 1960-х годах были предприняты первые попытки увязать аномалии

каротажных диаграмм с развитием трещинных систем в пласте. Так, в работе Pirson и соавт. [72] предложены подходы к картированию развития трещин на основе данных скважинных геофизических измерений.

В 1970 годах появились исследования, посвящённые трещиноватым коллекторам. Век и др. [73] проанализировали каротажные диаграммы трещиноватых карбонатных пластов в Южном Техасе для оценки их коллекторских свойств, а Aguilera [74] продемонстрировал, что комплексный анализ логов в сочетании с материальным балансом может объяснить аномальное поведение нефтеносных пластов с естественной трещиноватостью. Эти работы показали, что зоны пониженных скоростей и аномальные акустические эффекты на диаграммах часто указывают на наличие открытых трещин и повышенную проницаемость. В более поздних исследованиях Л.Д. Гик [75] развил методические основы интерпретации акустического каротажа с целью количественной оценки параметров трещиноватости и пористости. В частности, был предложен метод определения параметров трещинных систем (среднего раскрытия и плотности) на основе измерения скоростей и затухания упругих волн в породах по данным волнового акустического каротажа.

Развитие аппаратной составляющей волнового акустического каротажа позволило регистрировать полный волновой фронт и выделять в нём различные типы волн: продольные (P), поперечные (S) и Стоунли (St). Открытые трещины сильно влияют на затухание и скорость волны Стоунли, а наличие ориентированных систем трещин приводит к анизотропии скоростей поперечных волн. Появление технологии кросс-дипольного акустического каротажа дало возможность определять разность скоростей ортогонально поляризованных поперечных волн, по которой судят об ориентации трещиноватости и направлениях напряжений в массиве. В отечественной практике примером современной аппаратуры такого класса является комплекс АВАК-11 [76]. Указанный прибор предназначен для исследования открытого и обсаженного ствола скважин, путём регистрации параметров распространения основных типов упругих волн [76]. В нём реализовано возбуждение колебаний на разных частотах и с разными базами, что позволяет уверенно разделять и измерять скорости всех волн в различных горно-геологических условиях [76].

Акустические методы каротажа применяются не только в нефтегазовых, но и в горнорудных и гидрогеологических скважинах. В работах российских специалистов показана эффективность акустического каротажа для решения задач разработки твердых полезных ископаемых. Еникеев В.Н. и соавт. [77] продемонстрировали применение

скважинных акустических методов для оценки состояния трещиноватого массива при отработке рудных месторождений. Перелыгин с коллегами [78] провели обзор аппаратурно-методических комплексов для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин, где также были использованы акустические приборы, применяемые для выявления каверн и трещин в различных средах. Таким образом, традиционный акустический каротаж зарекомендовал себя как универсальное средство распознавания трещинных зон по непрямым признакам: аномалиям скоростей, сдвигу частотного спектра и другим изменениям волновых сигналов. Однако в силу своих методических особенностей и специфики оборудования на настоящий момент акустический каротаж не позволяет проводить исследование единичных трещин.

#### 1.4.2.2 Корреляционные методы ультразвукового контроля

Для оценки трещиноватости пород *in-situ* перспективны корреляционные методы, анализирующие сходство сигналов на разных трактах или в разное время. Предложен и реализован ультразвуковой корреляционный метод структурной диагностики массива [79, 80]. В отличие от классического импульсного метода (когда измеряется время пробега или амплитуда прямого сигнала), корреляционный подход основывается на возбуждении в среде широкополосного шумоподобного сигнала и регистрации откликов двумя приёмниками. Коэффициент взаимной корреляции между сигналами, пришедшими к двум разнесённым приёмникам, используется в качестве информативного показателя структуры среды. Если среда однородна, то формы сигналов на обоих приёмниках близки и корреляция высокая; наличие же неоднородностей (трещин, прослоев) между приёмниками и изменяет форму сигнала, снижая коэффициент корреляции.

Натурные испытания показали, что применение шумового сигнала с последующей корреляционной обработкой позволяет надёжнее разделять пласты и выявлять ослабленные зоны в породах кровли, по сравнению с традиционным акустическим каротажем. В.Л. Шкуратник с соавторами отметили, что обычные импульсные измерения времени/скорости в скважине не позволяли уверенно распознать границы между слоями кровли, так как изменения скорости были сопоставимы с погрешностью приборов.

В продолжение этой работы исследовались и другие аспекты корреляционного метода. В лабораторных условиях изучено изменение корреляционных характеристик акустического шума при одноосном нагружении образцов [81]. Показано, что с ростом напряжения и появлением микротрещин в образце корреляционная функция меняется, что можно использовать для контроля напряжённо-деформированного состояния массива.

Кормнов и соавторы разработали приёмники/излучатели новой конструкции и способы их установки, минимизирующие влияние контактного слоя [81]. Благодаря этому повышена воспроизводимость измерений и помехоустойчивость корреляционного каротажа, что важно для применения в реальных полевых условиях (например, при вибрациях и шуме шахтного оборудования). Вклад группы Шкуратника–Николенко–Кормнова [79, 80, 81, 82] заключается в создании научных основ этого метода, его аппаратурной реализации и демонстрации преимуществ на практике (как лабораторной, так и полевой). Ими было экспериментально установлено, что корреляционные характеристики существенно зависят от наличия трещин. Введение единственной горизонтальной трещины в физическую модель кровли выработки приводило к отчётливому уменьшению взаимокорреляции приёмных сигналов. Однако этот метод не позволяет описывать параметры единичной трещины, таких как раскрытие, при наличии в её окрестностях других трещин.

Che и Qiao [83] теоретически изучили акустическое поле, создаваемое линейной фазированной решёткой излучателей в заполненной жидкостью скважине. Результаты моделирования показали, что управление фазой и амплитудой излучения позволяет фокусировать упругие волны и сканировать околоскважинное пространство без механического вращения прибора [83].

Повышение точности и достоверности данных за счёт учета помеховых факторов является другим важным направлением исследований. В.Л. Шкуратник [84] указал, что контактные условия между протектором пьезопреобразователей и горной породой могут существенно влиять на результаты ультразвукового контроля. Неплотное прилегание, неоднородный акустический контакт, наличие бурового раствора способствует появлению шумов и искажений в сигналах [84]. Для решения этой проблемы были предложены как конструктивные меры (улучшенная конструкция акустических головок, применение компенсаторов), так и алгоритмические (фильтрация и коррекция сигналов). Кормнов А.А. с коллегами [85] развивали эту тему, предложив способы минимизации влияния контактных условий при реализации ультразвукового корреляционного метода контроля. Их исследования показывают, что использование скоррелированных шумовых сигналов и специальная обработка позволяют выделять отражения от трещин даже при наличии помех от нестабильного контакта прибора со стенкой [85].

Наконец, в своей монографии Wang H., Toksöz M., Fehler M. провели обобщение современных знаний в области скважинной акустики [86]. В ней была подробно изложена теория и практика акустического каротажа. Были отражены актуальные методы обработки полного волнового поля, оценки трещиноватости по анизотропии скоростей, а также

принципы работы новейших ультразвуковых имиджеров. Подобные фундаментальные труды показывают, что к началу 2020-х годов скважинные ультразвуковые и акустические методы достигли высокой степени зрелости: существует стройная теория распространения волн в трещиноватых средах, математические алгоритмы для инверсии параметров трещин по каротажным данным, и большой парк технических средств для практической реализации этих методов.

#### 1.4.2.3 Ультразвуковые скважинные системы визуализации трещин

Кардинальный шаг вперёд в изучении трещиноватости связан с появлением методов прямой визуализации стенок скважин с помощью ультразвука. В 1969 году Zemanek и коллеги разработали концепцию Borehole Televierer – скважинного телевьюера, основанного на вращающемся ультразвуковом преобразователе [87]. Этот прибор сканировал стенки скважины ультразвуковым лучом и регистрировал отраженный сигнал, формируя круговую акустическую изображение (имидж) стенки. На таком изображении трещины проявляются напрямую – в виде характерных синусоидальных линий, соответствующих пересечению плоскостей трещин с цилиндрической поверхностью скважины [87]. Появление скважинного телевьюера позволило определять ориентацию (азимут и угол падения) каждой трещины, видеть ее протяженность по окружности ствола, что было практически невозможно при интерпретации только по скоростным кривым. В последующие годы данная технология совершенствовалась: появились цифровые телеметрические системы с более высоким разрешением и чувствительностью. Так, Dudley [88] в 1993 г. представил методику количественной идентификации трещин по данным телеавтографа: было показано, как по ультразвуковому изображению можно подсчитывать количество трещин, измерять их раскрытие, но при этом из-за обследования только поверхности скважины, измеряется раскрытие части трещины пересекающей контур скважины, которая не всегда соответствует раскрытию трещины в массиве, т.к. при бурении происходят сколы на берегах трещины, и видимое раскрытие увеличивается.

Ультразвуковые сканеры также применялись для решения специальных задач. К примеру, Davidson и соавт. [89] предложили использовать данные ультразвукового отражения от стенок для оценки скорости звука в породе. Их метод основывался на анализе времён прихода отражённых сигналов: зная радиус скважины (калипер) и скорость ультразвука в скважинной жидкости, из запаздывания эхо-сигнала можно оценить акустические свойства горных пород вокруг ствола [89]. Такая техника расширяет функциональность телесканеров, сочетая визуализацию с измерением параметров среды.

Кроме того, с развитием телеметрии стало возможным применять имиджеры для геомеханического анализа. Влияние поля напряжений на трещиноватость было продемонстрировано в работе Barton и др. [90], где данные изображений стенок скважин использовались для восстановления полного тензора напряжений. По ориентации естественных трещин и индукции новых трещин/разрушений на стенке (breakout) можно судить о направлении максимального сжимающего напряжения и связать это с анизотропией проницаемости пласта [90].

В России развитие скважинной ультразвуковой визуализации шло параллельно с зарубежным. Ещё в 1980-е годы были созданы первые отечественные акустические телевизоры (серии САТ – скважинный акустический телетактор). Современным продолжением этой линии стал акустический сканер САС-90, разработанный НПФ «Геофизика» и внедрённый в 2010-х годах [91]. Прибор САС-90 работает на принципе высокочастотного (ультразвукового) отражения и обеспечивает круговой обзор стенки в открытом стволе. По сути, он является развитием серии более ранних имиджеров (САТ-1, САТ-2, САТ-4М, САС-60), но на новой элементной базе и с улучшенным программно-методическим обеспечением [91]. В работе Терехова О.В. и др. [91] подчёркивается, что по качеству получаемого изображения отечественный САС-90 не уступает зарубежным аналогам (таким как Ultrasonic Borehole Imager USI от Schlumberger).

Отдельно следует упомянуть методы оптической визуализации ствола скважины. Оптические скважинные телекамеры (телевьюеры) позволяют исследовать трещины непосредственно, однако требуют прозрачной среды (очищенной воды) и хорошего освещения. Сравнительный анализ акустического и оптического имиджеров приведён в работе Williams и Johnson [92], в которой проводились исследования трещиноватых водоносных пород. Ими было показано, что акустический сканер позволяет эффективно выявлять даже мелкие трещины и неоднородности в мутной жидкости, тогда как оптический прибор даёт детальное изображение трещин при чистой воде. Таким образом, оба подхода являются взаимно дополняющими. В некоторых современных работах предпринимаются попытки совместить эти подходы. Например, Wang и соавт. [93] представили комбинированный фото-акустический метод измерений в скважинах, использованный для выявления слабых прослоев в массиве (на примере оползневого склона). Сочетание одновременного оптического сканирования и акустического зондирования позволило повысить надёжность обнаружения зон развитой трещиноватости и ослабленных интервалов [93].

Однако стандартный телесканер регистрирует лишь отражения от стенки скважины, т.е. дает изображение трещин, выходящих непосредственно на стенку ствола. Ультразвуковой же корреляционный каротаж, описанный выше, позволяет выйти за пределы стенки и заглянуть в прилегающий массив на расстояние порядка метра, выявляя *скрытые трещины и нарушенные зоны* вблизи ствола выработки [80]. Тем не менее, прямое ультразвуковое сканирование стенок весьма информативно: телевизионный скважинный метод признан МСРМ (Международным обществом по механике горных пород) в качестве стандартного для наблюдения за трещинами в кернах и скважинах. Например, Li с соавторами описали цифровой оптический скважинный телевьювер, фиксирующий изображение стенок и позволяющий картировать каждую пересекающую скважину трещину с точностью до миллиметров [94], чего недостаточно для получения данных с целью оценки проводимости трещин на границах капиллярного и сверхкапиллярного раскрытия.

В работе Николенко и Зайцева [82] обсуждаются перспективы комплексирования акустических и оптических измерений для повышения надёжности геоконтроля. Авторы указывают, что одновременное применение ультразвуковых методов (для заглядывания вглубь массива) и оптического сканирования (для фиксации трещин на доступной поверхности или в скважине) позволит значительно улучшить распознавание опасных зон в массиве [82].

Примером успешного сочетания оптических и ультразвуковых методов служит работа Широле с коллегами [95]. Они применили цифровую корреляцию изображений (DIC) для наблюдения за микротрещинами на поверхности образца и ультразвуковое отражение/пропускание для контроля внутренних повреждений. В ходе испытания цельного образца регистрировались снимки его поверхности (для вычисления полей деформаций методом DIC) и периодически запускались ультразвуковые импульсы, сканируя образец. Появление мельчайших трещин сначала фиксировалось DIC как локальные концентрации деформаций на поверхности. Затем, по мере развития повреждений, ультразвуковые отражённые сигналы начали улавливать зоны повреждения внутри образца, «подсвечивая» невидимые глазу внутренние трещины [95]. В итоге комбинация методов позволила однозначно установить время и место образования основных повреждений: оптический метод видел их начало на поверхности, а ультразвуковой – продолжение трещины в глубине, что дало целостную трёхмерную картину разрушения.

Помимо визуализации, были также описаны комплексные исследования трещиноватости скважинными методами. Stumm и др. [96] применили расширенный набор геофизических методов (акустический телеотражатель, электрический каротаж, тепловой потокометр и др.) для детального оконтуривания водопритоков через трещины вдоль выработки в скальных породах. Орехов А.Н. и Аmani М.М. [97] провели обзор возможностей геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов, отметив, что именно данные каротажа (акустического и визуального) часто являются ключевыми для обнаружения и количественной оценки трещин до проведения гидродинамических испытаний. Сковородников И.Г. и соавт. [98] предложили методику оценки степени трещиноватости скальных массивов по данным комплекса геофизических исследований скважин, при этом показав, что совмещение результатов акустического каротажа с другими методами позволяет получить интегральную характеристику нарушенных трещинами массива пород. Эти примеры подтверждают, что наиболее достоверная картина трещиноватости достигается при комплексировании различных скважинных методов, где ультразвуковые играют ведущую роль. Однако это не подходит для обоснования безопасности массива с целью размещения в нём ПГЗРО, т.к. специфика такого объекта требует исследования отдельных трещин. Так как именно отдельные трещины являются возможными путями миграции радионуклидов.

## **1.5 Выводы**

Анализ современных отечественных и зарубежных исследований, посвящённых теоретическому, экспериментальному и прикладному изучению трещиноватых горных пород, позволяет сформировать целостное представление о механизмах формирования трещинной структуры, её влиянии на гидрогеологические и волновые свойства массива, о ключевых закономерностях фильтрации, а также переноса радионуклидов в трещиноватых средах.

Установлено, что трещиноватые породы представляют собой принципиально многомасштабную и структурно неоднородную систему, в которой параметры трещин – раскрытие, протяжённость, ориентация, плотность и состояние контакта стенок – определяют фильтрационные и механические свойства массива в намного большей степени, чем матричная пористость. Традиционно используемая классификация раскрытий трещин в работах Раца и Чернышёва [1] служит фундаментальной основой для выделения капиллярных, субкапиллярных и сверхкапиллярных трещин, определяющих

соответствующие режимы переноса и водопроницаемости: адвективный (гидравлический), диффузионный и смешанный.

Прослеживая эволюцию методов исследования трещиноватости скважин, можно отметить переход от простых акустических каротажных подходов к высокотехнологичным ультразвуковым сканерам и интегрированным системам. Если первые работы 1960–1970-х гг. [72, 73, 74] лишь указывали на проявления трещин в косвенных аномалиях логов, то современные технологии позволяют видеть трещины непосредственно и количественно оценивать их параметры [91, 87, 88]. Ключевой вклад в развитие области внесли как зарубежные исследователи (создание Borehole Televiewer [87], использование имиджеров для анализа напряжений [90], введение новых методов интерпретации [74, 88]), так и отечественные ученые и инженеры (разработка аппаратуры САС-90 [91], АВАК-11 [76], методик интерпретации [98, 75]). На сегодняшний день арсенал скважинных геофизических средств позволяет решать широкий круг задач: от детального картирования трещинного пространства в стенках скважин до прогнозирования фильтрационных свойств трещиноватых коллекторов [97, 93]. Дальнейшее развитие методов идёт по пути повышения разрешающей способности (фазированные решётки [83], объединения разных физических принципов для комплексного контроля (например, одновременное акустическое и оптическое профилирование [92, 93]).

Ультразвуковые методы зарекомендовали себя как мощный инструмент исследования трещиноватости и проницаемости горных пород. Лабораторные эксперименты позволяют установить фундаментальные зависимости. Трещины сильнее пор влияют на изменение скоростей упругих волн [55], скорость тесно связана с пористостью и прочностью, что даёт возможность прогноза прочностных свойств по акустическим данным [54]. Рост микроповреждений вызывает увеличение затухания [58, 64].

Полевые исследования на основе ультразвука позволяют выявлять скрытые трещины и ослабленные зоны в массиве, производить мониторинг изменения их состояния под действием техногенных нагрузок. Совокупность результатов, рассмотренных в обзоре, подтверждает, что ультразвуковые методы обладают высокой информативностью и оперативностью для оценки трещиноватости и косвенно проницаемости горных пород, обеспечивая надёжный мониторинг как в лаборатории, так и непосредственно в полевых условиях. Однако в контексте целей изучения массива горных пород для прогноза возможной миграции радионуклидов с целью обоснования безопасности пунктов

глубинного захоронения радиоактивных отходов возможностей методов и оборудования недостаточно.

Акустические методы рассчитаны на интегральное исследование трещинных систем, но не единичных трещин, а оптические и акустические телевьюеры позволяют проводить характеристику отдельных трещин, но в силу своих особенностей исследуют только поверхность скважины, подверженную сильному влиянию технологии бурения и различного рода экзогенным процессам, которые искажают некоторые параметры трещин, например, раскрытие, наиважнейшее свойство для оценки их водопроницаемости.

Таким образом, анализ проведённого литературного обзора позволяет сделать ряд обобщённых выводов. Прежде всего, 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. Развитие теоретических представлений привело к формированию многоуровневых подходов к моделированию фильтрации и переноса – от эквивалентных континуальных моделей до дискретных сетей трещин, позволяющих учитывать анизотропию и неоднородность массива. Показана необходимость комплексного структурно-геологического и гидрогеологического описания, включая разграничение водопроницаемых и неактивных трещин.

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 водопроницаемости трещин в массиве горных пород.

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

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

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

## **2 Исследование влияния шероховатости и раскрытия трещин на параметры упругих волн на основе изучения образцов пород**

### **2.1 Подготовка образцов и проведение эксперимента**

Исходя из информации, представленной в первой главе, в окрестностях разрывных нарушений и в относительно монолитном массиве горных пород могут присутствовать трещины различной водопроницаемости. Водопроницающие свойства трещин в наибольшей степени определяются их раскрытием. При этом по степени раскрытия их можно разделить на капиллярные, имеющие среднее раскрытие  $10^{-3}$ - $10^{-7}$  м, и сверхкапиллярные. При проведении ультразвуковых исследований массива, а именно ультразвукового каротажа, упругие колебания при прохождении через открытые трещины затухают в следствие отражения от границы раздела двух сред массив-воздух из-за значительной разницы в их акустической плотности, что может приводить к невозможности регистрации сигнала. Однако в случае малого раскрытия в следствие капиллярного эффекта вода способна на длительное время задерживаться в трещине, тем самым уменьшается контрастность акустических плотностей на пути прохождения упругой волны, что делает возможным регистрацию сигнала при проведении ультразвукового каротажа и дальнейший его анализ. С целью определения границы раскрытия трещины были проведены лабораторные исследования.

В связи с результатами работы R. W. Zimmerman и соавторов [22], в которой они исследовали влияние контакта между неровными стенками трещин на их проводимость, на проводимость существенно влияют свойства самих трещин, и показавшими, что площадь контакта между смыкающимися неровностями снижает проницаемость трещины: даже при небольшом сближении стенок гидравлический канал сужается, но при фактический расход снижается ещё быстрее. Поэтому в план проведения лабораторных исследований было включено определение шероховатости поверхностей трещины.

Для определения границы раскрытия трещины, при котором происходит изменение типа водопроницаемости, была изготовлена лабораторная установка, позволяющая фиксировать две части одного образца и обеспечивать движение одной из его частей с заданным шагом 25-50 мкм [99]. Также для измерений раскрытия трещины на стенде закреплён деформометр часового типа. Фотография изготовленной установки представлена на рисунке 2.1. Ультразвуковые преобразователи крепились посредством этиленвинилацетатного клея.

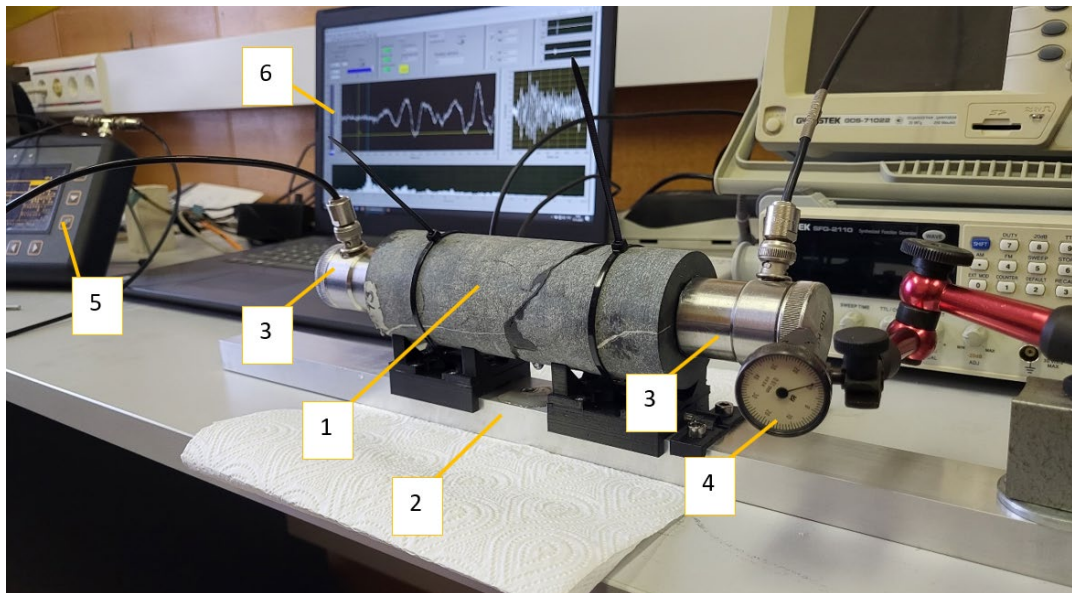


Рисунок 2.1 – Лабораторная установка: 1 – образец; 2 – станина; 3 – ультразвуковые преобразователи; 4 – часовой датчик перемещения; 5 – дефектоскоп; 6 – управляющий компьютер

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 представляли собой два фрагмента керна горной породы (Гнейс) диаметром 60 мм и длиной 200 мм. Также в план проведения лабораторных исследований было включено определение шероховатости поверхностей трещины. Один из образцов имел природную трещину, второй был предварительно распилен на две равные части для проведения прозвучивания при разной шероховатости трещины (Рисунок 2.2). Торцы образцов были предварительно подготовлены для соосного закрепления на них акустических преобразователей.



Рисунок 2.2 – Распиленный керн

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;
- 5) Повторялись шаги 3 и 4.

В таблице 2.1 представлены результаты определения шероховатости поверхностей трещины после их обработки различными типами шарошек. Определялись два показателя шероховатости:  $R_z$  – это параметр оценки шероховатости поверхности, представляющий собой сумму высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля;  $R_a$  – это 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. Пример полученного в ходе измерения шероховатости профиля показан на рисунке 2.3.

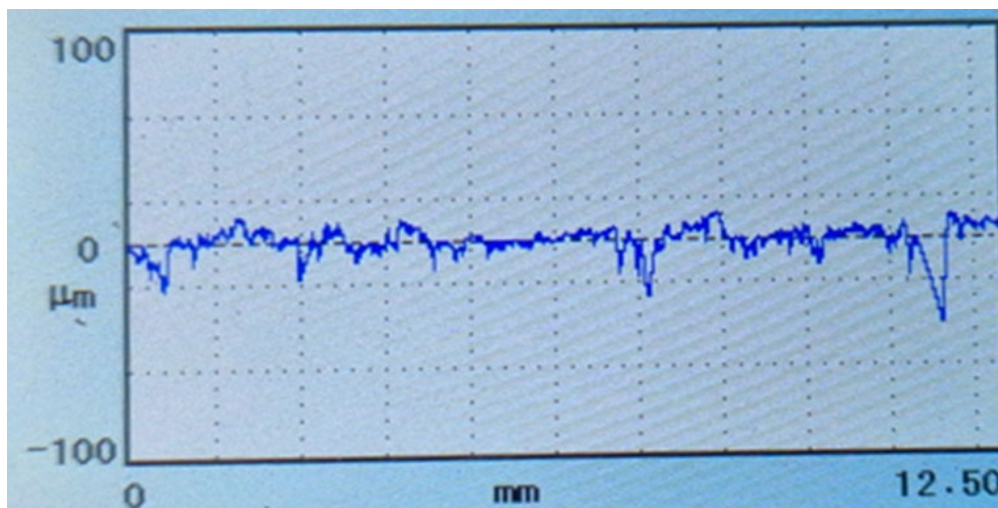


Рисунок 2.3 – Пример измеренного профиля

Таблица 2.1 – 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
<b>Среднее значение</b>	<b>26,6</b>	<b>3,6</b>	<b>Среднее значение</b>	<b>38,5</b>	<b>6,2</b>
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
<b>Среднее значение</b>	<b>62,6</b>	<b>10,4</b>	<b>Среднее значение</b>	<b>70,9</b>	<b>12,5</b>

Результаты определения шероховатости поверхности для образца с естественной трещиной представлены в таблице 2.2. 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 2.2 – 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
<b>Среднее значение</b>	<b>101,8</b>	<b>17,5</b>

Зарегистрированные волновые фронты для различных типов образцов показаны на рисунках 2.4–2.8.

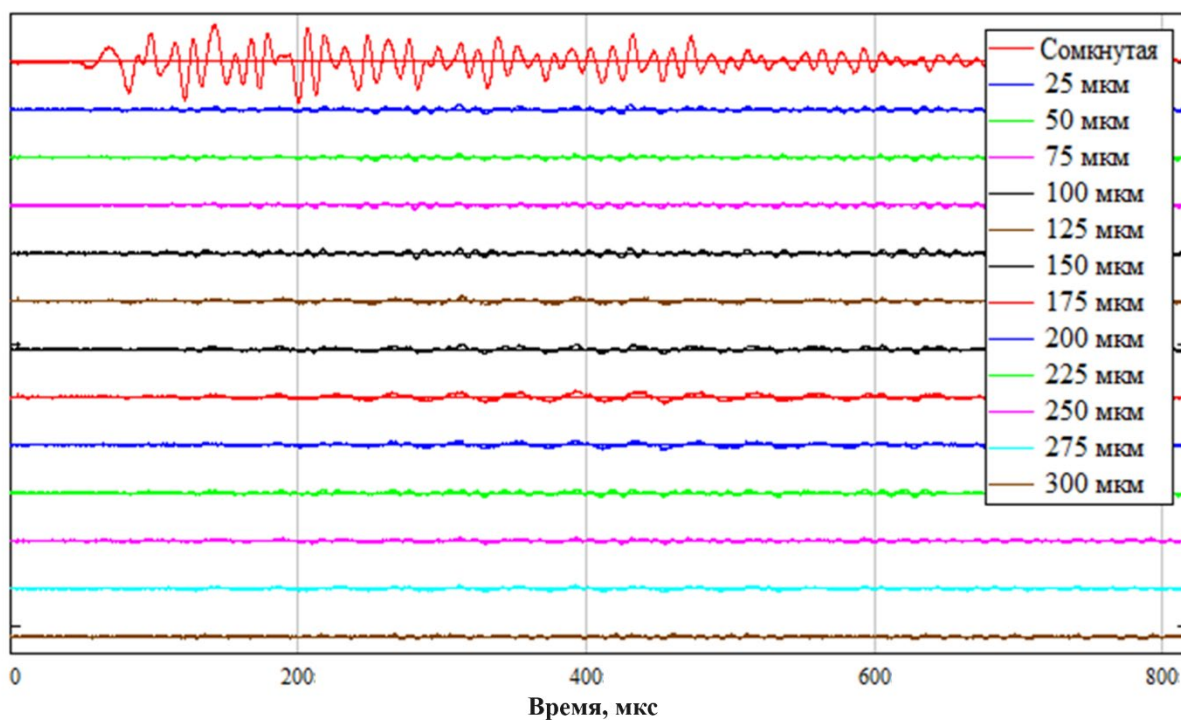


Рисунок 2.4 – Зарегистрированные волновые формы для различных значений раскрытия трещины для образца после распила до обработки абразивным инструментом

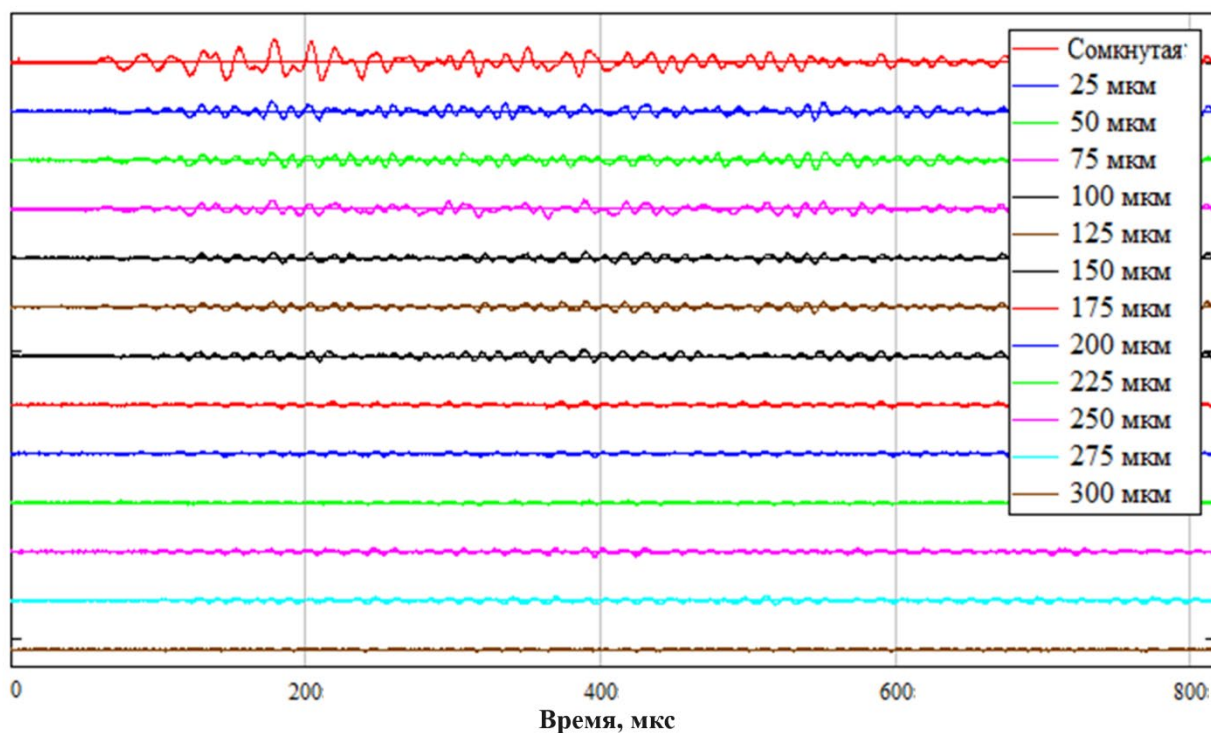


Рисунок 2.5 – Зарегистрированные волновые формы для различных значений раскрытия трещины для образца после обработки абразивным инструментом с размером зерна 5-10 мкм

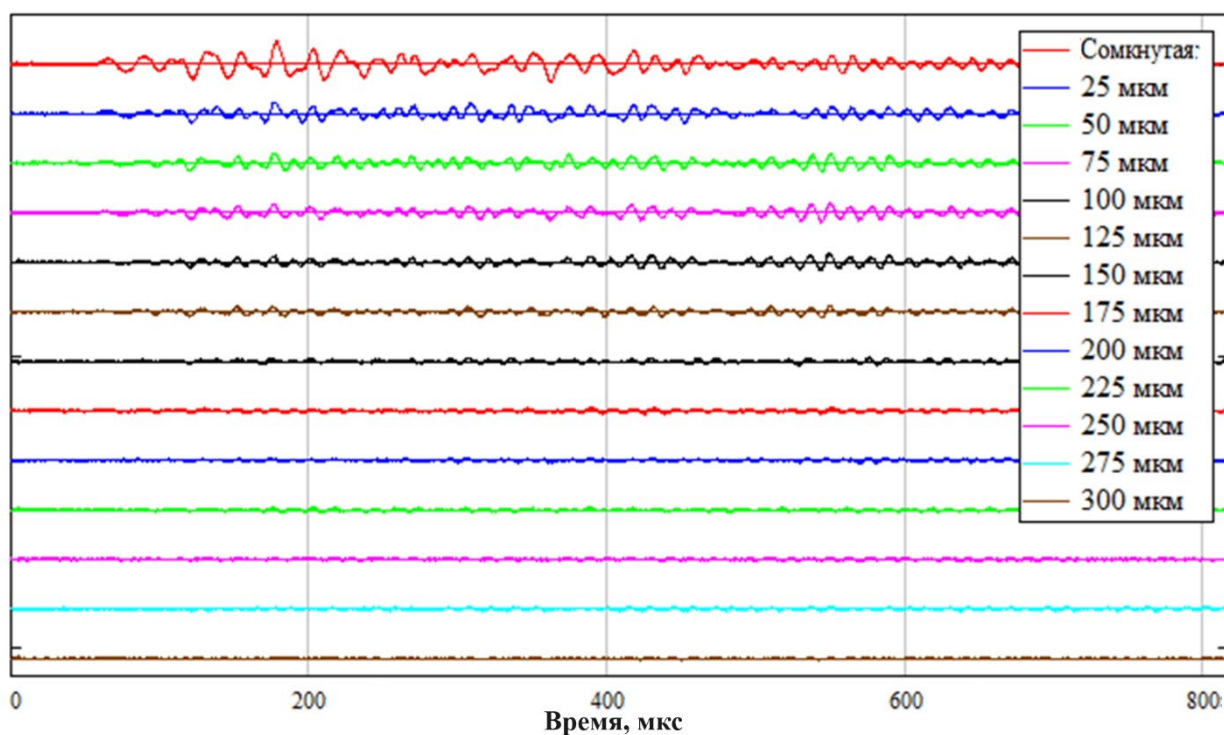


Рисунок 2.6 – Зарегистрированные волновые формы для различных значений раскрытия трещины для образца после обработки абразивным инструментом с размером зерна 20-30 мкм

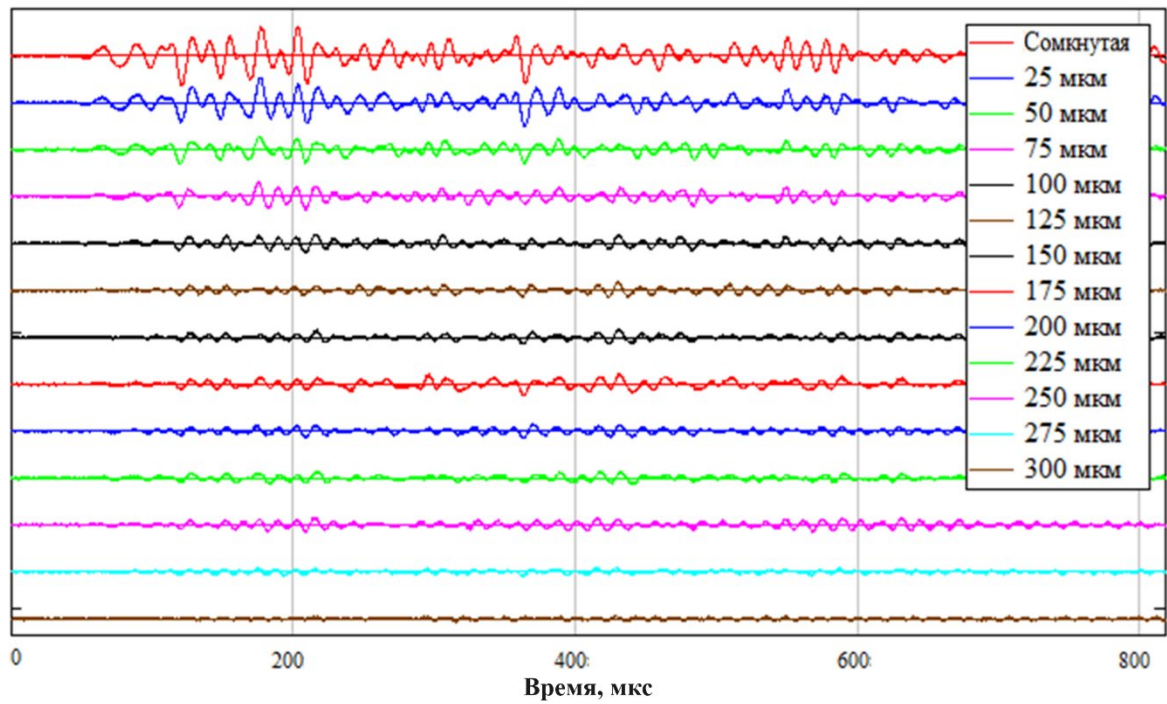


Рисунок 2.7 – Зарегистрированные волновые формы для различных значений раскрытия трещины для образца после обработки абразивным инструментом с размером зерна 40-50 мкм

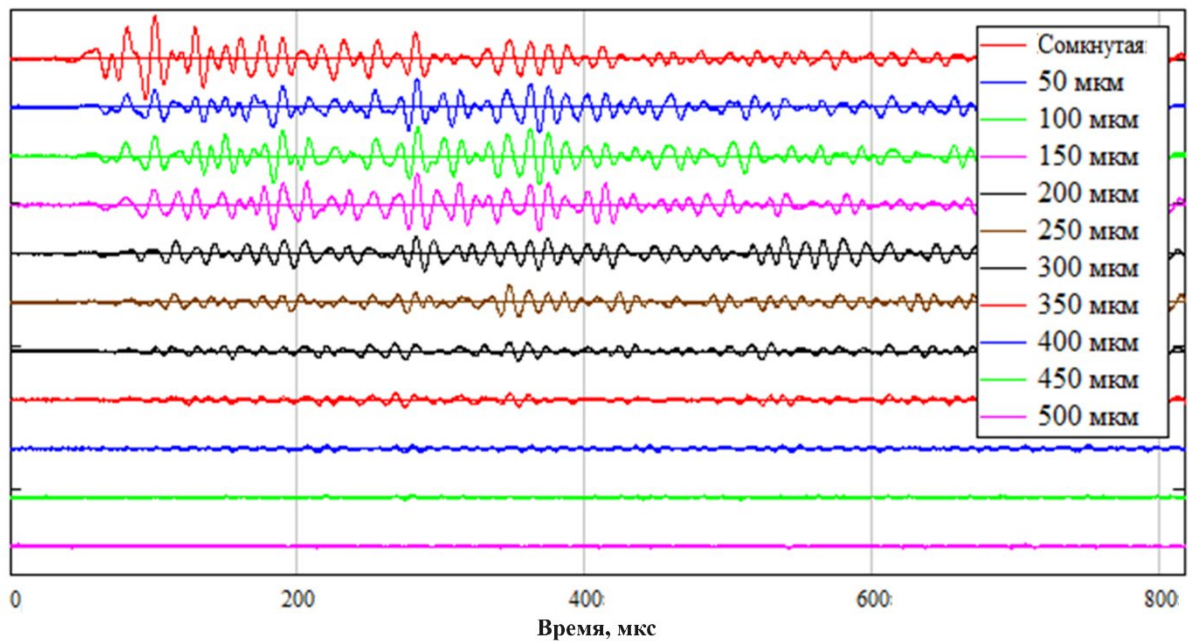


Рисунок 2.8 – Зарегистрированные волновые формы для различных значений раскрытия естественной трещины

## 2.2 Исследование взаимосвязи особенностей распространения упругих волн и типа водопроницаемости

Для оценки взаимосвязи особенностей распространения упругих волн и типа водопроницаемости был применён метод анализа изменения энергии в головной части сигнала, содержащей первое вступление (Рисунок 2.9), что позволило проследить динамику затухания сигнала при прохождении через трещину с различной величиной раскрытия. Для анализа использовались волновые формы (Рисунки 2.4–2.8), приведённых в подразделе 2.1.

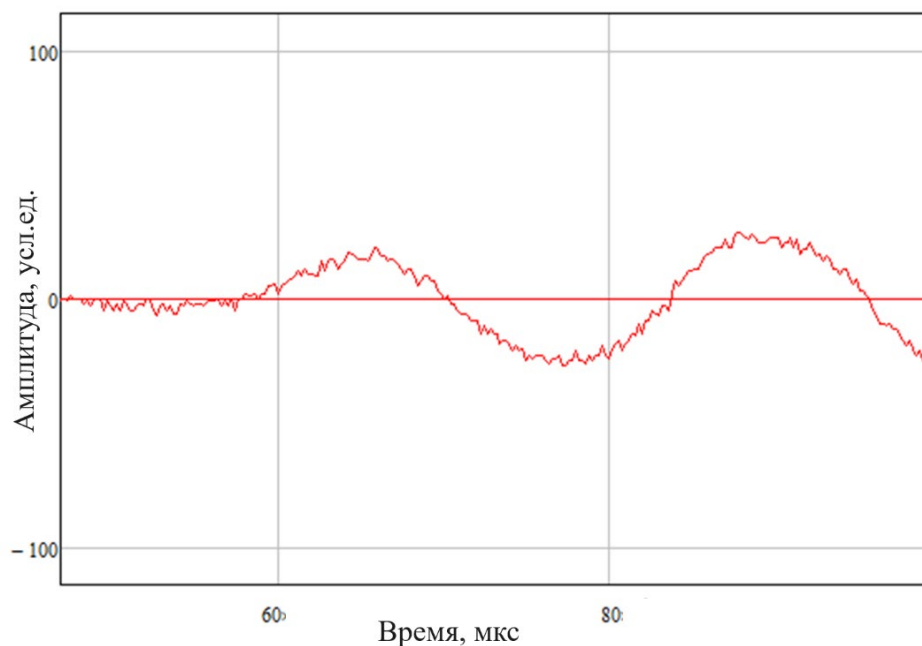


Рисунок 2.9 – Пример зарегистрированного первого вступления упругой волны

По результатам расчёта энергии первого вступления и рассмотрения влияния раскрытия трещины и шероховатости её поверхностей на энергию сигнала построены графики зависимости энергии от раскрытия для различных шероховатостей поверхности (Рисунки 2.10–2.14).

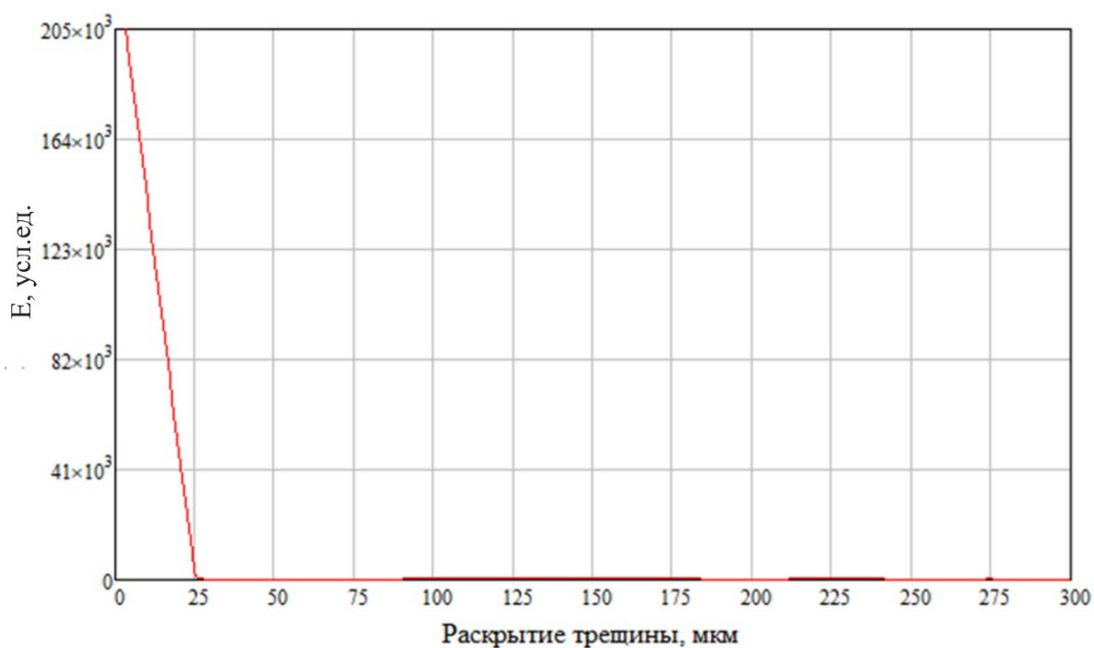


Рисунок 2.10 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образца после распила ( $Ra = 3,6$  мкм)

Из графика видно, что максимальная энергия в части сигнала с первым вступлением волны значительно снижается при увеличении раскрытия до 25 мкм и далее не изменяется. Это однозначно свидетельствует от неспособности воды задержаться в границах трещины при раскрытии 25 мкм и более, а следовательно граничное раскрытие менее 25 мкм.

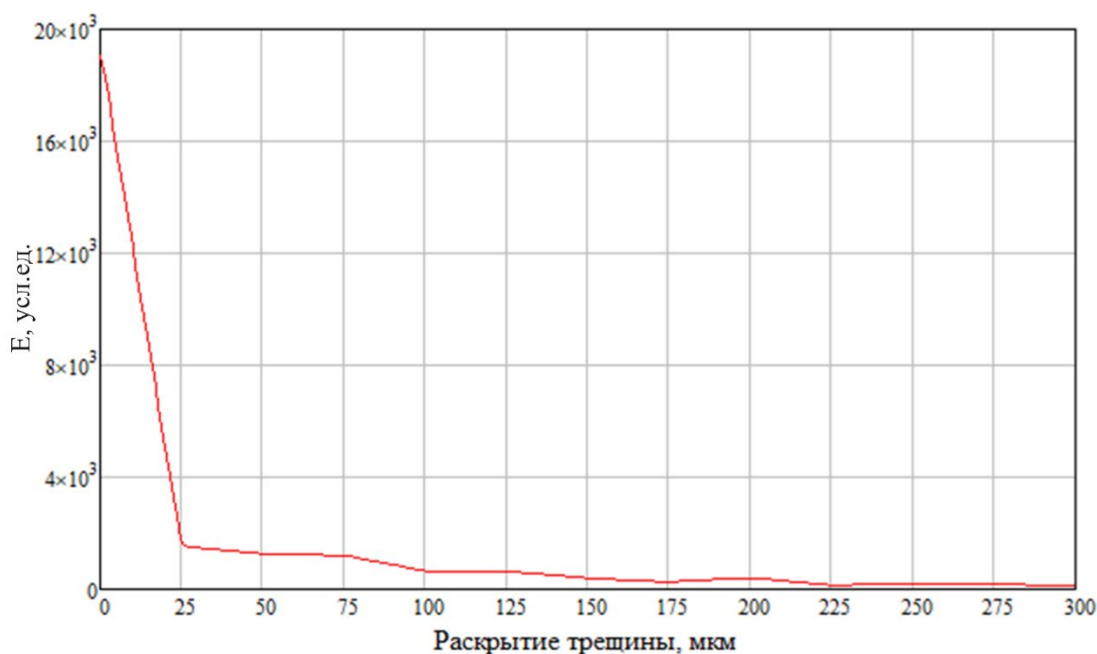


Рисунок 2.11 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образца после обработки шарошкой с мелким зерном ( $Ra = 6,2$  мкм)

Из рисунка видно, что при увеличении раскрытия от 0 до 25 мкм происходит значительное падение энергии в следствие прохождения упругой волны через воду и отражения значительной части энергии на границах раздела двух сред, однако затем при раскрытиях от 25 мкм до 75 мкм энергия не изменяется, что говорит о том, что при данных раскрытиях площадь контакта воды и поверхностей образца не изменяется. При раскрытиях более 75 мкм происходит дальнейшее снижение энергии вследствие уменьшения количества воды в трещине и соответствующего изменения площади контакта её с торцами образца. Это говорит о том, что граничным раскрытием является 75 мкм.

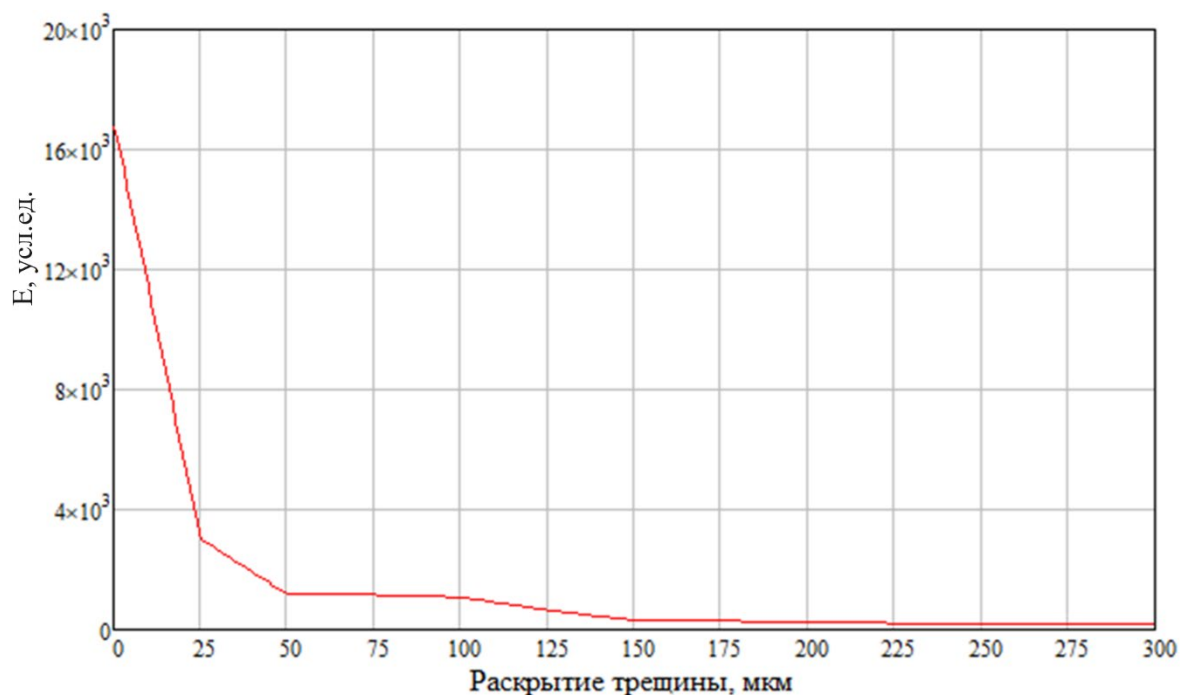


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образца после обработки шарошкой со средним зерном ( $Ra - 10,4$  мкм)

Из этого рисунка также видно, что при увеличении раскрытия от 0 до 25 мкм происходит падение энергии, но уже не с такой скоростью. Затем при раскрытиях от 25 мкм до 100 мкм энергия незначительно изменяется, что говорит о том, что при данных раскрытиях площадь контакта воды и поверхностей образца не изменяется. При раскрытиях более 100 мкм происходит дальнейшее снижение энергии вследствие уменьшения количества воды в трещине и соответствующего изменения площади контакта её с торцами образца. Это говорит о том, что граничным раскрытием является 100 мкм.

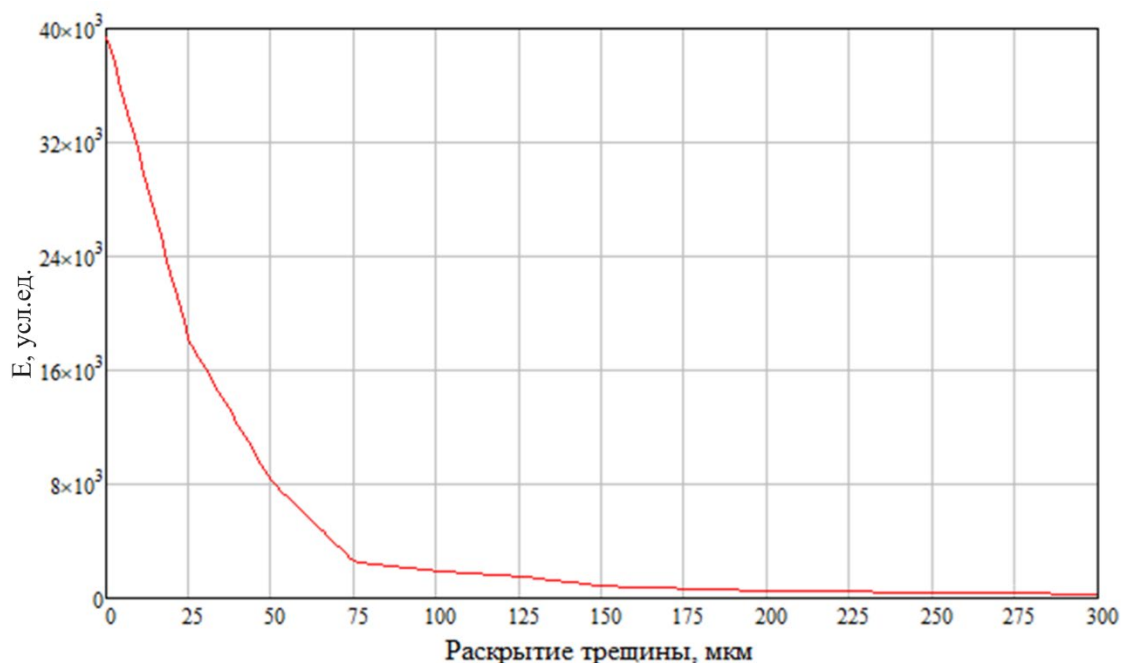


Рисунок 2.13 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образца после обработки шарошкой с крупным зерном ( $Ra - 12,5$  мкм)

Из этого рисунка видно, что уже при увеличении раскрытия от 0 до 75 мкм происходит падение энергии, но уже не с такой скоростью. Затем при раскрытиях от 75 мкм до 125 мкм энергия незначительно изменяется. Затем происходит падение энергии, что говорит о том, что при данных раскрытиях площадь контакта воды и поверхностей образца не изменяется. При раскрытиях более 125 мкм происходит дальнейшее снижение энергии вследствие уменьшения количества воды в трещине и соответствующего изменения площади контакта её с торцами образца. Это говорит о том, что граничным раскрытием является 125 мкм.

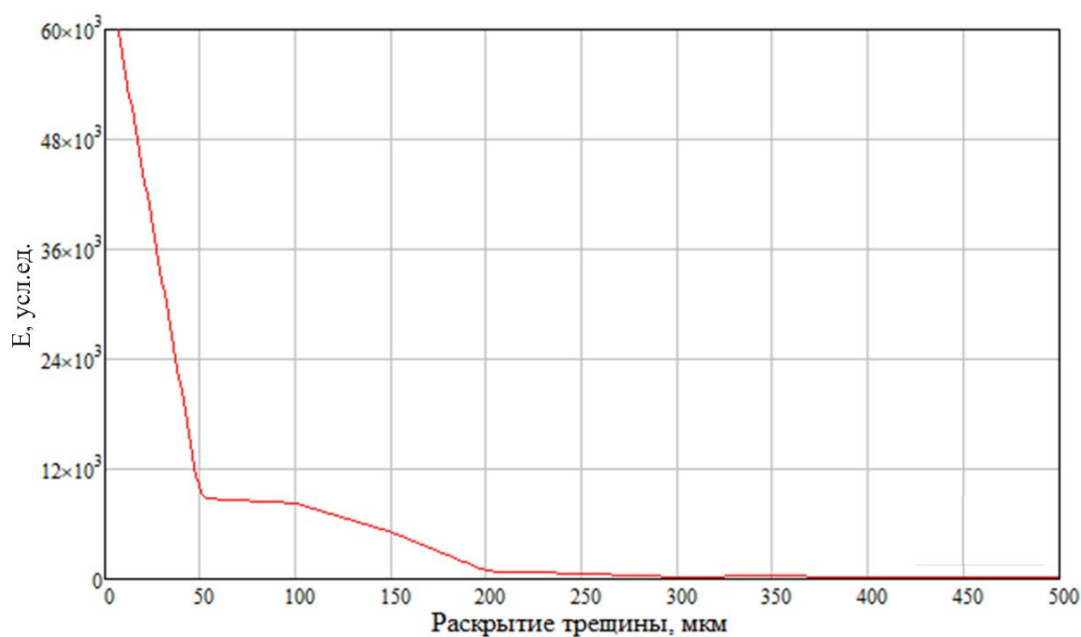


Рисунок 2.14 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образца с естественной трещиной ( $Ra = 17,5$  мкм)

Из рисунка 2.14 видно, что уже при увеличении раскрытия от 0 до 50 мкм происходит падение энергии. Затем при раскрытиях от 50 мкм до 100 мкм энергия незначительно изменяется, а затем начиная от 100 мкм начинает уменьшаться. Однако энергия сигнала всё ещё велика при значении раскрытия в 150 мкм, что может говорить об удерживании количества воды, достаточного для прохождения упругой волны и дальнейшего её выделения в волновой форме. Затем при раскрытиях 200 мкм и более происходит дальнейшее снижение энергии вследствие уменьшения количества воды в трещине и соответствующего изменения площади контакта её с торцами образца. Это говорит о том, что граничным раскрытием является 150 мкм.

На рисунке 2.15 представлен сводный график зависимости энергии  $E$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образцов с различной шероховатостью поверхностей трещины.

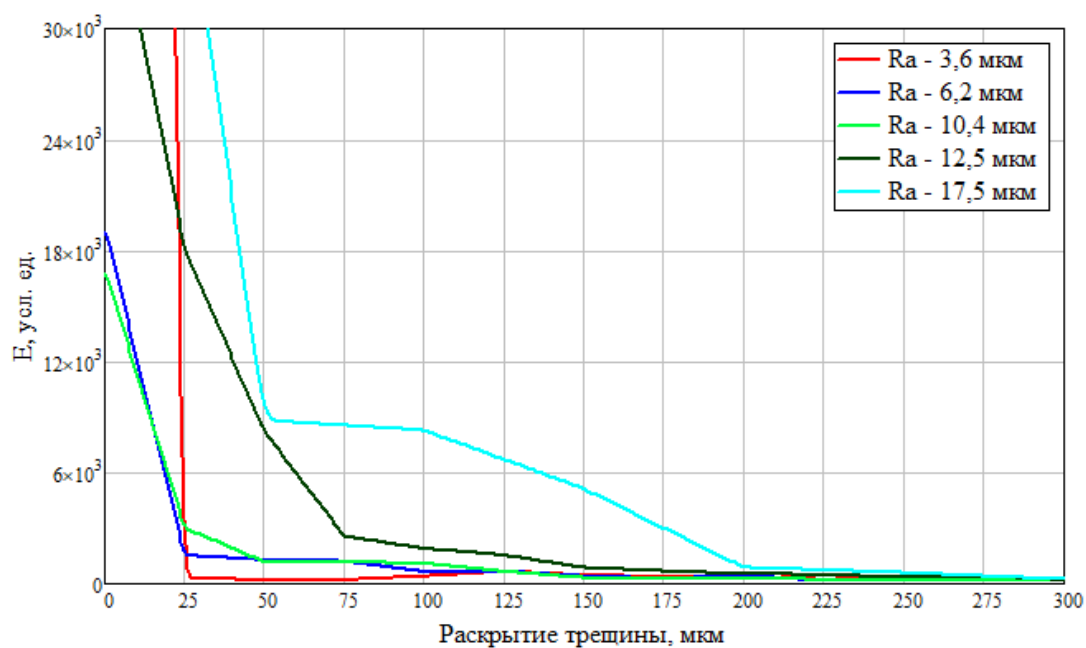


Рисунок 2.15 – Зависимость энергии  $E$  первого вступления от величины раскрытия трещины для образцов с различной шероховатостью поверхностей трещины

Из всего вышеприведённого можно сделать 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 2.16). Энергия, соответствующая нулевому раскрытию, не учитывалась при построении карты, так как не соответствует случаю наличия водозаполненной трещины.

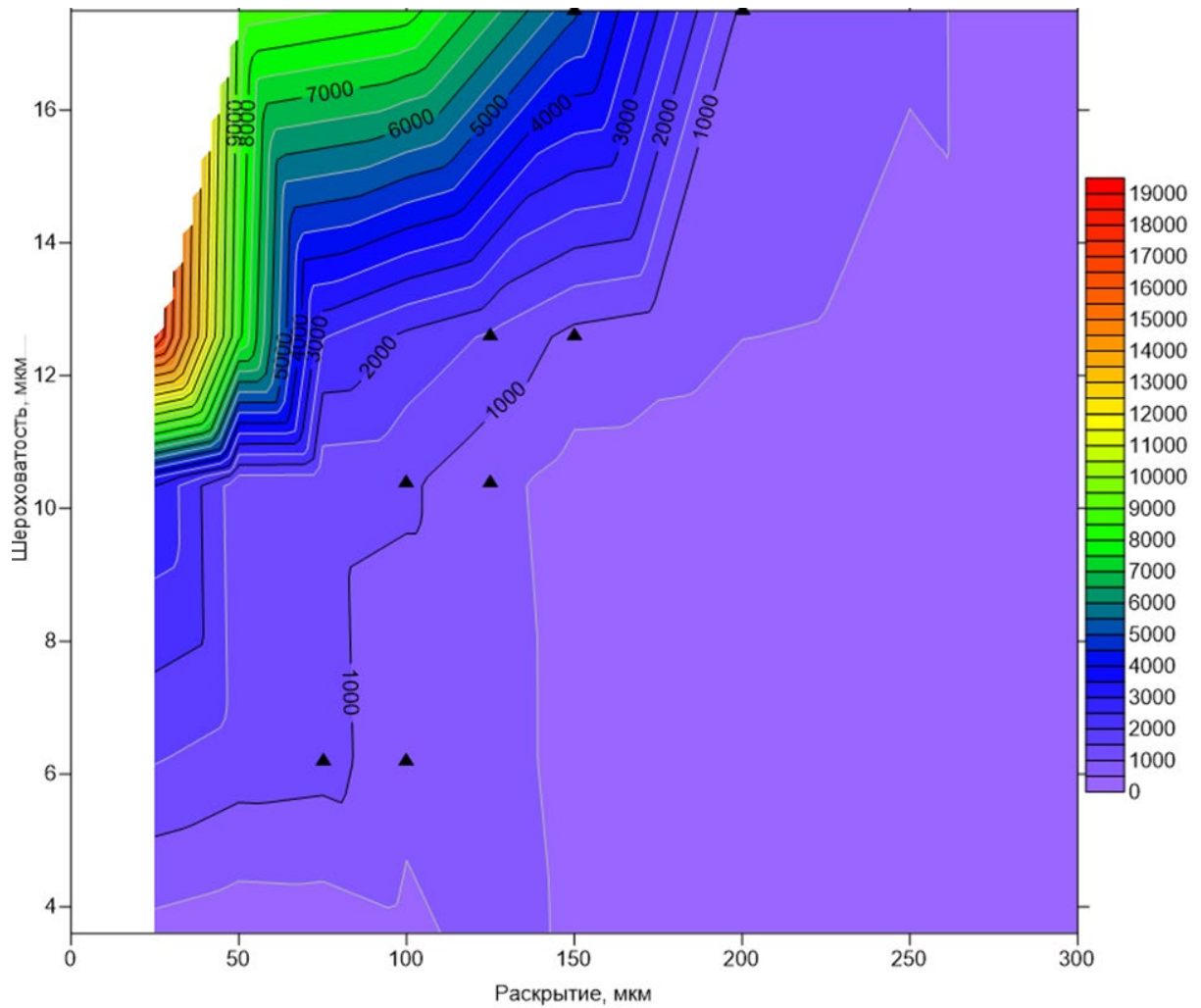


Рисунок 2.16 – Карта распределения энергии первого вступления продольной волны от раскрытия и шероховатости поверхностей трещины

Для определения граничного значения энергии первого вступления, при котором можно говорить об изменении гидродинамических характеристик трещины, и подтверждения вышеприведённых выводов рассмотрим подробнее график изменения энергии от раскрытия трещины; для примера возьмём для анализа кривую для шероховатостью поверхностей  $Ra = 10,4$  мкм (Рисунок 2.17).

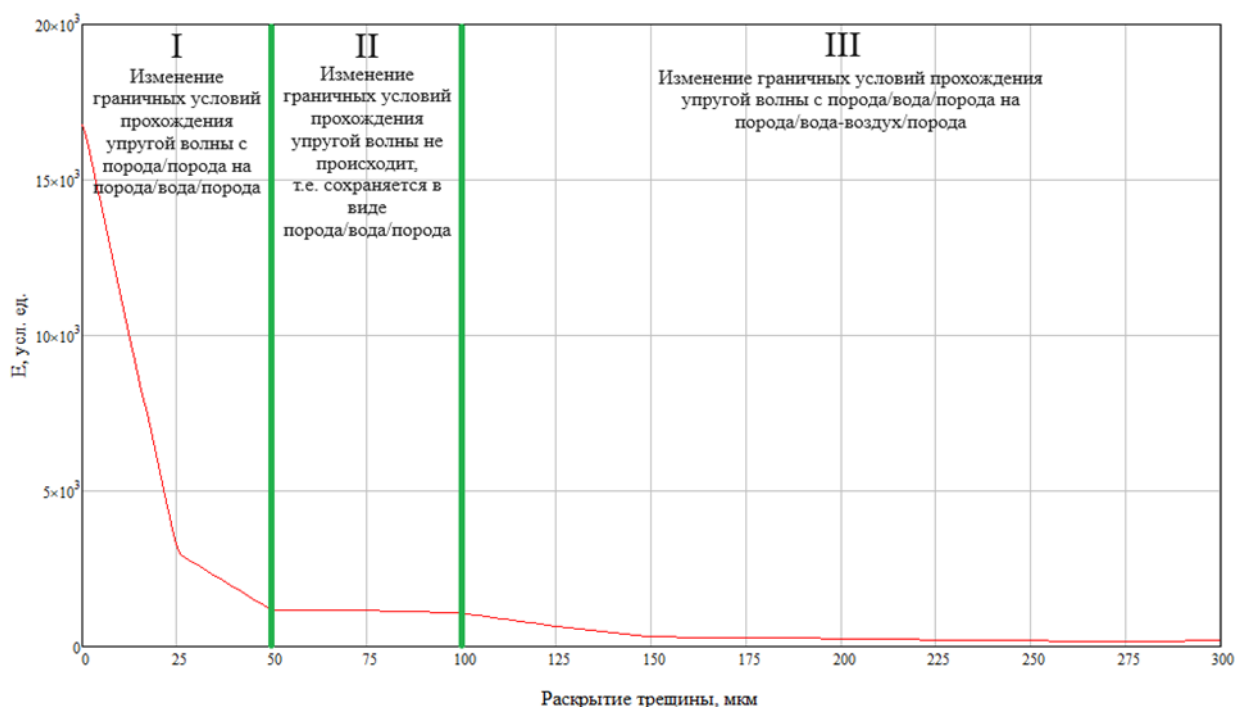


Рисунок 2.17 – Зависимость максимальной энергии  $E_{max}$  первого вступления от величины раскрытия трещины и её производной для образца после обработки шарошкой с средним зерном ( $Ra = 10,4$  мкм)

Из рисунка 2.17 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. Результаты данного исследования представлены в [100].

Тем самым подтверждается первое научное положение. Новизна исследования 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.

По результатам определения величины граничного раскрытия, при котором происходит изменение типа водопроницаемости, и порогового значения энергии для всех типов поверхности трещины были получены данные, представленные в таблице 2.3. Получено регрессионное уравнение связи шероховатости поверхности трещины и граничного раскрытия вида:  $b=6.8*Ra+33.5$  ( $R^2=0.98$ ), где  $b$  – величина граничного раскрытия трещины, мкм;  $Ra$  – шероховатость, мкм (Рисунок 2.18)

Таблица 2.3 – Результаты определения различной величины 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

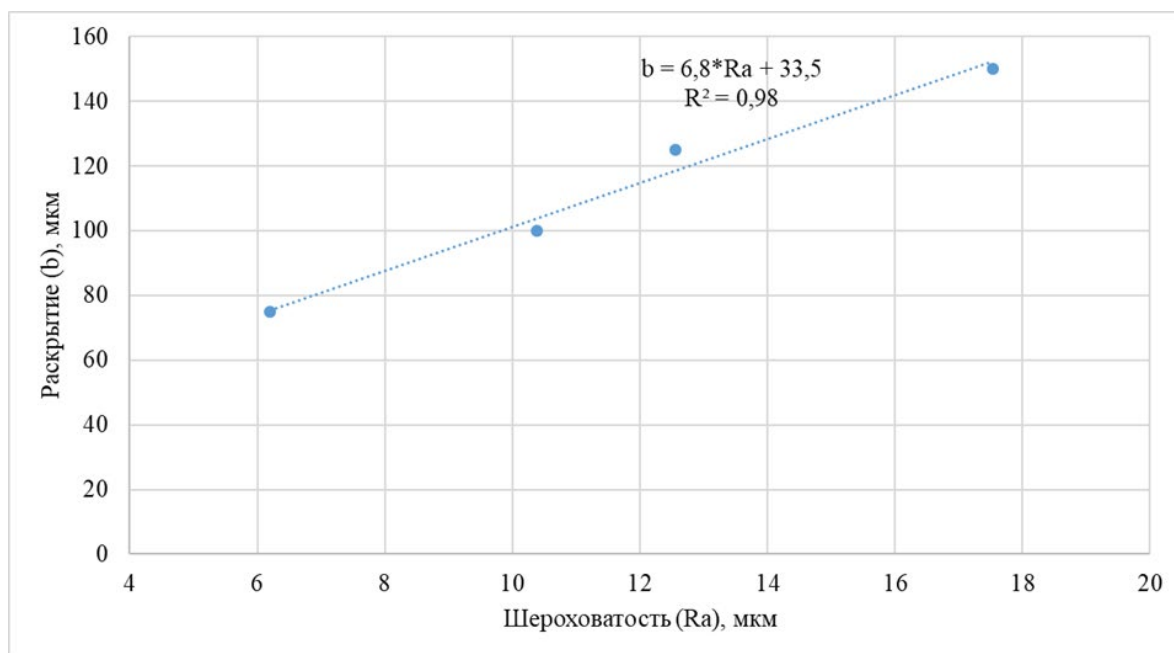


Рисунок 2.18 – Зависимость величины граничного раскрытия трещины от шероховатости

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.

Тем самым подтверждается второе научное положение. Новизна исследования заключается в установлении факта влияния шероховатости поверхности трещины на

величину граничного раскрытия, при котором происходит изменение типа водопроводимости с диффузионно-проницаемой на гидравлически проницаемую.

Полученные результаты исследования взаимосвязи особенностей распространения упругих волн и типа водопроводимости изложены в [100].

### 2.3 Исследование влияния единичной водозаполненной трещины на спектральные характеристики упругой волны

С целью определения критерия выделения водозаполненной трещины в массиве горных пород были сопоставлены для анализа волновые формы сигналов для каждого типа шероховатости, представленные на рисунках 2.4–2.8. Для рассмотрения брались формы с учётом результатов, полученных в разделе 2.2, т.е. только те, которые попадали в диапазон в пределах границы капиллярного раскрытия. Пример проанализированных волновых форм для образца с естественной трещиной показан на рисунке 2.19.

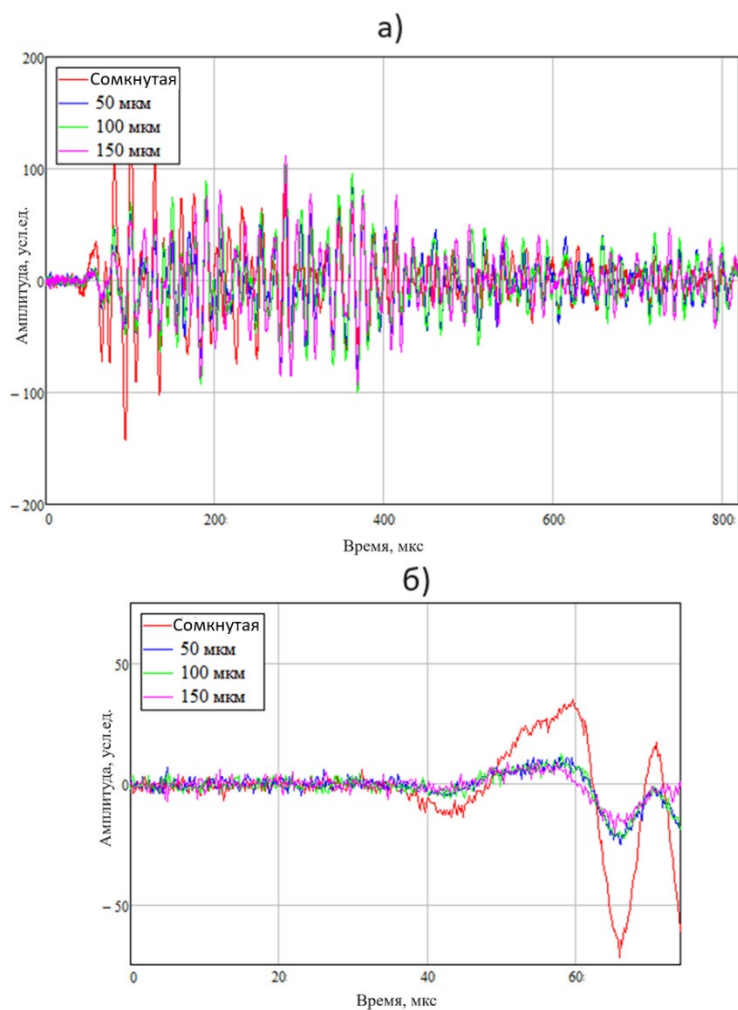


Рисунок 2.19 – Пример волновых формы, взятых для дальнейшего анализа: а) – полные волновые фронты; б) – фрагмент с первым вступлением

Из рисунка 2.19 видно, что увеличение раскрытия трещины не приводит к значительному увеличению времени первого вступления продольной волны и, как следствие, снижению скорости, так как рост раскрытия трещины относительно базы прозвучивания очень мал. Вместе с этим заметно снижение амплитуды первого вступления относительно случая с отсутствием трещины, при этом с ростом раскрытия трещины затухание замедляется. Последнее представляется логичным, т.к. основной вклад в затухание сигнала вносит отражение на границах контрастных акустических импедансов ( $z = \rho V_p$ , где  $\rho$  – плотность материала среды,  $V_p$  – плотность продольных волн в среде). Для материала заполнителя трещины (вода) акустический импеданс составляет 1480 кПа\*с/м (при плотности 998 кг/м<sup>3</sup> и скорости продольных волн 1482 м/с), для материала образца (гнейса) – 10800 кПа\*с/м (при плотности 2700 кг/м<sup>3</sup> и скорости продольных волн по результатам текущих исследований 4000 м/с), т.е. в 7,3 раза больше, чем в воде. В данном случае очевидно, что количество таких границ не меняется. Что справедливо для всех рассматриваемых случаев.

При этом сам факт наличия трещины должен оказывать влияние на частотные характеристики упругой волны, в следствие переотражений в водной среде внутри трещины, а также изменении длительности прохождения волны в данной среде в следствие изменения раскрытия трещины.

Для проверки данного предположения была произведена обработка волновых фронтов в программной среде MathCad.

Результаты расчёта амплитудно-частотного спектра смоделированных случаев представлены в графическом виде на рисунках 2.20–2.24.

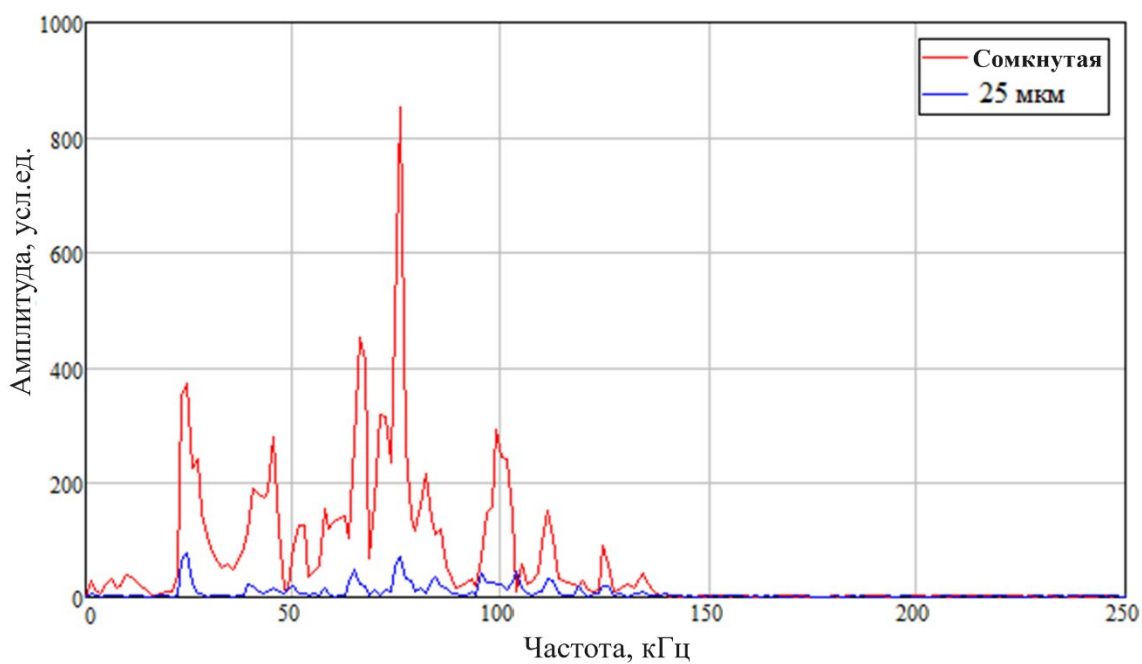


Рисунок 2.20 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после распила

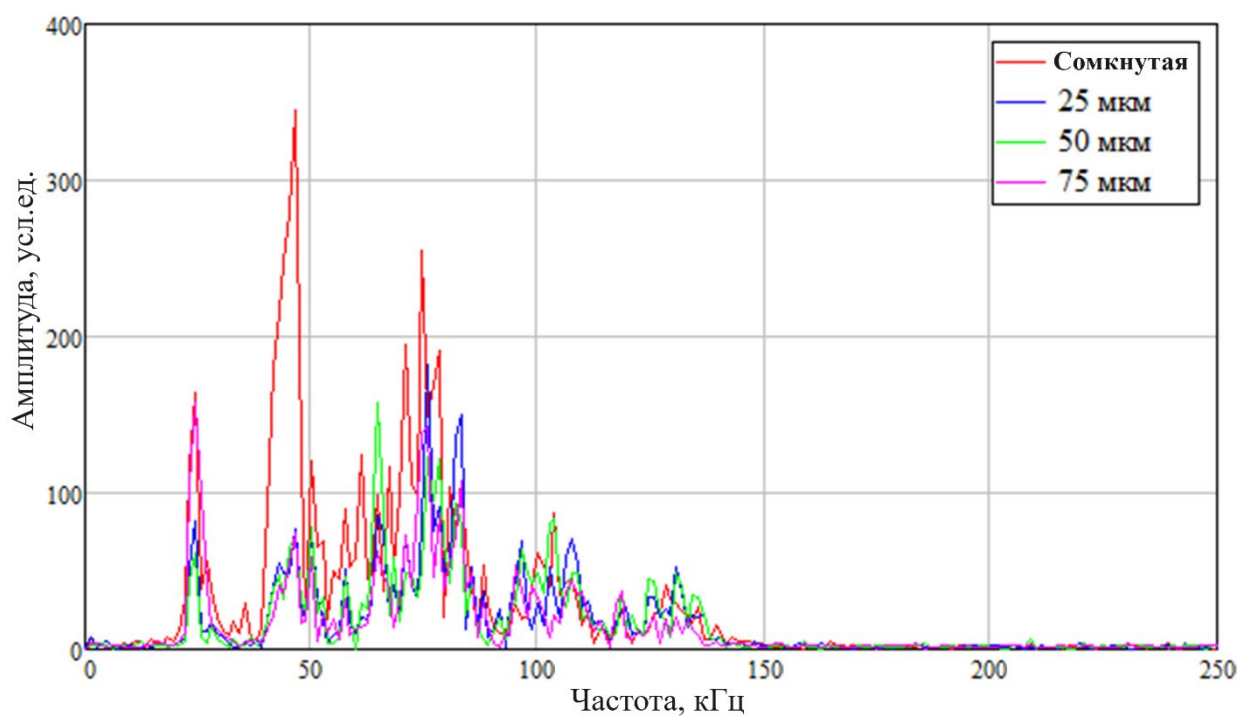


Рисунок 2.21 — Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой с мелким зерном

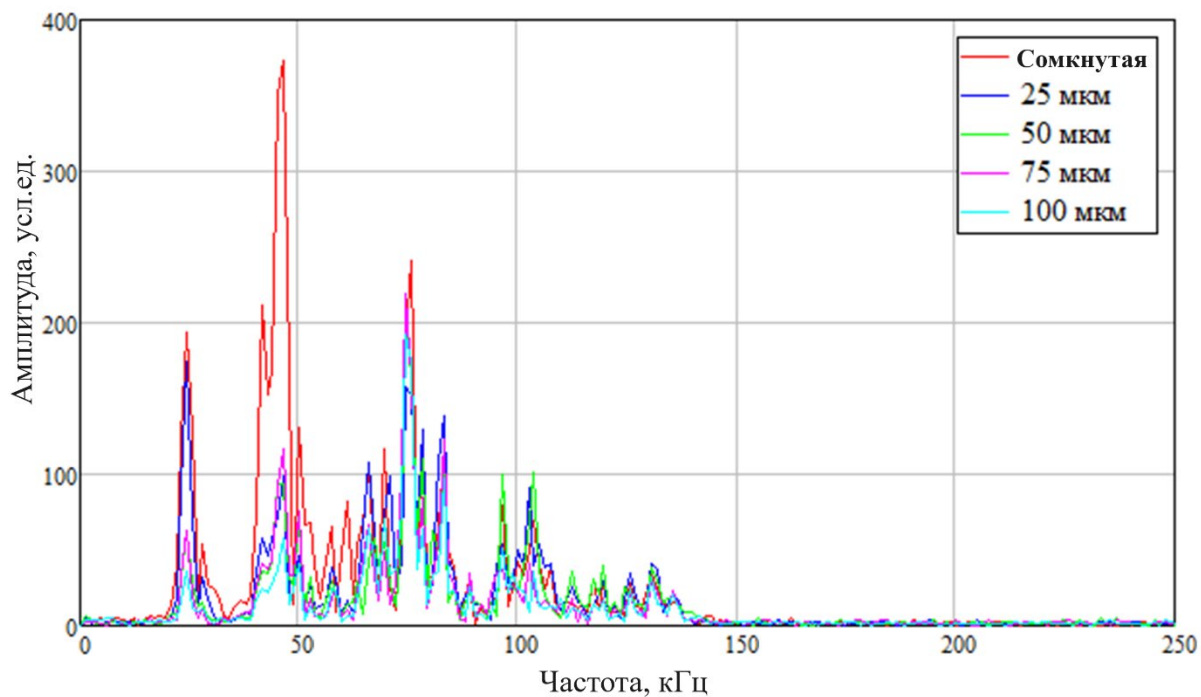


Рисунок 2.22 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой со средним зерном

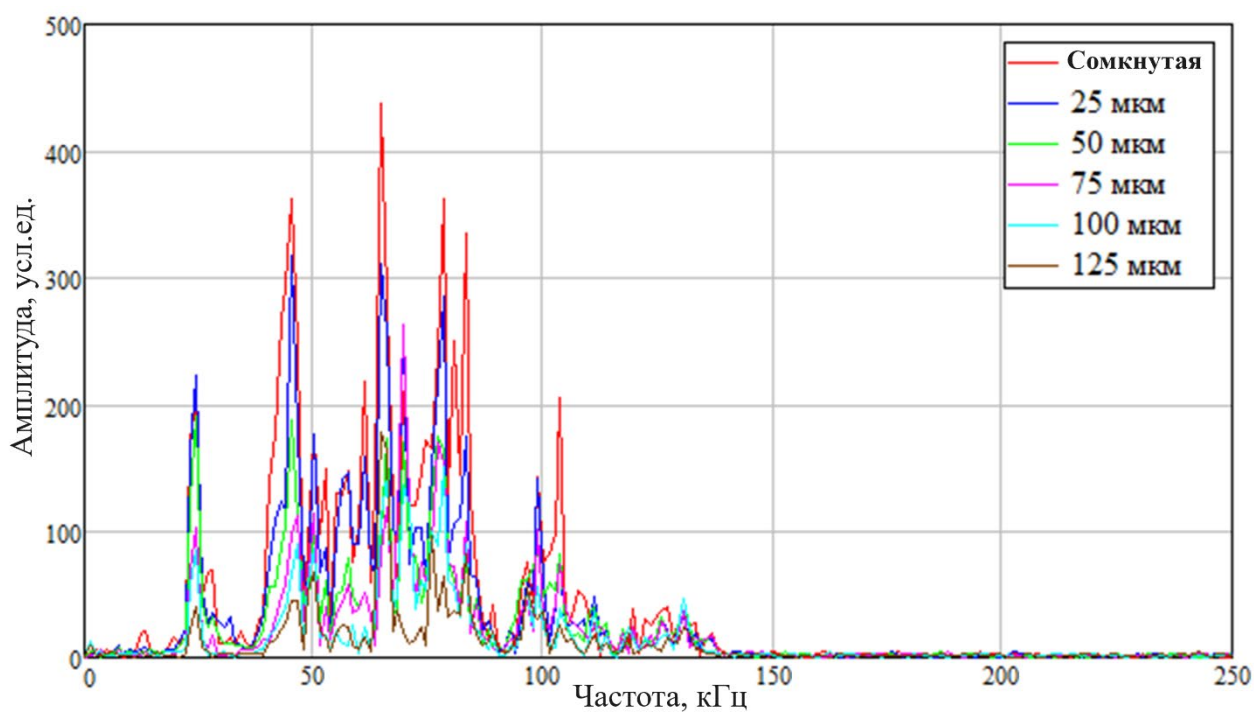


Рисунок 2.23 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой с крупным зерном

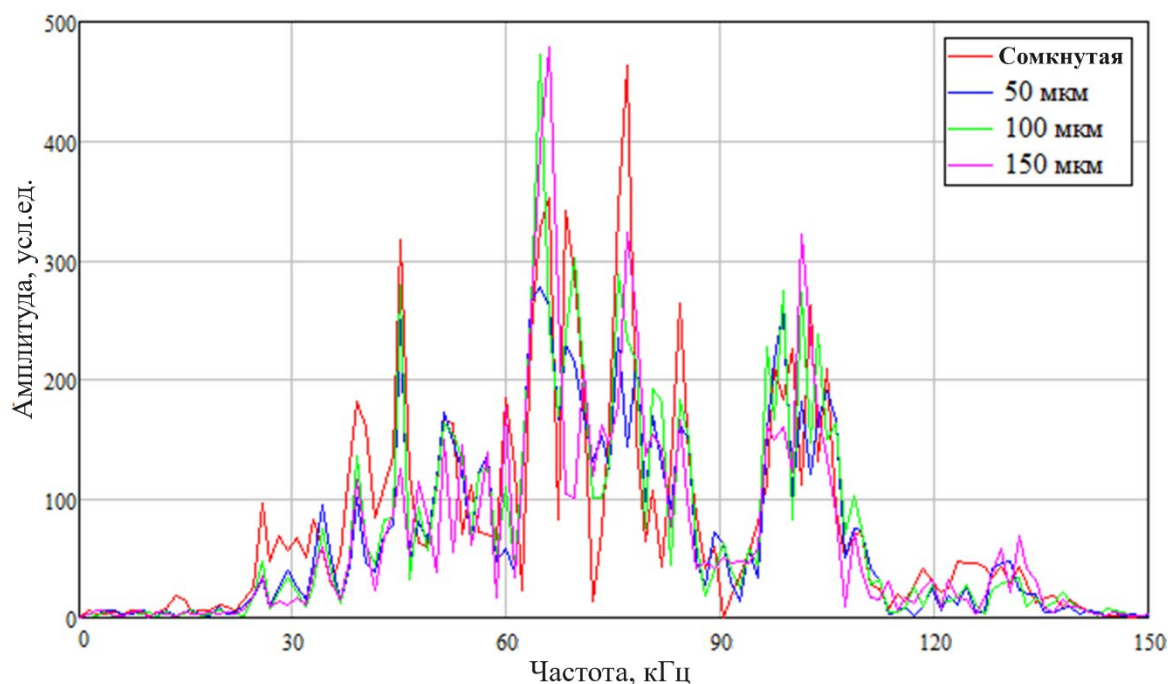


Рисунок 2.24 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной естественной трещины

Из рисунков 2.20–2.24 видно, что в графиках амплитудно-частотного спектра явно выделяются несколько областей. При появлении водозаполненной трещины на пути распространения упругой волны амплитуда испытывает резкое снижение в пиковых значения амплитуд в данных областях. При этом при построении спектра сигнала использовался весь фронт волны длительностью 820 мкс, имеющий в себе переотражённые волны от границ образца и протекторов преобразователей, что затрудняет анализ спектральной картины. Для избавления от зашумления рассмотрим спектры сигналов на ограниченном участке волнового фронта с первым вступлением продольной волны, пример участка для образца с естественной трещиной представлен на рисунке 2.25.

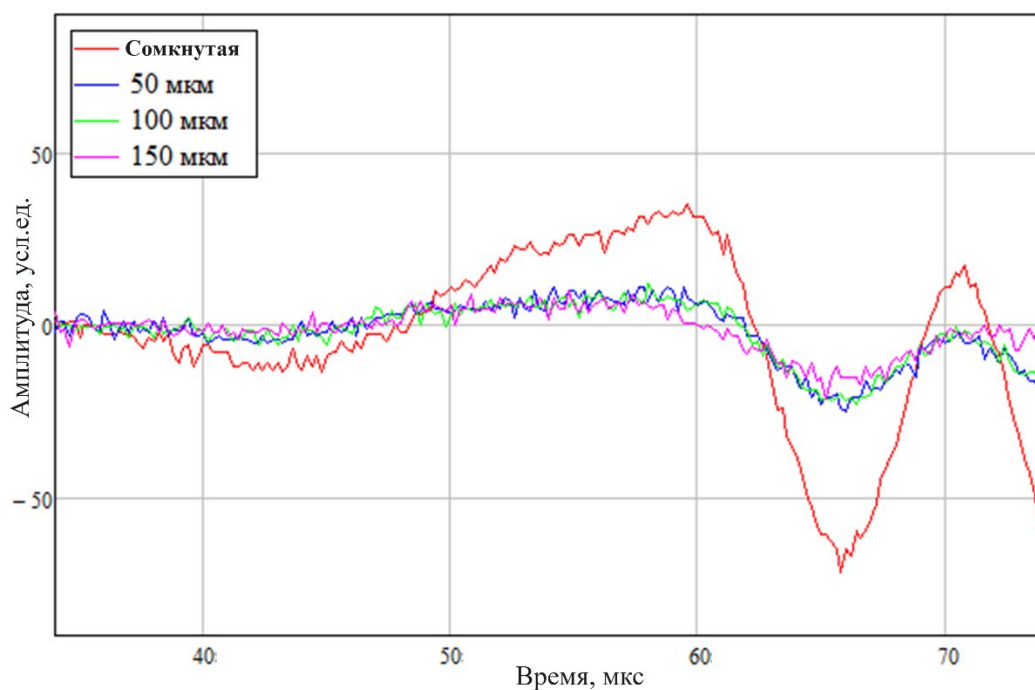


Рисунок 2.25 – Волновые фронты длительностью от 34 мкс до 74 мкс

Полученные графики амплитудного спектра для ограниченного интервала представлены на рисунках 2.26 – 2.30.

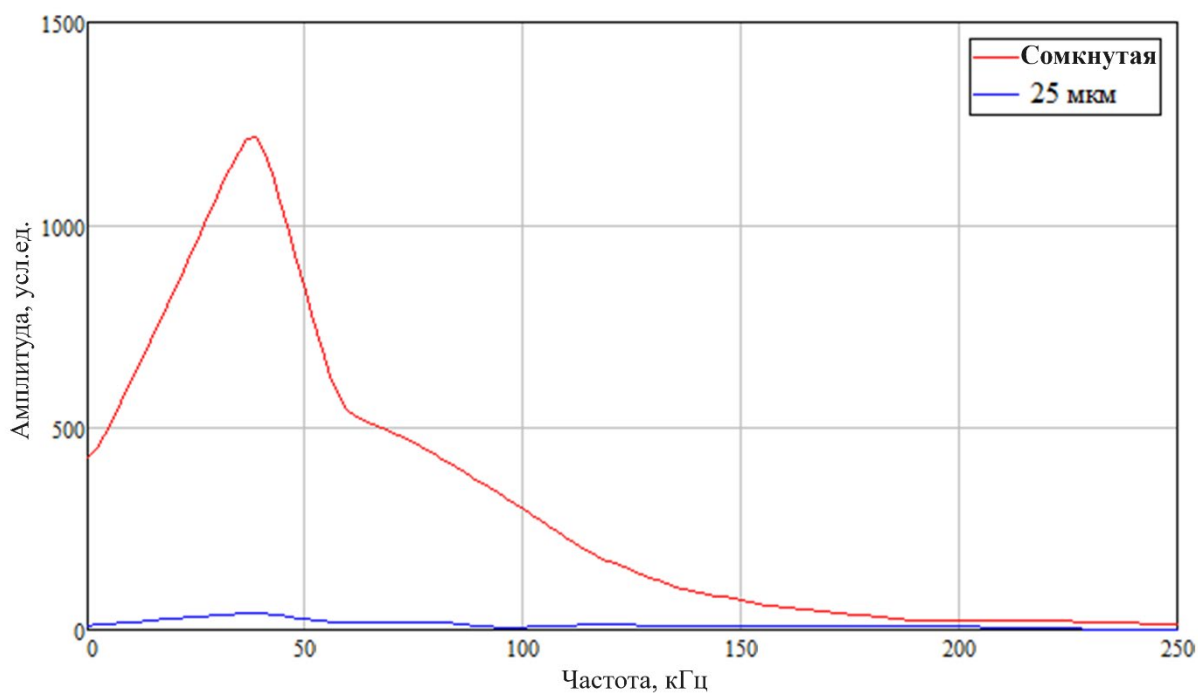


Рисунок 2.26 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после распила для участка с первым вступлением

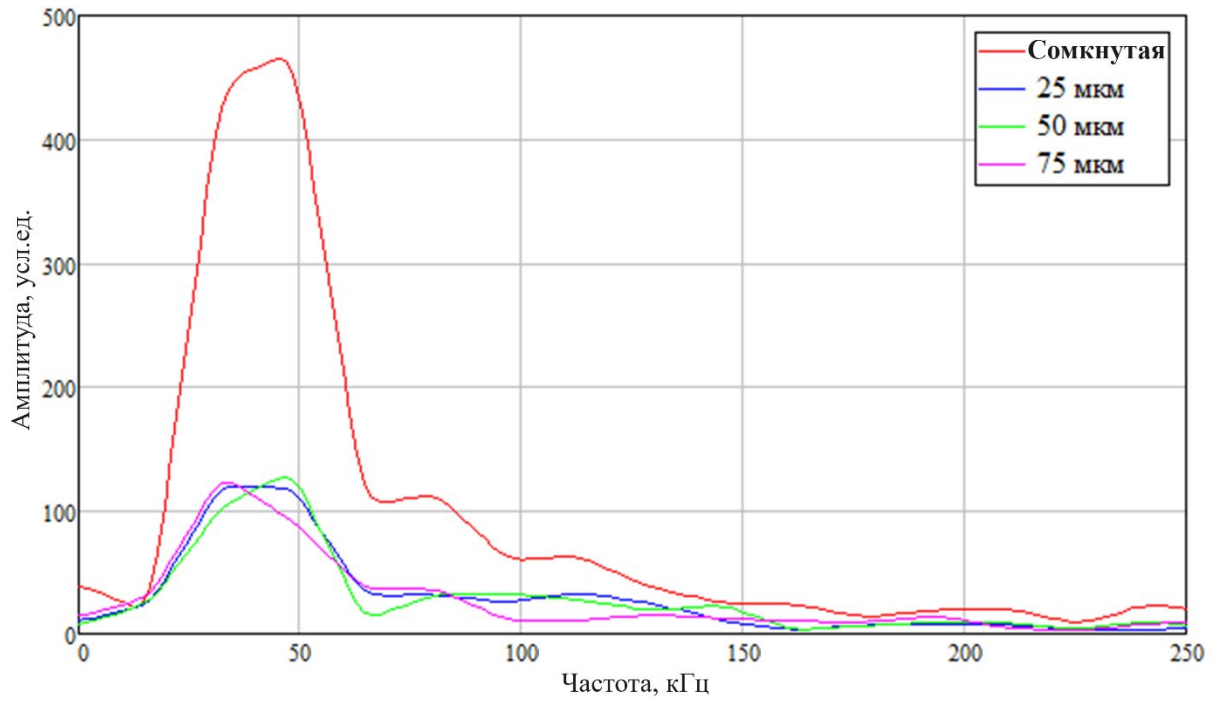


Рисунок 2.27 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой с мелким зерном для участка с первым вступлением

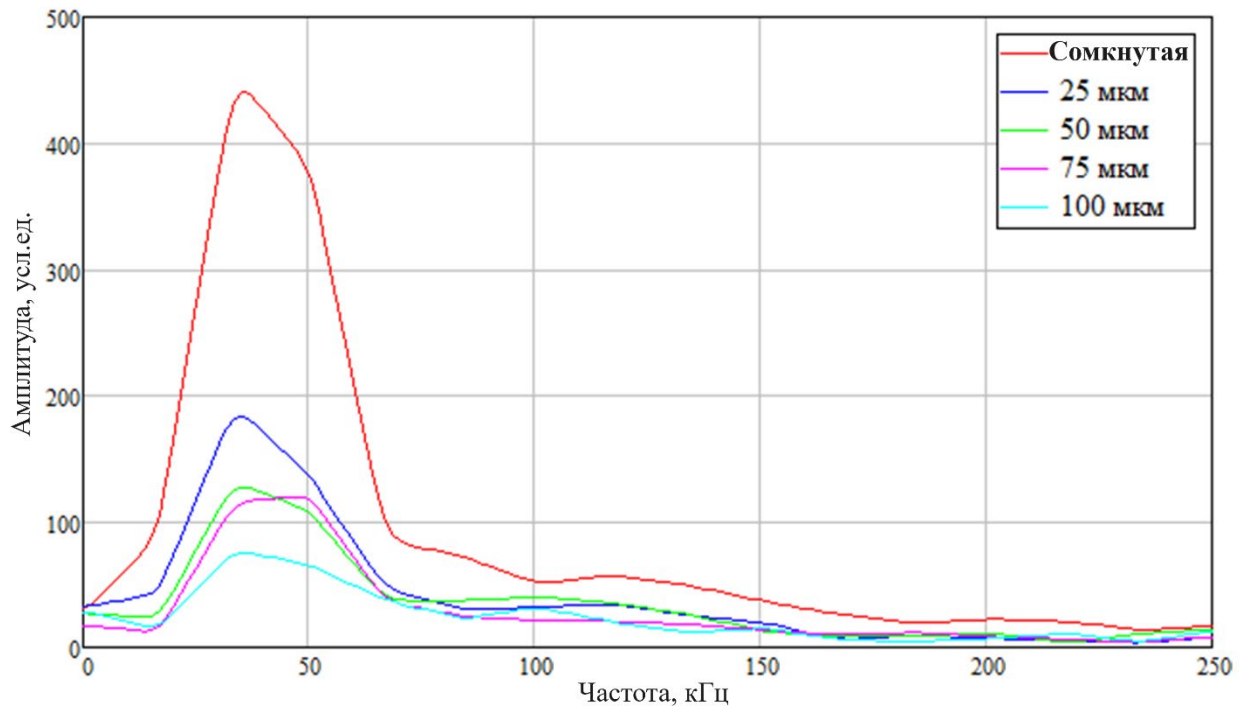


Рисунок 2.28 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой со средним зерном для участка с первым вступлением

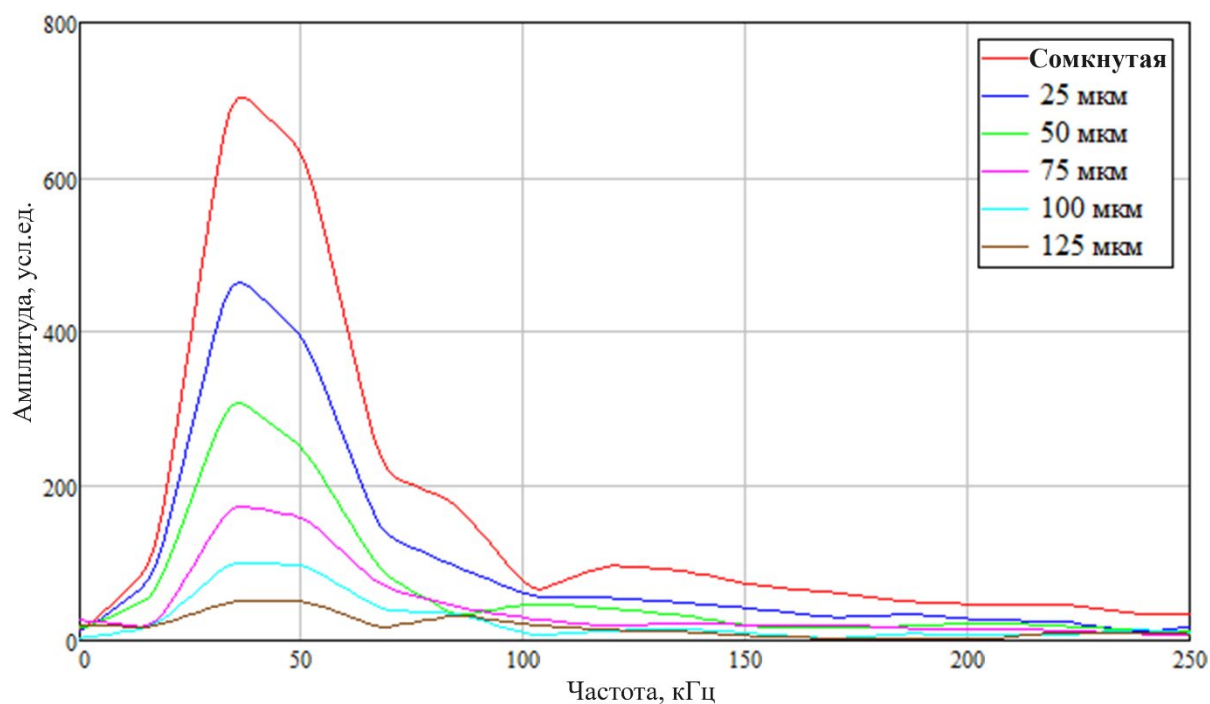


Рисунок 2.29 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной трещины после обработки шарошкой с крупным зерном для участка с первым вступлением

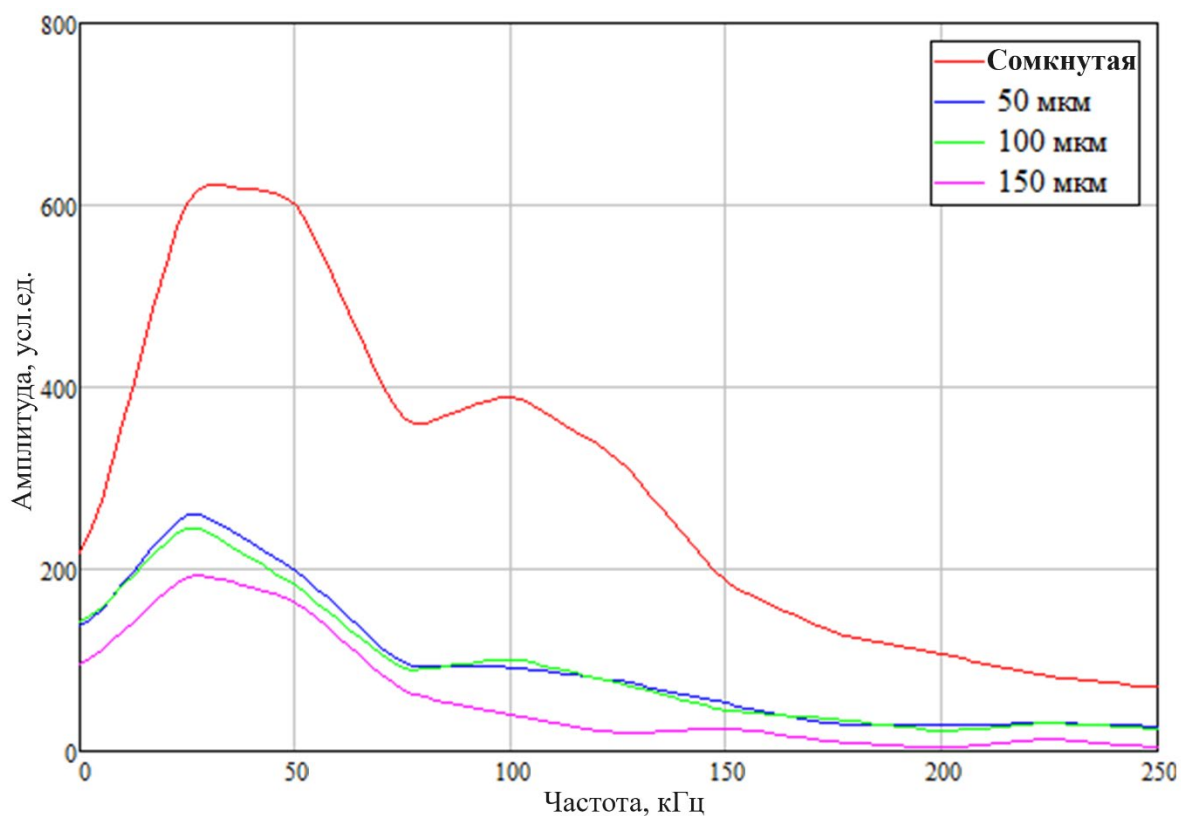


Рисунок 2.30 – Графики амплитудно-частотного спектра для различных случаев раскрытия водозаполненной естественной трещины для участка с первым вступлением

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

В первой группы (Рисунки 2.26–2.29) явно выделяется амплитудный пик на частоте 35 кГц. Данный пик имеет наибольшую амплитуду при нулевом раскрытии водозаполненной 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 12,55 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 (Рисунок 2.30) видно, что для случая монолитного участка выделяется два пика на спектральной картине на частотах 35 кГц и 100 кГц. При появлении водозаполненной трещины на пути прохождения упругой волны пик в области 100 кГц испытывает значительное снижение, а именно в 3.85 раз 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 12,55 мкм при раскрытии 50 мкм амплитуда данного пика снижается в 2,29 раз, что близко к значению при естественной трещине.

Явно заметно, что соотношение между амплитудами данных пиков с появлением и ростом раскрытия водозаполненной трещины изменяется. Для определения данного изменения и его наглядной демонстрации были построены нормированные графики спектров, представленные на рисунке 2.31.

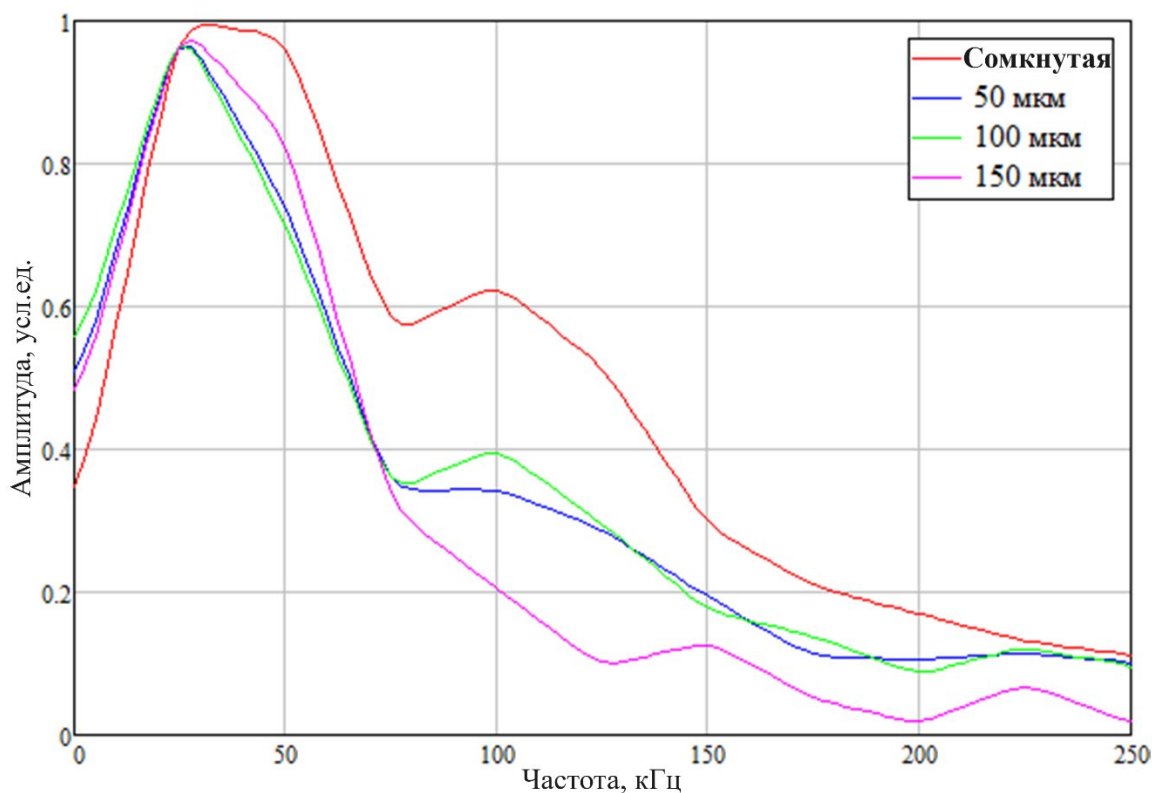


Рисунок 2.31 – Нормированные амплитудные спектры участков фронтов волн с первым вступлением

Из графиков видно, что в основном происходит падение амплитуды в высокочастотной области. Это логично объясняется тем, что трещины в горных породах для упругих волн является фильтром низких частот. При этом спектральные графики при раскрытии 50 и 100 мкм незначительно отличаются друг от друга. Это объясняется отсутствием изменения роста количества границ с контрастными акустическими свойствами. С ростом раскрытия до 150 мкм вновь происходит относительное падение также в высокочастотной области, что объясняется уменьшением количества воды в трещине и объема заполнения ею трещины. Что также косвенно подтверждает полученные выше результаты по определению граничного раскрытия. В таблице 2.4 представлены отношения амплитуд в области частот 100 кГц к амплитудам в области 30 кГц.

Таблица 2.4 – 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

Установлено, что при появлении водозаполненной трещины отношение амплитуд в области частот 100 кГц к амплитудам в области 30 кГц изменяется со значения 0.62 до значения 0.39. При дальнейшем росте раскрытия до 150 мкм отношение уменьшается до 0.2.

## 2.4 Выводы

Проведенные лабораторные исследования горных пород Енисейского участка, в том числе образца с естественной трещиной, позволили установить, что характерные размеры капиллярных трещин в данных породах достигают значений в 150 мкм.

По результатам проведения прозвучивания образцов с разной шероховатостью поверхностей трещины и различным раскрытием установлено, 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). Пороговым значением энергии первого вступления, при котором наблюдается изменение гидродинамических характеристик трещины, можно принять равным 1000 ед.

Также по результатам определения граничного раскрытия и порогового значения энергии было получено регрессионное уравнение связи шероховатости поверхности трещины и граничного раскрытия вида:  $b=9.9154*Ra-9.7037$  ( $R^2=0.8816$ ), где  $b$  – граничное раскрытие трещины, мкм;  $Ra$  – шероховатость, мкм.

В ходе спектрального анализа зарегистрированных упругих колебаний при прозвучивании образцов с водозаполненной трещиной различного раскрытия было установлено существенное влияние наличия водозаполненной трещины на амплитудно-частотную характеристики колебаний. При прохождении упругой волны через водозаполненную трещину происходит падение амплитуды в высокочастотной области, при этом при увеличении раскрытия трещины темп падения увеличивается. Установлено, что при появлении водозаполненной трещины отношение амплитуд в области частот 100 кГц к амплитудам в области 30 кГц изменяется со значения 0.62 до значения 0.39. При дальнейшем росте раскрытия до 150 мкм отношение уменьшается до 0.2.

### 3 Исследование влияния единичной водозаполненной трещины на параметры упругой волны на основе численного моделирования

#### 3.1 Описание методики моделирования

При проведении акустического каротажа участка массива горных пород в случае, если на пути распространения упругих колебаний присутствует трещина, заполненная воздухом, затухания УЗ колебаний возрастает настолько, что сигнал практически перестает распространяться. Выделить первое вступление или в целом зарегистрировать сигнал в этом случае, как правило, не удается.

При определённых условиях, а именно малом водопритоке в скважину или полном его отсутствии, данный факт может являться посылкой для утверждения о наличии трещины в исследуемом интервале. Однако говорить о конкретном положении трещины в исследуемом интервале, определяемым расстоянием между излучателем и приёмником упругих колебаний, не представляется возможным.

В случае заполнения трещины водой при регистрации сигнала наблюдается резко снижение скорости продольной волны, которое может достигать значений 1000 м/с в зависимости от раскрытия трещины. При этом при малых раскрытиях трещины однозначно утверждать, что причиной аномального снижения скорости является то, что на исследуемом интервале присутствует водозаполненная трещина, а не, например, данное снижение приурочено к минеральному включению с отличными акустическими свойствами или общей нарушенностью массива, невозможно.

При этом в следствие прохождения упругой волны через границу двух сред с контрастными акустическими свойствами (порода/воздух или порода/вода) часть энергии сигнала отразится, что приведёт к неизбежному изменению в амплитудном спектре волны.

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

– Модуль *Elastic wave* использует следующие уравнения для общего линейно-упругого материала в зависимости от скорости деформации:

$$\rho_s \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \vec{F}_v, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} - \frac{1}{2} [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] = 0, \quad (3.2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3.3)$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости частиц в твёрдой среде, м/с;  $\rho_s$  – плотность твёрдой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – тензор малых деформаций;  $\mathbf{C}$  – тензор упругости;  $\vec{F}_v$  – объёмная сила, действующая на тело, Н/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\nabla$  – оператор набла.

– Модуль *Acoustic pressure* использует уравнения для моделирования нестационарного распространения линейных акустических волн. Уравнения формулируются в виде системы первого порядка в терминах линейризованного уравнения неразрывности и линейризованного уравнения импульса в виде, при этом внешние источники отсутствуют:

$$\frac{1}{\rho_l c_l^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (3.4)$$

$$\rho_l \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot p = 0, \quad (3.5)$$

где  $t$  – время, с;  $p$  – акустическое давление, Па;  $\vec{u}$  – вектор скорости частиц жидкости, м/с;  $\rho_l$  – плотность жидкой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_l$  – скорость акустической волны в жидкости.

Для совместного использования указанных модулей на границах контакта двух сред твёрдой, за которую отвечает модуль *Elastic wave*, и жидкую, за которую отвечает модуль *Acoustic pressure*, используется следующая система уравнений:

– непрерывность нормальной составляющей скорости на границе раздела сред:

$$\vec{n} \cdot (\vec{v}_{ep} - \vec{u}_{ep}) = 0, \quad (3.6)$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к границе;  $\vec{v}_{ep}$  – вектор скорости частиц в твёрдой среде на границе раздела сред;  $\vec{u}_{ep}$  – вектор скорости частиц жидкости на границе двух сред.

– баланс нормальных напряжений:

$$(\boldsymbol{\sigma}_{ep})_n = -p_{ep}, \quad (3.7)$$

где  $(\boldsymbol{\sigma}_{ep})_n$  – проекция тензора напряжений на границе двух сред;  $p_{ep}$  – акустическое давление в жидкости на границе двух сред.

### 3.2 Описание граничных условий

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:

$$v_r = 0, \quad (3.8)$$

$$\sigma_{rz} = 0 \quad (3.9)$$

Свойства материала среды: модуль Юнга – 30 ГПа; коэффициент Пуассона – 0.18; плотность – 2400 кг/м<sup>3</sup>. 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/м<sup>3</sup>. Ввод упругой волны осуществлялся на участок твёрдой среды протяжённостью 6 мм на расстоянии 100 мм от трещины. Нагрузка аналитически выражается как:

$$\sigma_n = -p(t), \quad (3.10)$$

где  $\sigma_n$  – проекция тензора напряжений на нагруженный участок, Па;  $p(t)$  – давление на заданную границу, зависимость которой имеет вид:

$$p(t) = p_0 \sin(2\pi f_0 t) * e^{-1 * \left(\frac{2 * t - T_0}{T_0}\right)^4}, \quad (3.11)$$

где  $p_0$  – начальная амплитуда импульса, равная 0,4 МПа;  $f_0$  – частота начального импульса, равная 80кГц;  $T_0$  – период начального импульса, равный  $1.25 * 10^{-5}$  с.

График прилагаемого давления представлен на рисунке 3.1.

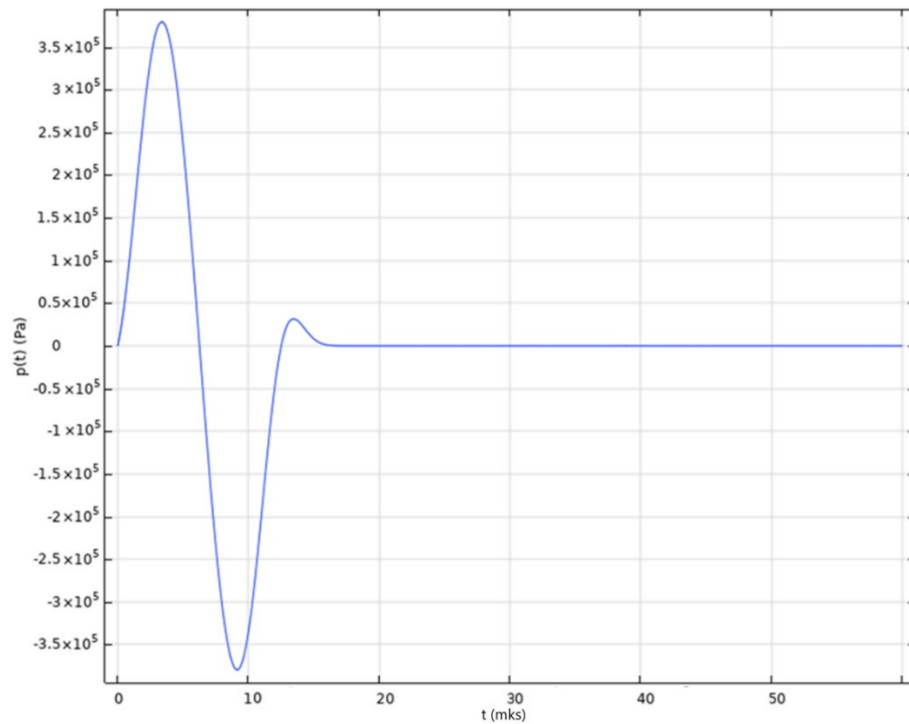


Рисунок 3.1 – График прилагаемой нагрузки от времени

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 ( $r, z \rightarrow \infty$ ) происходит затухание упругих колебаний, что выражается в виде:

$$\sigma(r, z) \rightarrow 0 \quad (3.12)$$

$$\vec{v}(r, z) \rightarrow 0 \quad (3.13)$$

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 3.2.

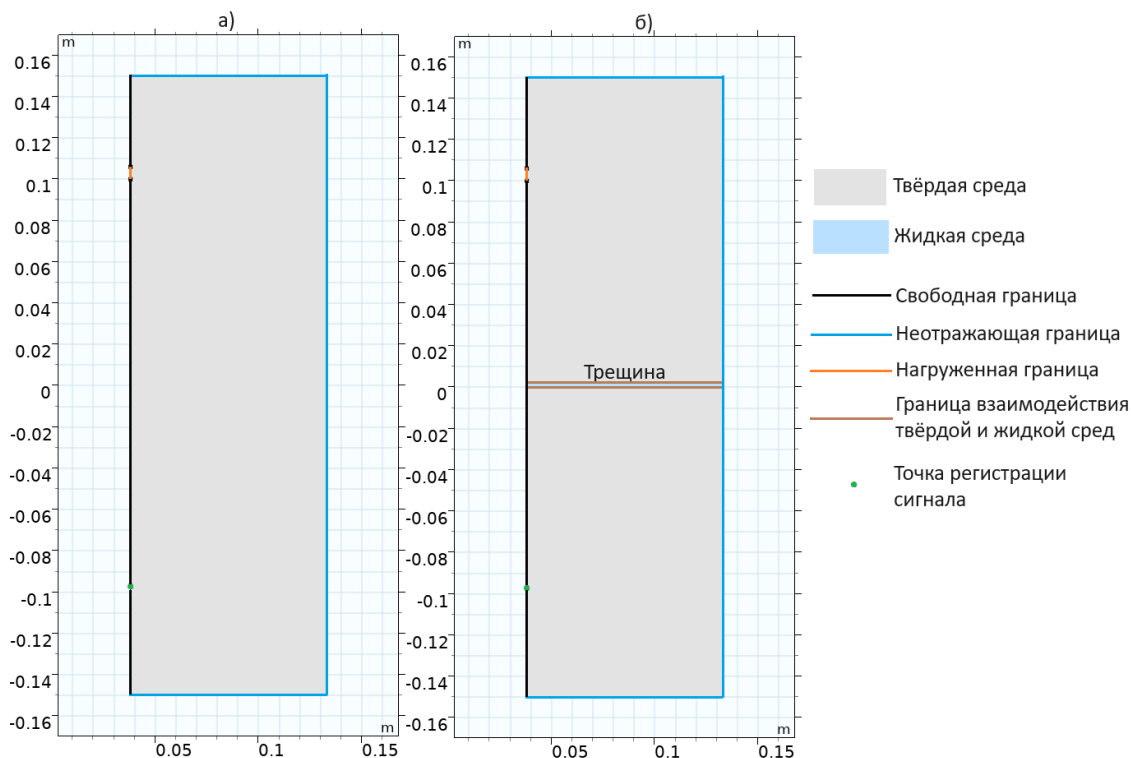


Рисунок 3.2 – Общая схема базовой компьютерной модели: а) без трещины; б) с трещиной

Модель, разбитая на сетку конечных элементов, представлена на рисунке 3.3.

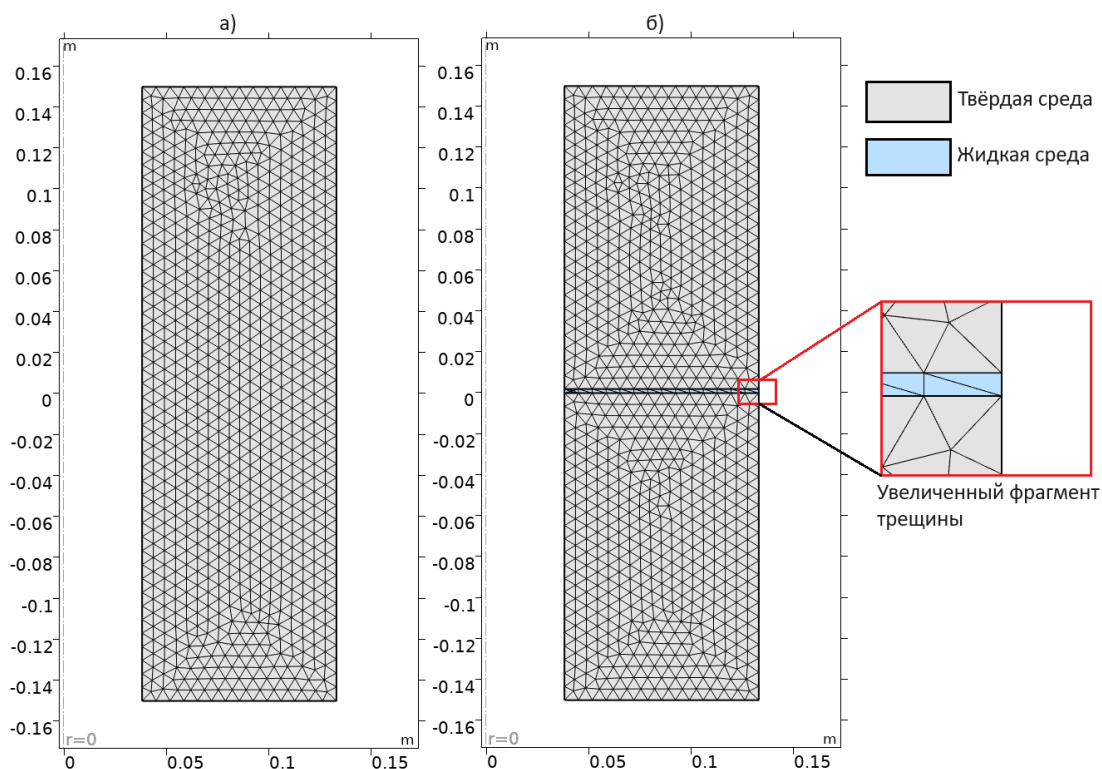


Рисунок 3.3 – Общая схема базовой компьютерной модели, разбитая на сетку конечных элементов: а) – монолитный массив; б) – массив с трещиной

### 3.3 Результаты численного моделирования

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.

На рисунке 3.4 показано карта распределения колебательных скоростей вдоль радиального направления ( $v_r$ , м/с) от центра скважины в момент расчета 103 мкс.

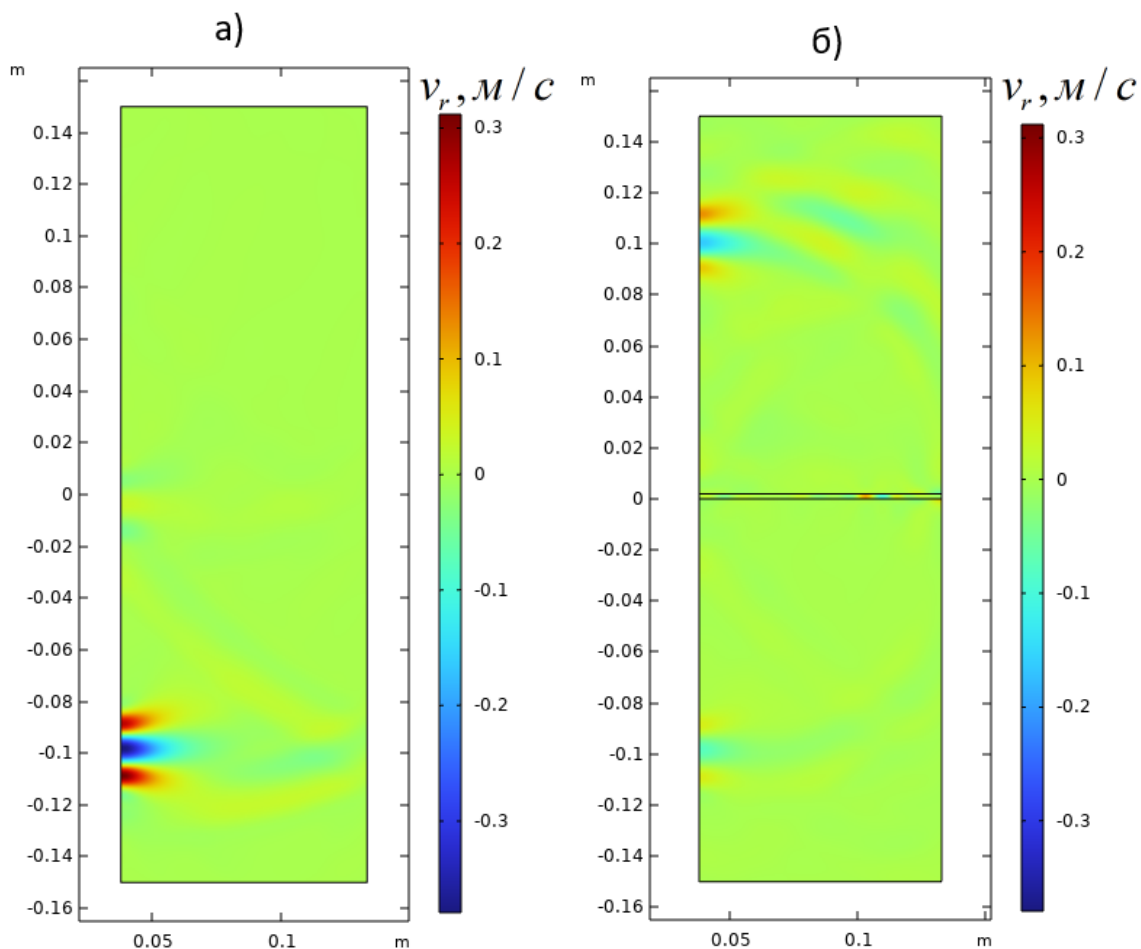


Рисунок 3.4 – Распределение радиальной компоненты колебательной скорости в пространстве модели ( $v_r$ ) в момент расчета 103 мкс: а) – монолитный массив; б) – массив с трещиной

Зарегистрированные волновые формы показаны на рисунке 3.5.

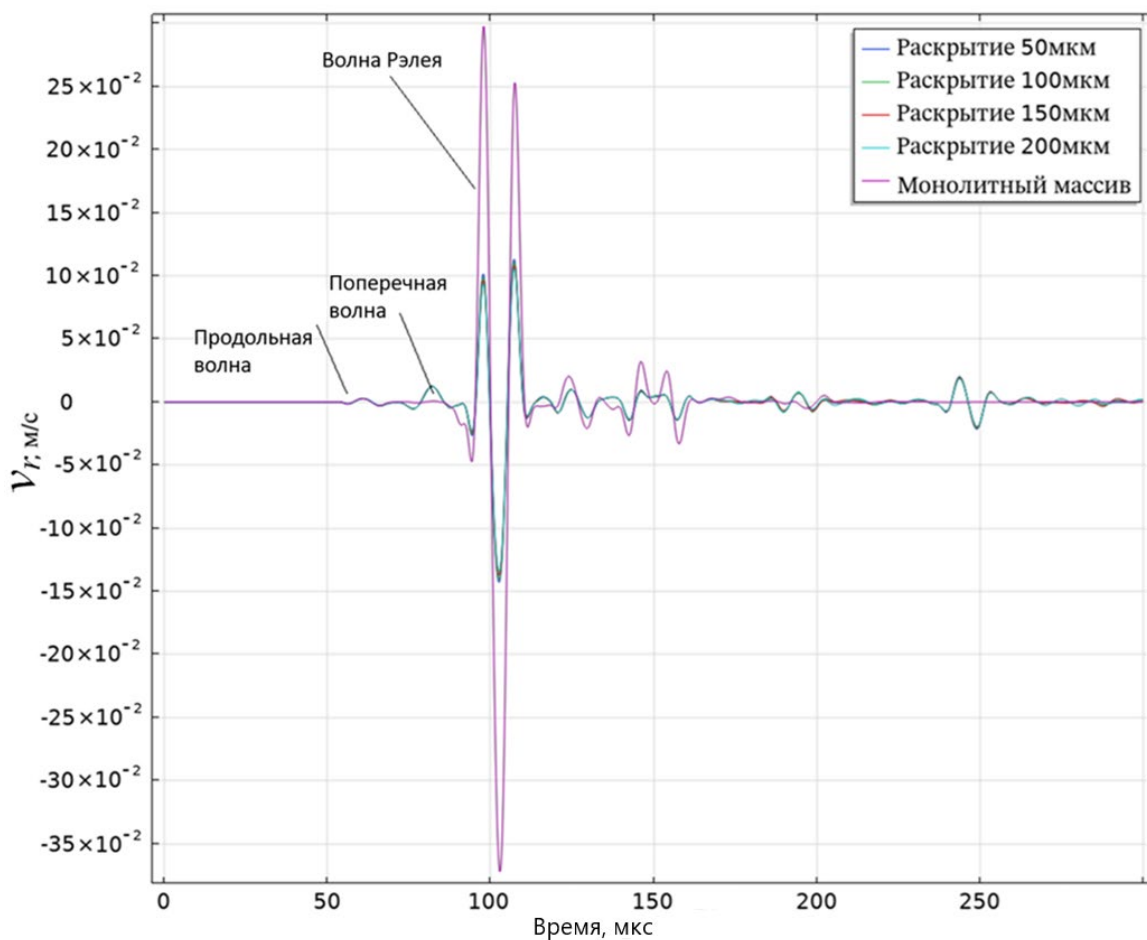


Рисунок 3.5 – Полные волновые формы зарегистрированных импульсов для случаев монолитного массива и наличия водозаполненной трещины различного раскрытия

Как видно из рисунка 3.5 на волновых картинах 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  $z = \rho_s c_p$ . В данном случае очевидно, что количество таких границ не меняется. Также при увеличении раскрытия трещины заметных изменений в форме волны не происходит, что объясняется незначительным раскрытием трещины, а именно 50-200 мкм, по сравнению с длиной продольной волны – 3.6 см.

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

При этом сам факт наличия трещины должен оказывать влияние на частотные характеристики упругой волны, в следствие переотражений в водной среде внутри трещины, а также превращений поперечной волны в продольную на границе порода/вода и обратно на границе вода/порода.

Для проверки данного предположения была произведена обработка волновых фронтов в программной среде MathCad. Результаты расчёта амплитудно-частотного спектра смоделированных случаев представлены в графическом виде на рисунке 3.6.

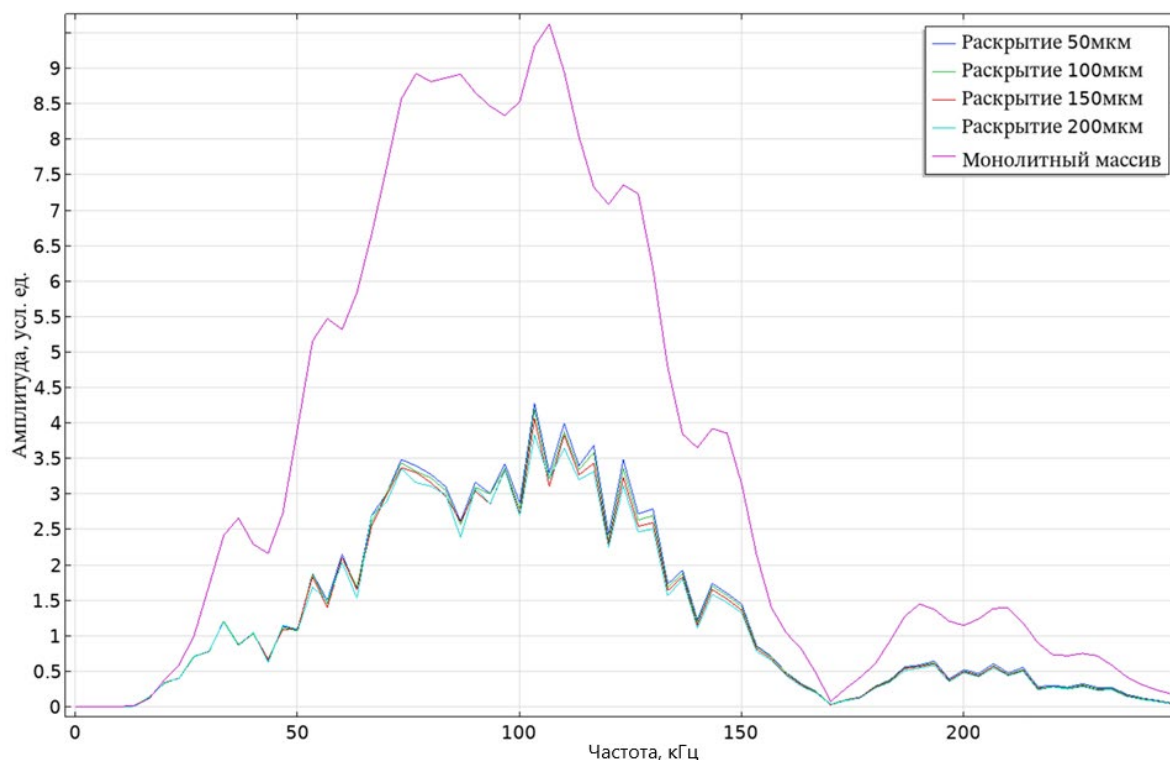


Рисунок 3.6 – Амплитудные спектры для монолитного участка и участков с трещиной

Из рисунка 3.6 видно, что в спектре волны, полученной при моделировании случая отсутствия трещины, выделяется высокоамплитудная область на частотах 70-80 кГц и амплитудный пик на частоте 106 кГц. При появлении водозаполненной трещины амплитуда указанных области и пика испытывает резкое снижение. Также заметно, что увеличение раскрытия трещины от 50 мкм вплоть до 200 мкм, не оказывает значительного влияния на спектр упругой волны. При построении спектра сигнала использовался весь фронт волны длительностью 300 мкс, имеющий в себе переотражённые волны от границ трещины. Для избавления от зашумления рассмотрим спектр сигнала на ограниченном участке волнового фронта длительностью 150 мкс, представленный на рисунке 3.7. Полученный спектр представлен на рисунке 3.8

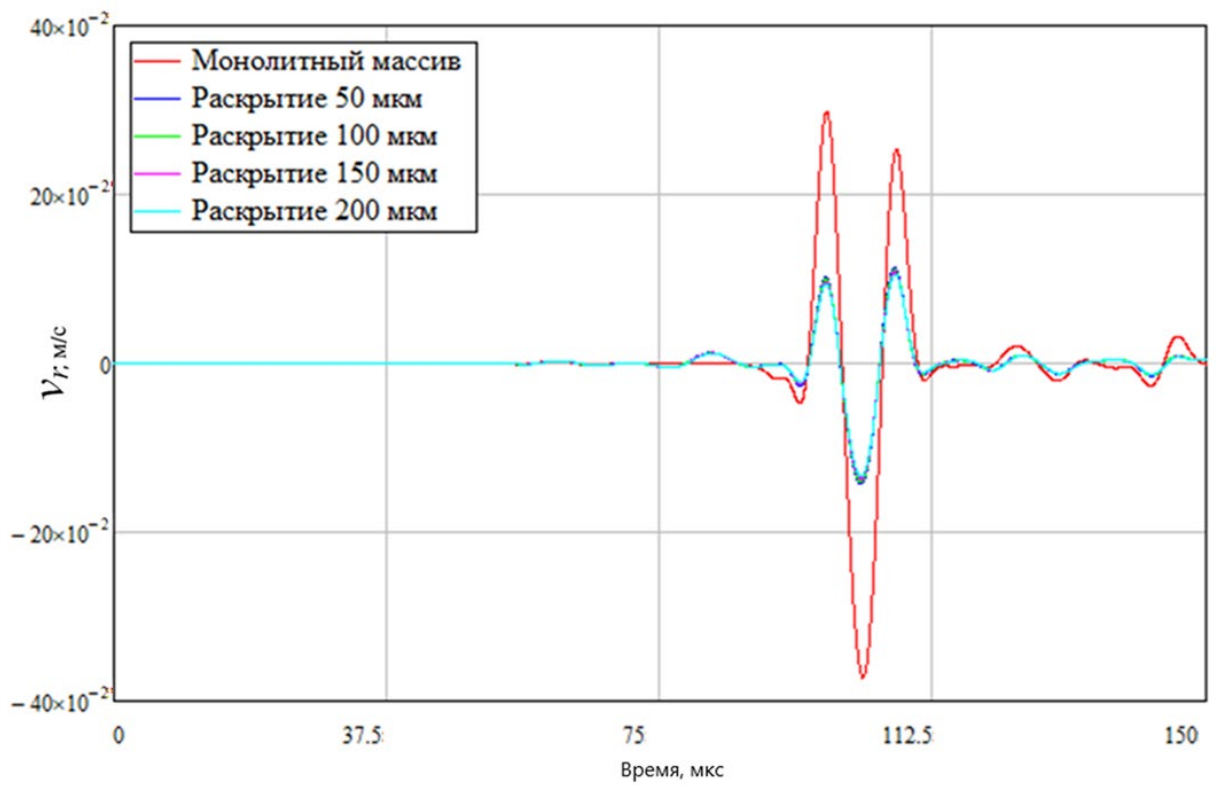


Рисунок 3.7 – Зарегистрированные волновые формы в момент времени 150 мкс

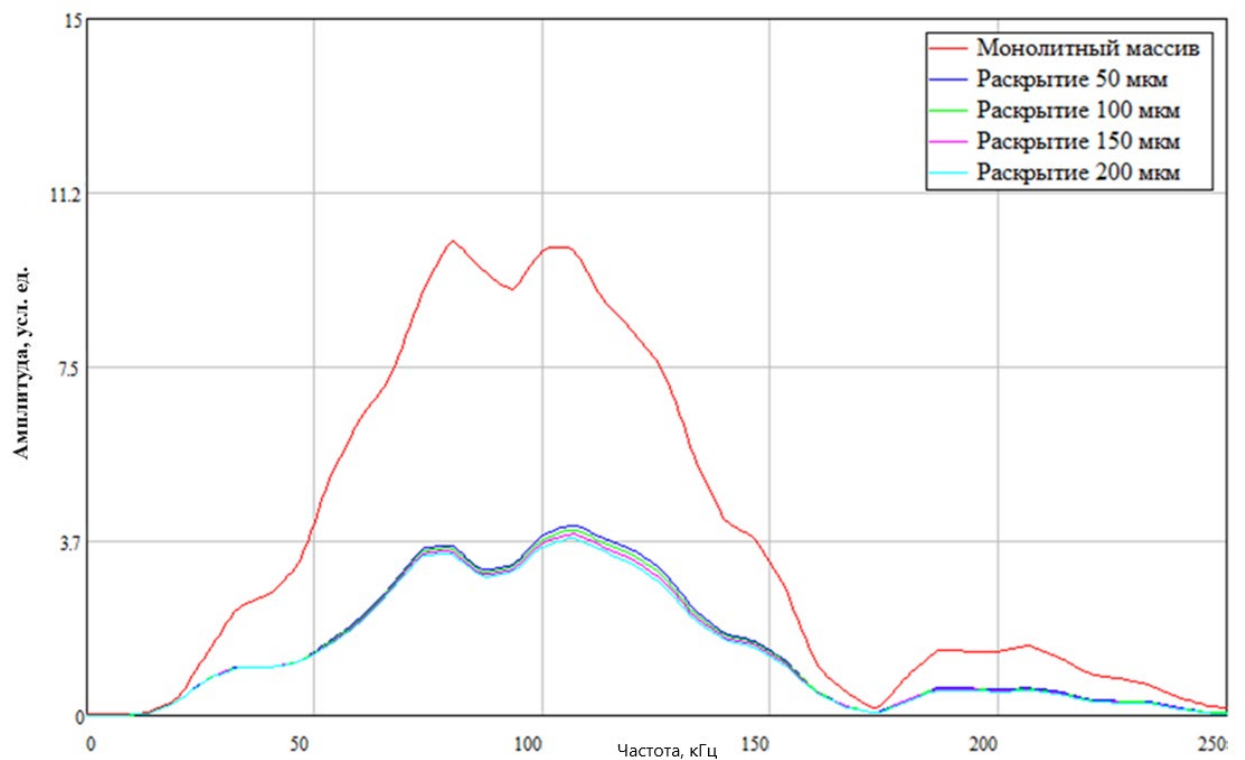


Рисунок 3.8 – Амплитудные спектры для монолитного участка и участков с трещиной фронтов волн, зарегистрированных в момент времени 150 мкс

Из рисунка 3.8 видно, что в спектре части волны длительностью 150 мкс, полученной при моделировании случая отсутствия трещины, также выделяется две высокоамплитудных области на частотах 80 кГц и 106 кГц. При сокращении длительности анализируемого сигнала в спектре волн, пройденных через трещину раскрытием 50-200 мкм, явно стали выделяться похожие высокоамплитудные области на тех же частотах. 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. Примечательно, что при дальнейшем увеличении раскрытия трещины данное снижение амплитуды на частоте 80 кГц уменьшается незначительно, а именно на 5%, что указывает на достижение определенного порога влияния трещины на акустические характеристики.

При этом наблюдается, что второй спектральный максимум, расположенный в районе 106 кГц, с увеличением раскрытия водозаполненной трещины уменьшается на большее значение, а именно на 7%, что может свидетельствовать о более сложной зависимости его характеристик от параметров трещиноватости.

С целью определения влияния среды и трещины в моделируемой среде на спектр пройденной упругой волны был рассчитан спектр волны на входе в среду на границе «протектор излучающего преобразователя–среда» (Рисунок 3.9).

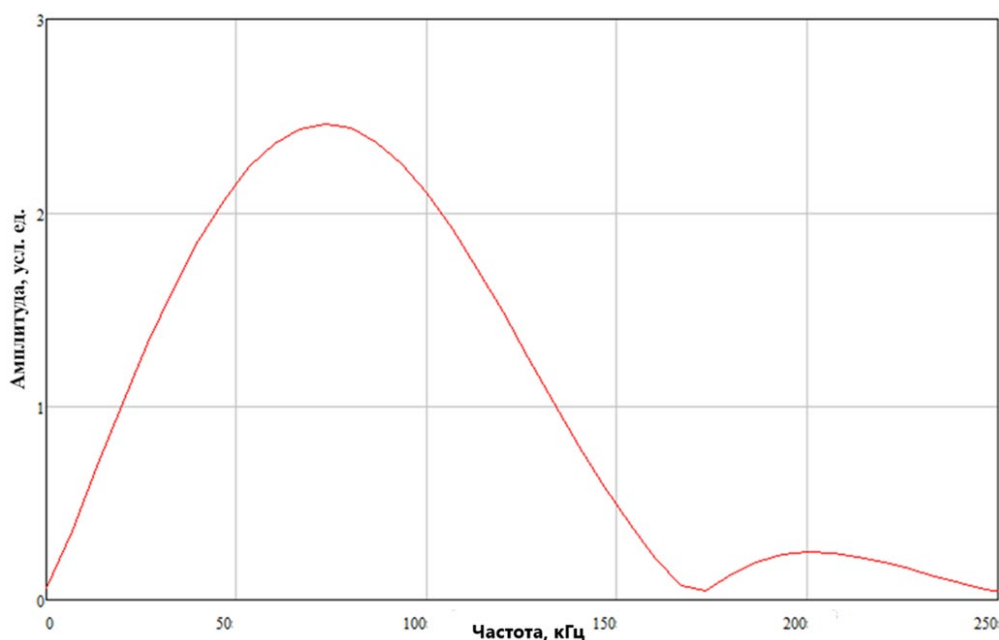


Рисунок 3.9 – Спектр упругой волны на границе «протектор излучающего преобразователя–среда»

Спектр начального сигнала не имеет двух характерных областей частот с повышенными амплитудами. Амплитудный максимум расположен на частоте 73.3 кГц. Что говорит о том, что выделенные области частот с повышенными амплитудами являются следствием воздействия моделированного массива и трещин раскрытием 50-200 мкм на пройденную через них упругую волну. Результаты данного исследования представлены [101].

Тем самым подтверждается третье научное положение. Новизна исследования заключается в обосновании перечня информативных характеристик упругой волны, получаемых при проведении ультразвукового каротажа в неводозаполненной скважине, по которым можно судить о наличии единичной водозаполненной трещины в массиве горных пород.

### **3.4 Выводы**

По результатам проведения компьютерного моделирования методом конечных элементов выделения водопроводящей трещины в ходе проведения ультразвукового каротажа неводозаполненной скважины установлено, что при появлении водозаполненной трещины происходит существенное падение амплитуды волны Рэлея в 2,5 раза.

Спектральный анализ показал, что в спектре явно выделяются 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 составляет не менее 2,8 и 2,5 раза, что эквивалентно падению на 64% и 59% соответственно.

Особенно заметным является значительное снижение амплитуды пика в районе 80 кГц в 2,8 раза, что эквивалентно уменьшению на 64% относительно исходных значений. Примечательно, что при дальнейшем увеличении раскрытия трещины данное снижение амплитуды уменьшается незначительно, а именно на 5%, что указывает на достижение определенного порога влияния трещины на акустические характеристики.

Второй спектральный максимум, расположенный в районе 106 кГц, также демонстрирует снижение амплитуды, однако в меньшей степени – в 2,5 раза (на 59% от исходного значения). При этом наблюдается, что с увеличением раскрытия водозаполненной трещины происходит постепенное и уже большее уменьшение амплитуды гармоник данного пика на 7%, что может свидетельствовать о более сложной зависимости его характеристик от параметров трещиноватости.

Таким образом установлено, что критерием выделения водозаполненной 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.

## **4 Создание скважинного акустического зонда и необходимых дополнительных технических устройств**

### **4.1 Состав и назначение зонда**

Ультразвуковые исследования массива позволяют получать оперативную информацию о строении и состоянии приконтурного массива горных пород. При этом по сравнению с методами межскважинного прозвучивания, акустический каротаж обладает рядом неоспоримых преимуществ: отсутствие необходимости бурить парные скважины (и, как следствие, проводить дополнительные инклинометрические измерения), относительная простота обработки и наглядность получаемых результатов, низкая трудоемкость проведения измерений. Однако наряду с достоинствами при реализации каротажа в скважинах незаполненных водой существует ряд особенностей, связанных в первую очередь с процессом ввода упругих колебаний в породный массив и их приема после прохождения исследуемого участка. В этом случае к оборудованию для реализации ультразвукового каротажа 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 указанные выше требования были учтены при создании каротажного оборудования (основные конструктивные решения подробно рассмотрены в пунктах 4.2 – 4.4). Разработанный акустический зонд предназначен для проведения каротажных ультразвуковых измерений в неводозаполненных скважинах диаметром 76 мм. Общий вид скважинного зонда представлен на рисунке 4.1.

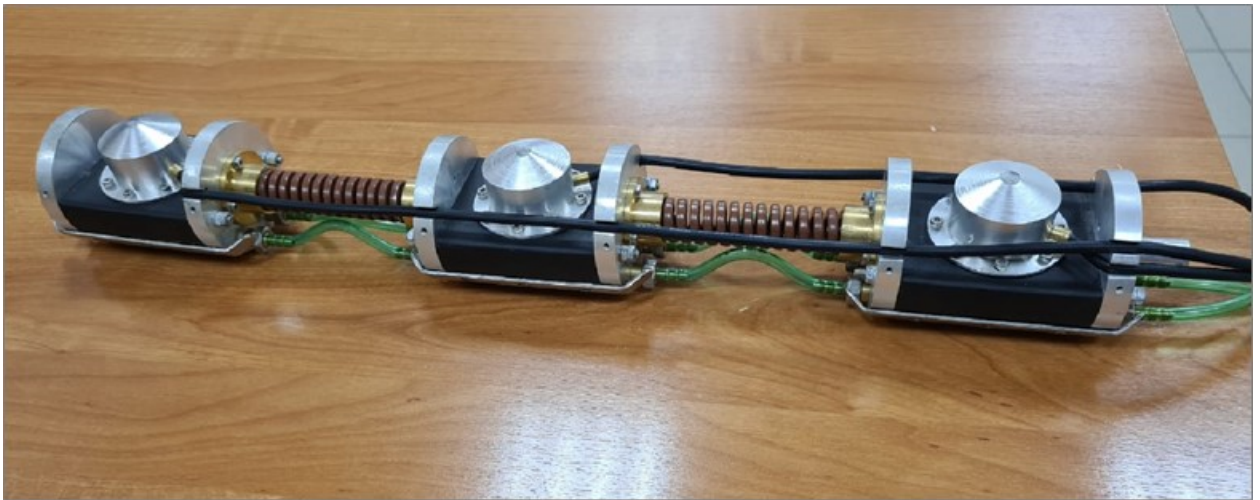


Рисунок 4.1 – Общий вид скважинного зонда

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. Скважинный зонд предназначен для работы в составе каротажного комплекса, состоящего из самого зонда, низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н, пневматического насоса, коммутатора, а также вспомогательного оборудования (комплекта быстроразборных досылочных штанг, транспортировочных чехлов, набора запасных частей для оперативного ремонта в полевых условиях). Блок-схема разработанного каротажного комплекса представлена на рисунке 4.2.

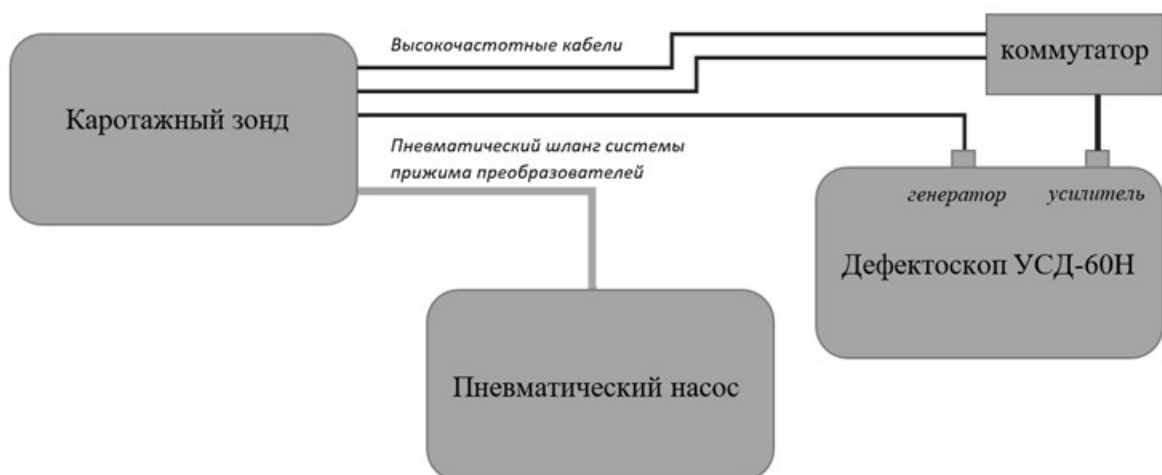


Рисунок 4.2 – Блок-схема каротажного комплекса

Разработанный каротажный комплекс позволяет производить измерения таких основных информативных параметров ультразвукового контроля как скорость продольной волны  $c_p$ , амплитуда первого вступления  $A_p$ , положение максимума спектра  $f_{max}$ . Кроме того, программное обеспечение дефектоскопа УСД-60Н позволяет сохранять зарегистрированные волновые формы в память прибора. Результаты разработки ультразвукового каротажного зонда изложены в [102].

## 4.2 Акустические развязки

Акустические развязки в разработанном зонде выполняют две основные функции – обеспечивают механическую связь между модулями и предотвращают распространение зондирующих импульсов от излучателя к приемнику через конструктивные элементы зонда. В предлагаемой конструкции предлагается использовать гибридный подход, заключающийся в максимальном удлинении пути распространения УЗ импульсов, а также использовании материалов с высокими коэффициентами затухания. Кроме того, на пути распространения упругих колебаний предусмотрены многочисленные границы с контрастными значениями акустических импедансов. Схематически акустический тракт по конструкции зонда проиллюстрирован рисунком 4.3.

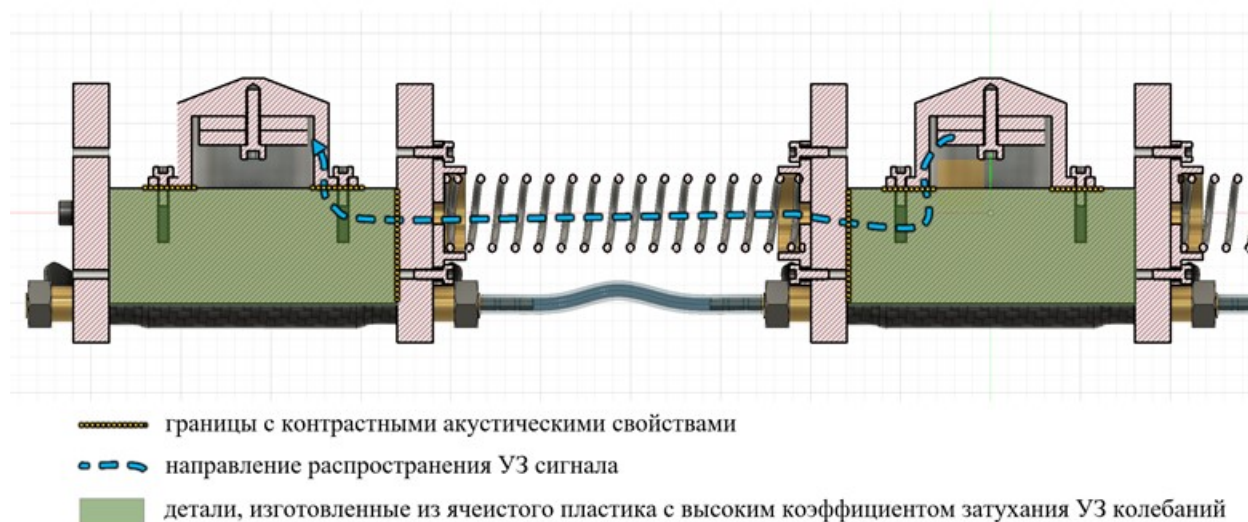


Рисунок 4.3 – Акустический тракт в пределах скважинного зонда

За удлинение пути распространения УЗ импульсов отвечает стальная пружина, которая также обеспечивает механическую связь между модулями и некоторую степень подвижности. Время распространения продольной волны в используемой пружине составляет 207 мкс. При контроле скальных пород с характерными значениями  $c_p = 4000$

м/с на базе прозвучивания 200 мм (расстояние между преобразователями зонда) время первого вступления составляет 50 мкс. Таким образом, использование одной только пружины позволяет гарантировано оперировать сигналами, прошедшими через массив, сложенный породами со скоростями продольных волн  $c_p > 1000$  м/с. Однако применение в качестве основного материала для модулей специального пластика с ячеистой структурой, а также создание множества границ с контрастными акустическими свойствами позволило добиться полного затухания сигнала, проходящего по конструкции зонда от излучателя к приемнику. В этом случае можно утверждать, что зарегистрированные в процессе проведения каротажа сигналы отражают именно свойства геосреды и не подвержены помеховому влиянию. Для примера на рисунке 4.4 представлен сигнал, зарегистрированный зондом, подвешенным в воздухе. Из рисунка 4.4 видно, что наблюдаемое первое вступление сигнала происходит на 600 мкс, что соответствует скорости распространения звука в воздухе (331 м/с).

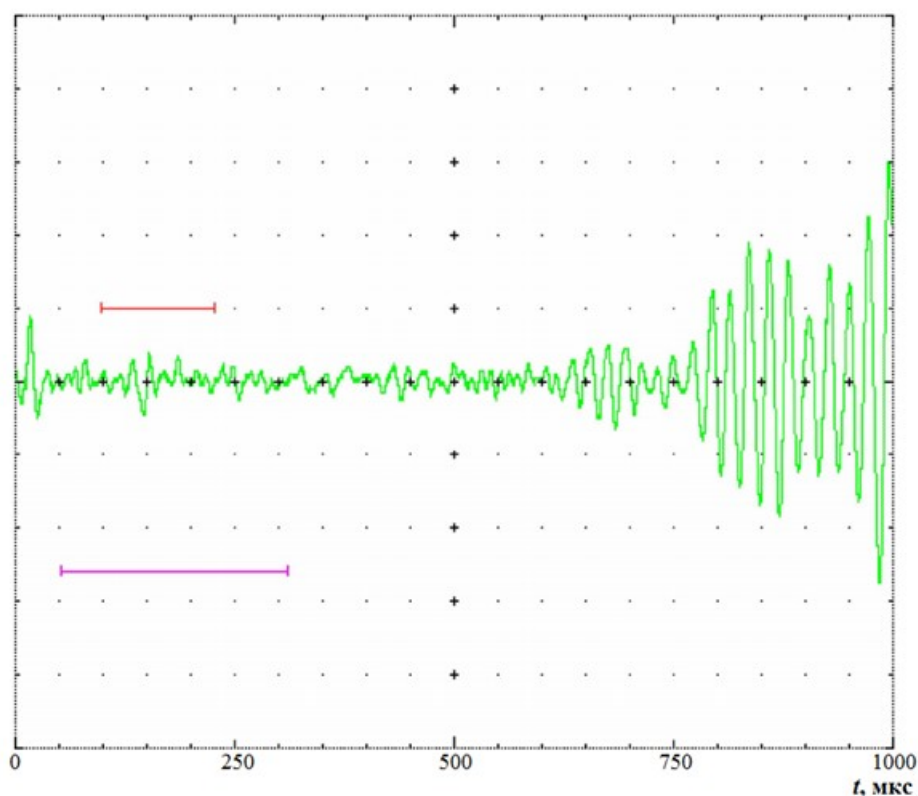


Рисунок 4.4 – Пример сигнала, зарегистрированного вне скважины

### 4.3 Ультразвуковые преобразователи

Акустические преобразователи изготавливались специально для зонда. Основу преобразователя формирует пакет пластин пьезокерамики марки ЦТС-19 толщиной 1,6 мм,

собранных на центральном армирующем стержне. Основные характеристики использованной пьезокерамики представлены в таблице 4.1 [103].

Таблица 4.1 – Основные характеристики использованных пьезоэлементов

Обозначение	Ед. изм.	ЦТС-19	Прим.
h	мм	1,6	Толщина
$T_k$	°С	290	Температура точки Кюри;
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	-	1750	Относительная диэлектрическая проницаемость
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	-	1450	Относительная диэлектрическая проницаемость
tg $\delta$ , не более	%	2,5	Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при $E=25$ кВ/м;
$Q_m$	-	80	Механическая добротность планарной моды колебаний
$V_{E_1}^E$	$10^3$ м/с	3,0	Скорость звука
$\sigma_p$	-	0,37	Планарный коэффициент Пуассона;
$k_p$	-	0,55	Коэффициент электромеханической связи планарной моды
$k_{15}$	-	0,60	Коэффициент электромеханической связи сдвиговой моды
$k_{33}$	-	0,67	Коэффициент электромеханической связи моды растяжения-сжатия по толщине
$d_{31}$	$10^{-12}$ Кл/Н	-170	Пьезоэлектрический модуль
$d_{33}$	$10^{-12}$ Кл/Н	350	- // -
$d_{15}$	$10^{-12}$ Кл/Н	400	- // -
$g_{31}$	$10^{-3}$ В*м/Н	-11,0	Электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема)
$g_{33}$	$10^{-3}$ В*м/Н	22,6	Электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема)
$T_{раб}$	°с	200	Максимальная рабочая температура
$\rho_v$ , не менее	При 100°С, $10^8$ , Ом*м	1,0	Удельное объемное электрическое сопротивление;
$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,5	Плотность

Амплитудно-частотная характеристика преобразователя представлена на рисунке 4.5, резонансная частота составляет 80 кГц. При этом стоит ожидать снижение частоты максимума спектра при прохождении ультразвукового сигнала через горные породы. Однако даже в случае такого снижения будет выполняться условие нахождения трех длин волн на базе прозвучивания.

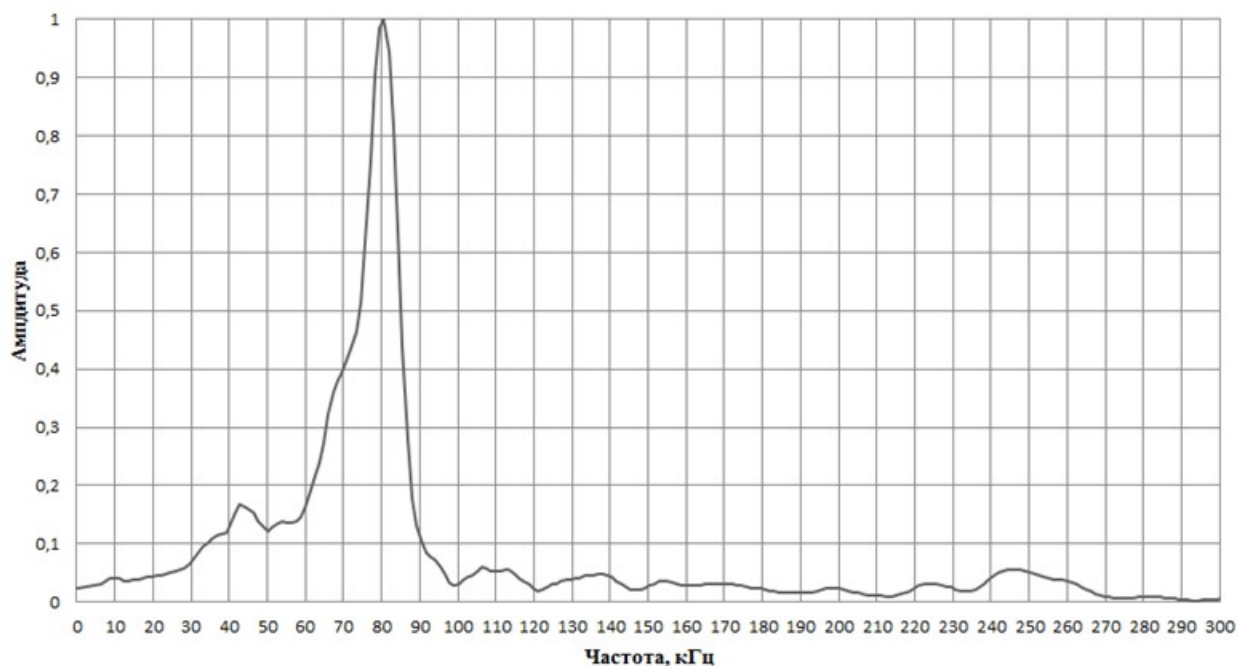


Рисунок 4.5 – Амплитудно-частотная характеристика акустического преобразователя

Особого внимания заслуживает форма протектора преобразователя. В практике ультразвуковых измерений для прямых преобразователей используется два типа протекторов – плоские, изготовленные из оргстекла, керамики или металла и точечные, изготавливаемые, как правило, из керамики. Первый тип преобразователя обеспечивает низкие потери энергии вводимого в объект контроля акустического сигнала из-за высокой площади контакта на границе «протектор-объект контроля» и обязательного применения специальных контактных жидкостей. Кроме того, в соответствии с ГОСТ Р55724-2013 шероховатость поверхности должна быть не хуже  $R_z40$  [104]. Очевидно, что в условиях скважинных измерений использование контактных жидкостей, а также абразивная подготовка поверхности невозможна. Более того, неизбежные неровности стенки скважины будут приводить к непостоянству контактных условий при сухом контакте преобразователей с большой площадью контакта. В известной степени этой проблемы лишены преобразователи с сухим точечным контактом. Однако уменьшение площади контакта фактически до одной точки приводит к значительным потерям энергии вводимого в среду УЗ импульса.

К конструкции разработанного зонда применена технология квазиточечного контакта. В этом случае протектор имеет криволинейную поверхность, малый участок которого повторяет геометрию стенки скважины. Площадь контакта составляет  $\approx 28 \text{ мм}^2$ . При этом достигаются оптимальные (с точки зрения потерь энергии) условия ввода и

приема ультразвуковых колебаний. Форма протектора преобразователя проиллюстрирована рисунком 4.6.

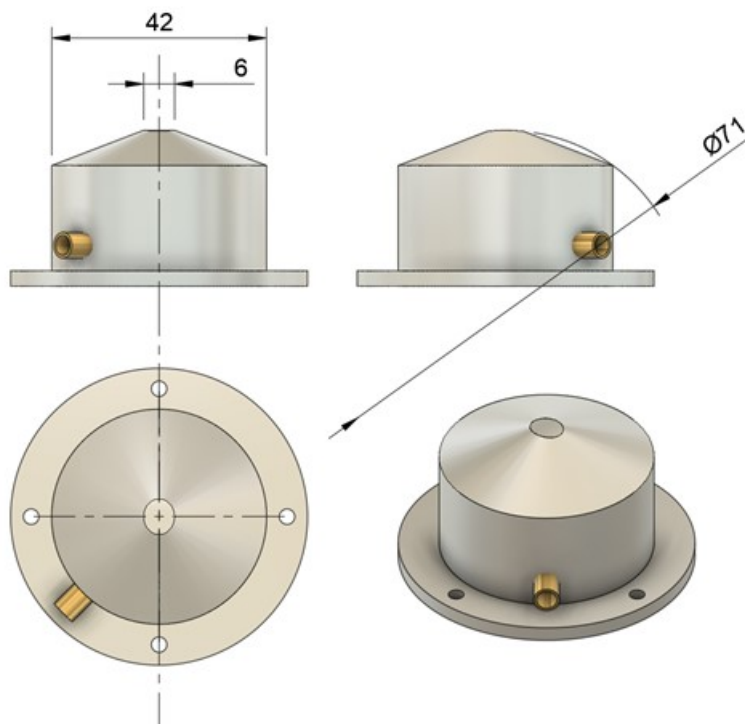


Рисунок 4.6 – Форма протектора преобразователя

Подключение преобразователей ко входу усилителя дефектоскопа осуществляется напрямую с помощью радиочастотного кабеля типа РК 50-2-11 [105], либо через коммутирующее устройство (в случае использования двух приемных преобразователей).

#### 4.4 Система пневматического прижима преобразователей

В практике каротажа вертикальных скважин контакт акустических преобразователей с массивом осуществляет через жидкость – воду или буровой раствор. К сожалению, при каротаже горизонтальных скважин осуществить жидкостный контакт не представляется возможным. В этом случае используется сухой контакт с применением различных прижимных устройств. В практике УЗ геоконтроля наибольшее распространение получили системы пневматического прижима преобразователей, в первую очередь из-за компактности таких решений и простоты обеспечения одинакового усилия прижима нескольких преобразователей. Однако у таких систем присутствует ряд недостатков. В качестве основного силового элемента обычно применяют компактные пневмоцилиндры. Однако у такого решения есть один важный недостаток. При многократных измерениях в зазор между цилиндром и штоком набивается пыль и остатки

пород, что может привести к заклиниванию цилиндра. В худшем случае это может привести к невозможности извлечь зонд из скважины.

В конструкции разработанного зонда используется новая технология пневмоприжима, основанная на применении так называемых искусственных пневматических мышц (*pneumatic artificial muscles*) [106]. Они представляют собой устройства, состоящие из эластичной трубки (в данном случае термопластичной резины) и оплетки из нерастяжимых полиэстровых нитей. При подаче давления в трубку происходит сокращение ее длины с одновременным увеличением диаметра. Принцип работы прижимного устройства зонда поясняется рисунком 4.7.

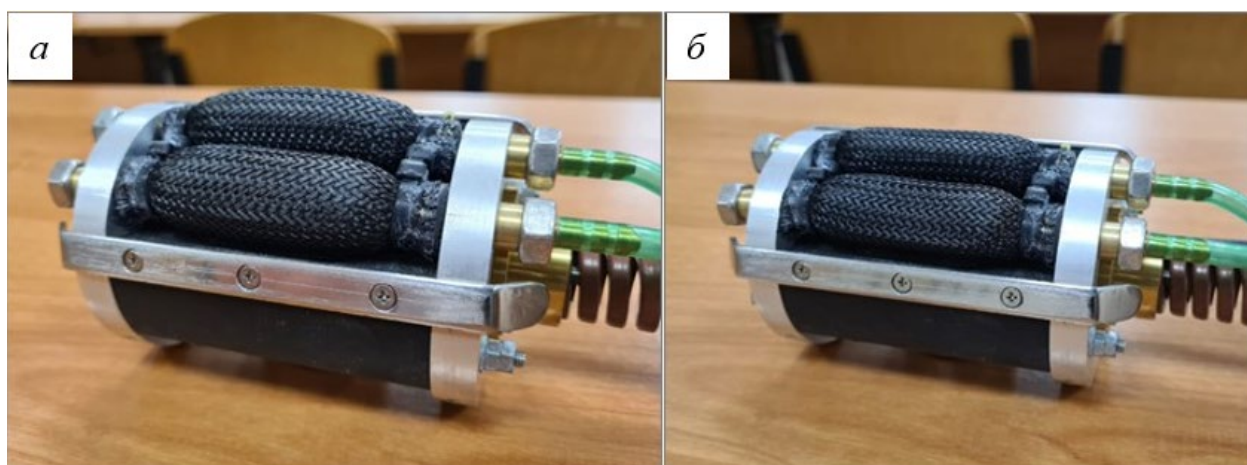


Рисунок 4.7 – Прижимное устройство зонда под давлением (а) и без него (б)

Предлагаемое техническое решение обладает рядом преимуществ: ремонтпригодность в полевых условиях; минимальное количество движущихся частей исключает возможность заклинивания зонда после сброса давления в системе; оплетка физически ограничивает расширение эластичной трубки, поэтому даже при увеличении давления в системе выше 3 атм. давление прижима преобразователя на стенку скважины изменяться не будет. Последнее является важной особенностью, позволяющей гарантировать постоянство акустического контакта на границе «преобразователь – стенка скважины». Подача давления в систему осуществляется с помощью пневматического насоса, оснащенного клапаном для сброса воздуха после завершения акустических измерений.

#### 4.5 Выводы

Разработан и изготовлен ультразвуковой каротажный зонд, подходящий для работы в условиях неводозаполненных горизонтальных скважин. Для работы в вышеуказанных условиях были в конструкции зонда были применены следующие подходы:

– Для избавления от паразитных колебаний, распространяющихся по конструкции зонда от излучателя к приёмнику, в качестве основного материала для модулей использовался специальный пластик с ячеистой структурой, а также на пути распространения волны было создано множество границ с контрастными акустическими свойствами;

– С целью удлинения удлинение пути распространения УЗ импульсов по корпусу зонда и для механической связи между модулями, а также обеспечения некоторой степени подвижности, была использована стальная пружина;

– Для достижения оптимальных (с точки зрения потерь энергии) условий ввода и приема ультразвуковых колебаний в конструкции протекторов приёмных и излучающего преобразователя применена технология квазиточечного контакта. В этом случае протектор имеет криволинейную поверхность, малый участок которого повторяет геометрию стенки скважины. Площадь контакта составляет  $\approx 28 \text{ мм}^2$ ;

– Для обеспечения механического прижима и необходимого давления прижима в конструкции зонда используется технология пневмоприжима, основанная на применении искусственных пневматических мышц.

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. Основные технические характеристики зонда представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики ультразвукового каротажного зонда

Характеристика	Значение
База прозвучивания, мм	205
Резонансная частота преобразователей, кГц	80
Максимальная глубина измерительной скважины, м	15
Рабочее давление системы прижима, атм.	3
Общая длина зонда без досылочных устройств, мм	520

## **5 Исследование влияния единичной водозаполненной трещины на спектральные характеристики упругой волны в ходе физического моделирования**

Физическое моделирование предполагает симуляцию в физической модели аналогичных измеряемых в конкретном эксперименте или исследовании физических полей, тех же самых, что действуют в натурном объекте, но изменённых в абсолютных значениях соответственно принимаемому масштабу моделирования. Основным преимуществом использования физического моделирования при проведении экспериментов является возможность прямого наблюдения за моделируемыми процессами и явлениями [107, 108].

Для того чтобы процесс в модели был подобен процессам в природе, необходимо и достаточно выполнить следующие требования [109, 110]:

- 1) модель должна быть геометрически подобна образцу;
- 2) процессы в модели и образце должны принадлежать к одному классу и описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями;
- 3) начальные и граничные условия в модели должны быть реализованы таким образом, чтобы безразмерные начальные и граничные условия модели тождественно совпадали с такими же условиями в природе;
- 4) одноименные безразмерные параметры, входящие в дифференциальные уравнения, начальные и граничные условия, в модели и в природе должны быть соответственно равны.

Сделаем некоторые замечания относительно реализации граничных условий при моделировании. Все граничные условия по признаку их реализации можно разделить на две категории: управляемые и неуправляемые [111]. Первые могут быть реализованы по желанию исследователя; вторые же реализуются независимо в силу самой природы физического явления.

Например, для процесса распространения упругих волн в массиве горных пород граничные условия могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) в массив излучается сигнал с вполне определённой частотой;
- 2) точки контакта излучающих и принимающих преобразователей заранее определены;

3) сигнал распространяется в массиве горных пород со скоростью, зависящей от свойств среды.

Нетрудно заметить, что из вышеперечисленных граничных условий, условия 1) и 2) являются управляемыми и их способ выполнения зависит от желания исследователя. Условие 3) имеет место всегда и обуславливается физикой самого явления распространения упругих волн в различных средах. Что же касается начальных условий, то они всегда являются управляемыми.

Для моделирования различных процессов, проходящих в массиве горных пород, широко применяется метод эквивалентных материалов (МЭМ) [112]. Данный метод был разработан во ВНИМИ Г. Н. Кузнецовым. В основу метода легла идея изготовления физических моделей массивов горных пород из искусственных материалов, близких или имеющих сходные физико-механические свойства с рассматриваемым массивом горных пород [113, 114, 115].

Основной задачей проводимого нами физического моделирования каротажных измерений являлось установление влияния трещиноватости пород ПИЛ на параметры ультразвуковых сигналов, распространяющихся вдоль стенки скважины.

На сегодняшний момент исследователями накоплен разнообразный опыт конструирования физических моделей, содержащих трещины различных параметров.

Одним из распространенных подходов моделирование трещиноватых сред при ультразвуковых исследованиях является использование пакетов из листов плексигласа. Так в [116] было показано, что листы плексигласа, серийно выпускаемые промышленностью, обладают некоторой технологической нестабильностью толщины. Данная особенность пластин, толщина которых значительно меньше длины волны, при сборке в пакет и при различных сжатиях пакета позволяет варьировать размер щелей, таким образом становится возможным изменять эффект проницаемости. В работе [117] в развитие вышеприведенного способа при конструировании модели вертикальной трещиноватости предложена новая конструкция пластинчатой модели с управляемыми параметрами трещиноватости. Это было достигнуто вводом в промежутки между контактами вертикальных пластин прослоек из акустически прозрачной тонкой фольги, вырезами в которой имитируются трещины, а их “раскрытость” определяется толщиной прослоев.

Достоинством подобного метода можно считать довольно точный механизм управления раскрытием трещин, однако однородность плексигласа, а также существенное отличие акустической жесткости (произведения скорости продольной волны на плотность

материала) по сравнению с породами ПИЛ не позволяет использовать подобный подход для создания физической модели для исследования особенностей проведения УЗ каротажа.

Другим подходом к физическому моделированию трещиноватого массива для УЗ измерений можно считать изготовление бетонных цилиндров с центральной скважиной. В работе [118] были созданы модели трещиноватых скважин, при этом в качестве трещин выступали силиконовые диски, закладываемые в модель на этапе заливки. Использование бетона в качестве модельного материала является более предпочтительным из-за большей близости акустических свойств к породам ПИЛ. Однако использование в качестве моделей трещин силиконовых дисков не отвечает задачам каротажных измерений в условиях ПИЛ, т.к. основной интерес представляют протяженные трещины, способствующие дренажу воды в приконтурной области.

Таким образом, для проведения УЗ каротажных исследований необходимо создание физической модели, представляющей собой бетонный цилиндр с центральной скважиной, содержащий магистральные трещины с различным раскрытием и типом заполнения.

### **5.1 Разработка и создание физической модели скважины для проведения лабораторных исследований**

Для проверки работоспособности разрабатываемого зонда была выполнена серия экспериментов на специально разработанной физической модели. Последняя отражала строение горизонтальной скважины с диаметром, принятым для бурения в выработках ПИЛ. В задачи физического моделирования входит:

- общая проверка работоспособности зонда;
- оценка эффективности пневматической системы прижима преобразователей;
- изучения влияния различных типов трещин на параметры ультразвуковых сигналов;
- выбор оптимальных информативных параметров УЗ каротажа.

Для проведения испытаний зонда была создана физическая модель скважины, схема которой представлена на рисунке 5.1.

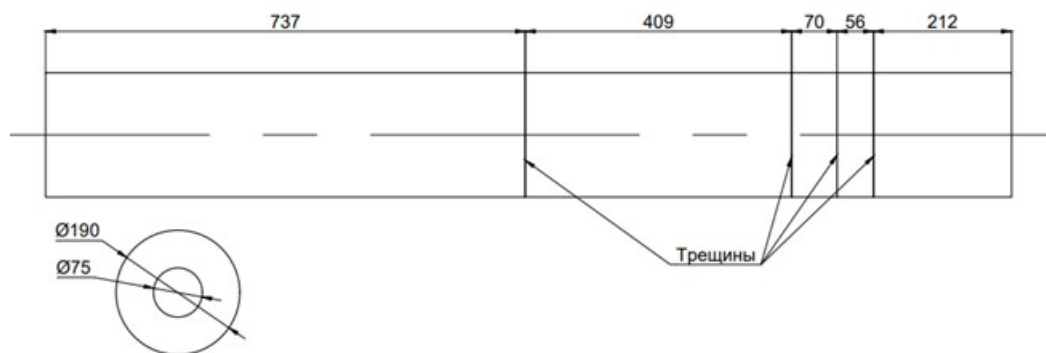


Рисунок 5.1 – Схема конструкции физической модели скважины

Модель скважины представляла собой участок массива, изготовленный из модельного материала, с оборудованной в нем измерительной скважиной. При этом при выборе модельного материала следует учитывать следующее условие: в модели и натуре отношение скоростей распространения поперечных и продольных волн должно быть одинаковым;

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/м<sup>3</sup>. Таким образом, акустический импеданс  $z$  равен  $7,8 \cdot 10^6$ .

Каротажные измерения характеризуются изучением приповерхностного слоя пород в скважине. Большая часть энергии УЗ колебаний сконцентрирована в слое пород вокруг скважины, сопоставимым с длиной волны. Исходя из резонансной частоты преобразователей ( $f_p = 80$  кГц) и скорости продольной волны в модельном материале  $c_p \approx 3250$  м/с длина волны составляет  $\lambda = 40$  мм. Толщина «породного» слоя в прискважинной области физической модели составляла 60 мм.

Диаметр внутреннего отверстия модели был выбран равным 76 мм. Длина физической модели скважины была выбрана равной 1490 мм. Такая длина при длине зонда равной 520 мм позволяла провести серию экспериментов с различными условиями, такими как: однородный массив без нарушений; массив с единичной трещиной; массив с системой трещин – что позволит получить каротажную диаграмму протяжённостью, подходящей для получения необходимых данных для анализа влияния неоднородностей на излучаемый сигнал.

В качестве нарушений были выбраны магистральные трещины, пересекающие скважину и, разделяющие модель на различные блоки. Всего предполагалось моделирование четырёх трещин, одна из которых находится на достаточном удалении от трёх остальных. 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. Расстояние между тремя остальными трещинами выбиралось также исходя из расстояния между излучателем и приёмником сигнала, так чтобы одновременно все три трещины могли находиться на пути прохождения ультразвукового сигнала. Тем самым это позволяет смоделировать систему трещин пересекающую ось скважины в массиве горных пород ПИЛ.

Трещины в моделируемом массиве горных пород могут быть не только воздухозаполненные, но и иметь другие заполнители, такие как: вода, а также горные породы различной степени нарушенности.

В случае, когда трещина заполнена другой горной породой нарушения сплошности не происходит, при этом скорость распространения упругой волны в заполнителе мало отличается от скорости распространения в основном массиве и толщина включения мала, что приводит к незначительным изменениям во времени распространения сигнала от излучателя к приёмнику ультразвукового зонда. Поэтому имеет смысл в качестве заполнителя трещины при моделировании использовать воду и материал с низкими значениями  $c_p$  и  $\rho$  (например, глину), так как скорости распространения упругих волн в воде и глине достаточно малы, чтобы значительно оказать влияние на скорость распространения сигнала от излучателя к приёмнику ультразвукового зонда. Была изготовлена физическая модель, представленная на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Физическая модель в сборе

## 5.2 Проведение лабораторных испытаний скважинного зонда на физической модели скважины

В качестве измерительной аппаратуры для проведения лабораторных испытаний использовался ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н, представленный на рисунке 5.3.

Дефектоскоп УСД-60Н предназначен для:

- ультразвуковой дефектоскопии определения расслоений, внутренних дефектов структуры, пористости, трещин и прочих дефектов в изделиях из композитных и других материалов с большим затуханием (в том числе горных пород);
- определения скорости распространения и затухания УЗК в композитах, бетоне и пр.;
- измерения толщины объектов.



Рисунок 5.3 – Ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н

Конструкция используемого дефектоскопа предполагает использование двух высокочастотных разъемов типа BNC. Один разъем предназначен для подключения пьезопреобразователей к выходу генератора УЗ импульсов. Второй разъем предназначен для подключения приемного преобразователя к входным цепям усилителя. Для подключения к дефектоскопу двух приемных преобразователей было изготовлено

специальное коммутирующее устройство, представленное на рисунке 5.4. Использование коммутатора позволяет быстро переключаться между приемными преобразователями и продлить срок службы высокочастотных разъемов.



Рисунок 5.4 – Коммутирующее устройство

Для перемещения зонда в модельной скважине использовалась досыльная штанга с нанесенными на нее метками. Фото зонда с досыльной штангой приведено на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Зонд со штангой

Для работы прижимной пневматической системы использовался ножной насос, представленный на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Насос

#### 5.2.1 Описание процесса проведения

Зонд, с помощью закреплённой на нём штанги, помещался внутрь физической модели скважины так, чтобы торец зонда совпадал с торцом физической модели как это показано на рисунке 5.7. Затем происходила закачка воздуха в пневматическую прижимную систему, для обеспечения прижима пьезодатчиков к контуру физической модели. Экспериментально было установлено, что наиболее оптимальные и повторяемые контактные условия достигаются при давлении в пневматической системе, равным 2,5 – 3 атм. После фиксации зонда происходила регистрация сигнала на дефектоскопе, в который предварительно была внесена информация о параметрах зонда (база прозвучивания и задержка в протекторах пьезопреобразователей). Регистрация сигналов производилась с обоих приемных преобразователей поочередно, путём переключения «ключа» на коммутирующем устройстве.



Рисунок 5.7 – Начальное положения зонда в модели

В журнал наблюдений заносилась следующая информация о сигнале: скорость распространения продольной волны, она определялась по первому вступлению волны; частота спектрального максимума сигнала. Также заносилась информация о текущем положении зонда в скважине, которое определялась по расстоянию от устья скважины до торца зонда. В конце измерения в текущей точке сбрасывалось давление в пневматической прижимной системе через клапан.

Затем зонд двигался по скважине с шагом 5 см. На каждом шаге в журнал наблюдений заносилась информация о параметрах сигнала на каждом из принимающих датчиков и положении зонда. Испытания продолжались до того момента как противоположный торец зонда достигал торца физической модели скважины.

Испытания проводились в три этапа:

- 1) Трещины заполнены воздухом;
- 2) Трещины заполнены водой;
- 3) Трещины заполнены глиной.

Первый этап не требовал дополнительной подготовки. Испытания проводились по вышеописанному порядку действий.

Для достижения условий при проведении испытаний на втором этапе, торцы физической модели герметизировались и в модельную скважину заливалась вода. Так как предполагается использование зонда в не водонаполненных скважинах, вода вливалась от нижней границы модели до отверстия самой скважины, уровень воды показан на рисунке 5.8, так, чтобы трещины в нижней части модели были полностью заполнены водой. Далее испытания проводились согласно вышеописанному процессу. Съемка производилась преобразователями вниз.



Рисунок 5.8 – Физическая модель скважины, заполненная водой

При проведении испытаний на третьем этапе модель была разобрана и на торцы полученных блоков, которые совмещались с другими блоками и образовывали трещину, была равномерно нанесена глина ( $c_p = 1500$  м/с,  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>) слоем 2 мм как это показано на рисунке 5.9. Модель собралась обратно, блоки плотно прижимались друг к другу для избежания образования воздушных прослоек, и далее проводились испытания согласно вышеуказанному процессу.



Рисунок 5.9 – Блоки с нанесённой на их торцы глиной

## 5.2.2 Результаты каротажа модельной скважины с различными заполнителями

### Результаты каротажа модельной скважины без заполнения трещи

В процессе прозвучивания регистрировались сигналы, примеры волновых форм которых представлены на рисунках 5.10 и 5.11. Результаты каротажа представлены в таблице 5.1. Значение отметки отмеряется от начального положения зонда.

Таблица 5.1 – Результаты проведения каротажа на первом этапе

Отметка, мм	$V_p 1$ , м/с	$V_p 2$ , м/с	A1, усл.ед.	A2, усл.ед.
0	2990	3050	36	40
5	2980	3030	30	36
10	2980	3040	40	45
15	3000	3010	34	46
20	3010	3050	46	45
25	2960	3040	78	73
30	-	3040	-	72
35	-	3040	-	26
40	-	3030	-	46
45	-	3020	-	65
50	2970	-	22	-
55	2970	-	37	-
60	2970	-	74	-
65	2970	-	32	-
70	-	3060	-	60
75	-	2990	-	31
80	-	3030	-	41

Отметка, мм	$V_p 1$ , м/с	$V_p 2$ , м/с	A1, усл.ед.	A2, усл.ед.
85	-	2990	-	39
90	-		-	-
95	-	-	-	-

Примечание: Дальний преобразователь нумеруется цифрой 1, ближний – цифрой 2

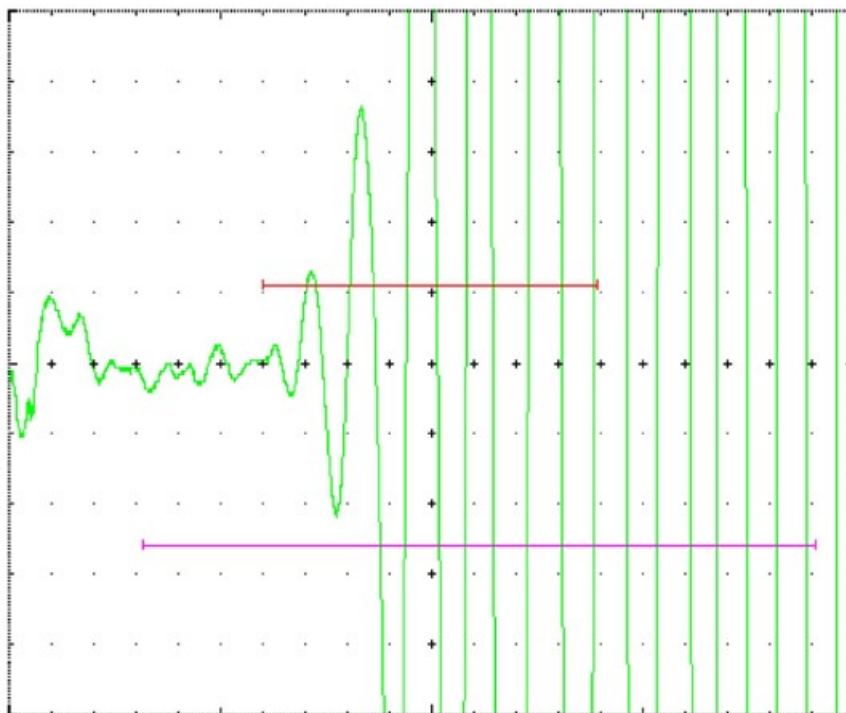


Рисунок 5.10 – Форма сигнала, зафиксированная в ненарушенном массиве

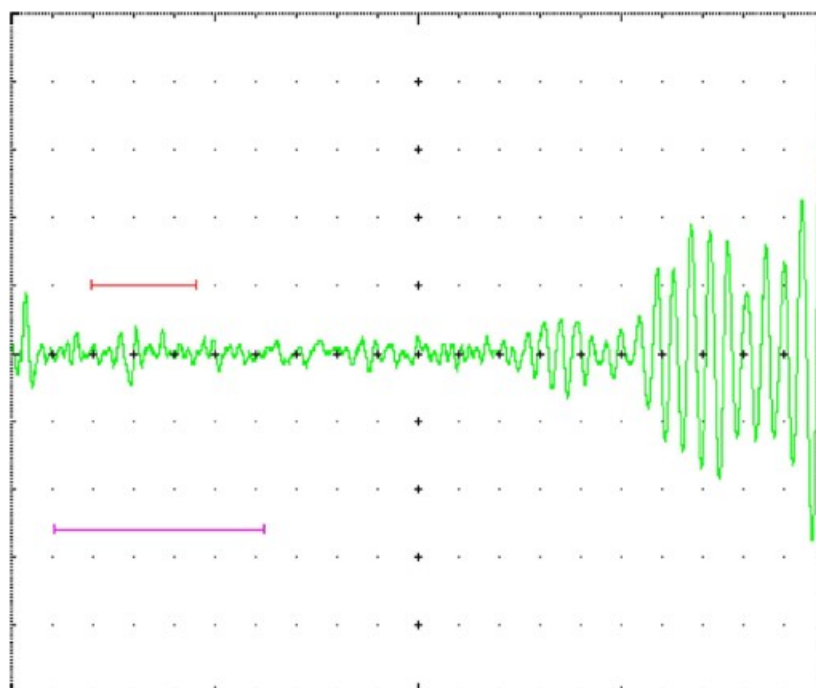


Рисунок 5.11 – Форма сигнала, зафиксированная на трещине, заполненной воздухом

Полученные данные привязывались к отметкам физической модели исходя из геометрических параметров зонда и строилась каротажная диаграмма, приведенная на рисунке 5.12. Отметка расстояния от торца скважины бралась как расстояние от торца скважины до дальнего датчика в паре.

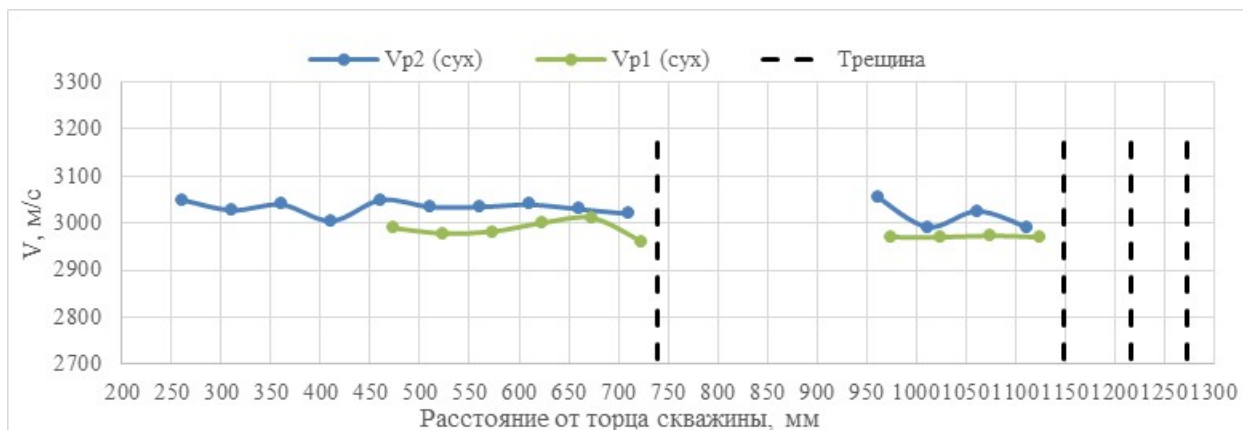


Рисунок 5.12 – Каротажная диаграмма, полученная на первом этапе

Из рисунка 5.12 видно, что на бездефектном участке  $V_p$  изменяется слабо вблизи значений 3150 м/с (коэффициент вариации  $\nu = 0,92$ ) до отметки 724 мм, что свидетельствует о достаточном постоянстве контактных условий на границе «преобразователь-массив». Далее каротажная кривая разрывается. Это связано с невозможностью выделения первого вступления продольной волны на фоне потерь энергии на воздухозаполненной трещине (пример соответствующей волновой формы приведен на рисунке 5.11). Разрыв продолжается до отметки 950 мм, где значения  $V_p$  восстанавливаются до исходных значений. Положение трещины в данном случае можно определить с абсолютной погрешностью, равной шагу измерений вдоль оси скважины по координате точки, после которой начинается разрыв каротажной кривой. В данном случае погрешность определения координаты составила 50 мм.

Второй разрыв каротажной диаграммы наблюдается после отметки 1120 мм, когда каротажный зонд входит в область системы трещин. В данном случае принципиального отличия от единичной трещины не выявляется т.к. и в этом случае выделение первого вступления продольной волны оказывается невозможным. С точки зрения разделения единичной трещины и системы трещин единственным различием будет протяженность зоны разрыва – для единичной трещины она будет равна базе прозвучивания  $l$ , а для системы трещин  $l + x$ , где  $x$  – расстояние между крайними трещинами в системе.

### Результаты каротажа модельной скважины с заполнением трещин водой

В результате проведения измерений были получены значения информативных параметров, занесенные в таблицу 5.2. Примеры волновых форм сигналов в бездефектной области и области, содержащей водозаполненную трещину приведены на рисунках 5.13 и 5.14 соответственно.

Таблица 5.2 – Результаты проведения каротажа на втором этапе

Отметка, мм	$V_{p1}$ , м/с	$V_{p2}$ , м/с	$A_1$ , усл.ед.	$A_2$ , усл.ед.
0	2910	3050	77	41
5	2930	3040	40	93
10	2910	3010	53	37
15	2910	2990	76	55
20	3000	3050	93	100
25	2960	2970	83	65
30	2530	2950	28	56
35	2510	2970	12	93
40	2480	3030	11	82
45	2510	2980	15	41
50	3060	2530	23	18
55	3090	2520	15	11
60	3040	2510	38	11
65	3040	2520	57	20
70	2480	3060	17	22
75	-	3100	-	50
80	-	3060	-	46
85	-	3020	-	57
90	-	2500	-	25
95	2500	-	20	-

Примечание: Дальний датчик нумеруется цифрой 1, ближний – цифрой 2

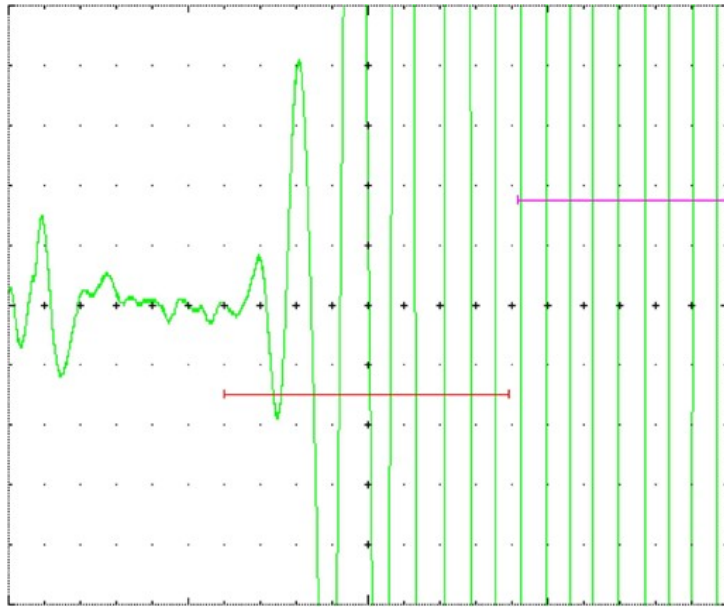


Рисунок 5.13 – Форма сигнала, зафиксированная в ненарушенном массиве

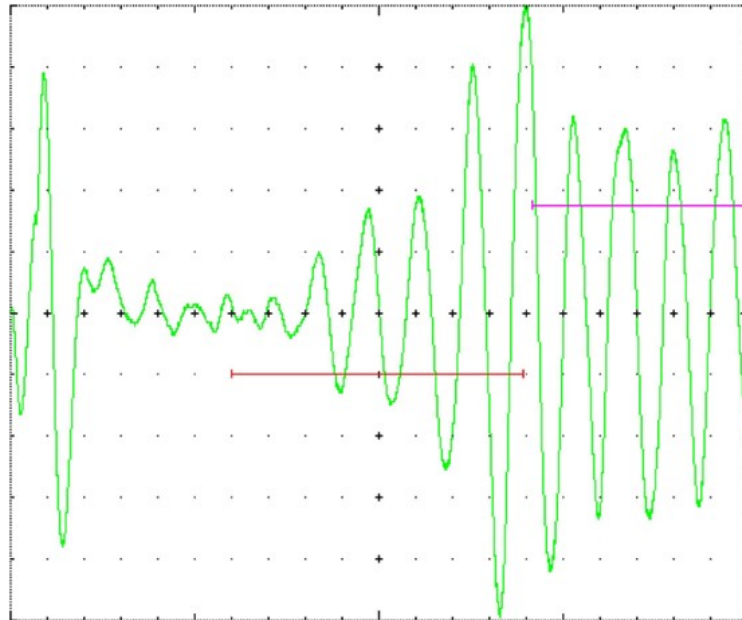


Рисунок 5.14 – Форма сигнала, зафиксированная на трещине, заполненной водой

На рисунке 5.15 приведена каротажная диаграмма, построенная по данным из таблицы 5.2.

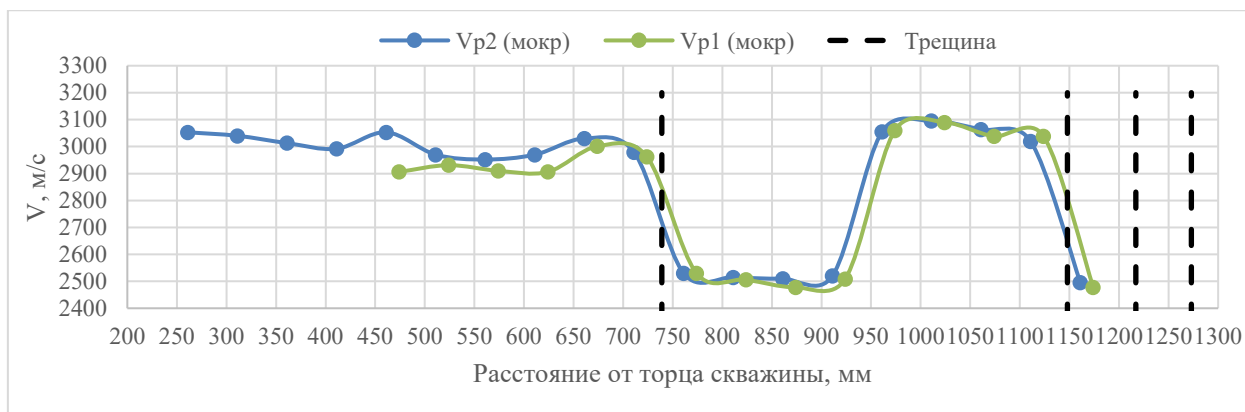


Рисунок 5.15 – Каротажная диаграмма, полученная на втором этапе

Основным отличием полученных каротажных диаграмм можно считать отсутствие разрывов кривых в зонах нахождения трещин. В указанных зонах наблюдается резкое падение значений  $V_p$  более чем на 30%. Такое падение не может быть обусловлено исключительно локальным снижением  $V_p$  в водяной прослойке трещины. Скорость в воде и значительно меньше, чем в бетоне и горных породах ( $\approx 1300$  м/с), однако малое раскрытие трещины (менее 1 мм) приводит к тому, что вклад подобной неоднородности в изменение скорости продольной волны должен измеряться единицами процентов, а не десятками. В данном случае механизм снижения  $V_p$  в зоне нахождения трещины вероятнее всего носит комплексный характер. С одной стороны, происходит естественное увеличение времени распространения продольной волны из-за нахождения на ее пути зоны, характеризующейся более низкими значениями скорости. С другой стороны, контраст акустических импедансов на поверхностях трещины довольно высок в связи с чем значительная часть энергии УЗ колебаний теряется из-за процессов переотражения. Вероятнее всего в данном случае это привело к снижению амплитуды первого вступления продольной волны ниже уровня шума, а значения  $V_p$  были определены по второму периоду волновой формы.

Прохождение зонда над системой водозаполненных трещин приводит к потере сигнала и невозможности надежного определения значений  $V_p$  для данного участка массива.

#### Результаты каротажа модельной скважины с заполнением трещин глиной

В результате проведения измерений были получены значения информативных параметров, занесенные в таблицу 5.3. Примеры волновых форм сигналов в бездефектной области и области, содержащей глинозаполненную трещину приведены на рисунках 5.16 и 5.17, соответственно.

Таблица 5.3 – Результаты проведения каротажа на третьем этапе

Отметка, мм	$V_{p1}$ , м/с	$V_{p2}$ , м/с	$A_1$ , усл.ед.	$A_2$ , усл.ед.
0	3220	3225	68	73
5	3230	3300	68	68
10	3280	3230	68	68
15	3265	3200	68	68
20	3240	3189	68	68
25	3170	3220	68	73
30	2240	3230	73	68
35	2240	3170	68	68
40	2112	3230	73	68
45	2250	3235	73	63
50	3320	2580	73	73
55	3240	2250	73	63
60	3230	2140	73	63
65	3250	2260	68	73
70	3130	3330	73	68
75	2140	2990	73	73
80	2130	3201	68	68
85	-	3350	-	68
90	-	2200	-	73
95	-	-	-	-

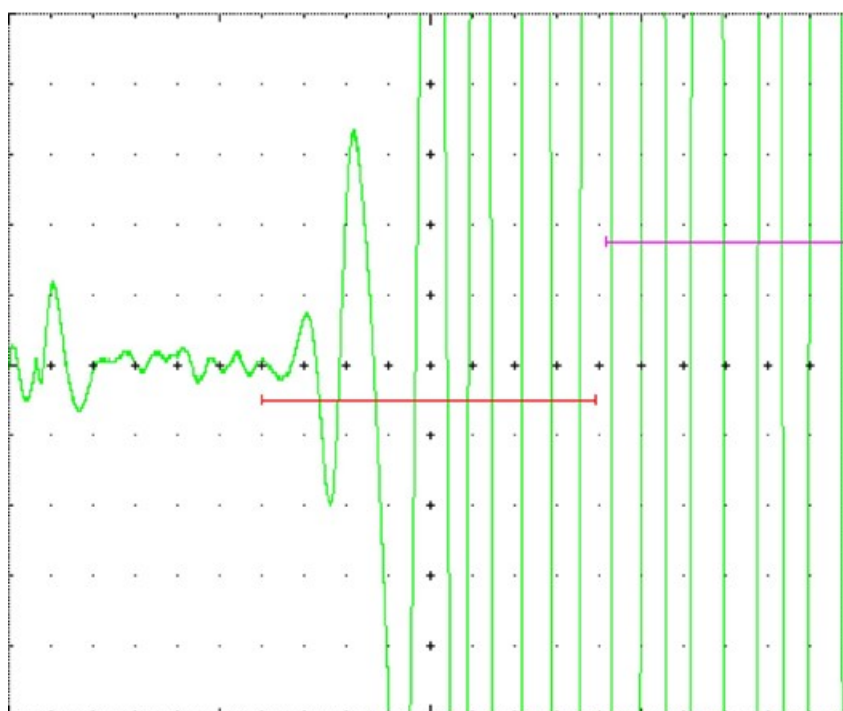


Рисунок 5.16 – Форма сигнала, зафиксированная в ненарушенном массиве

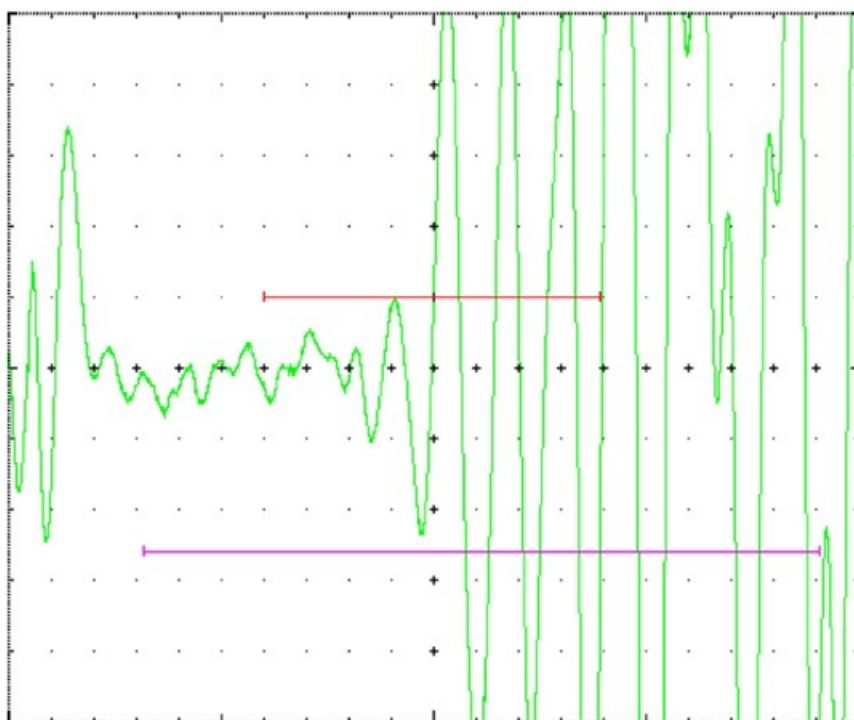


Рисунок 5.17 – Форма сигнала, зафиксированная на трещине, заполненной глиной

Полученные данные привязывались к отметкам физической модели исходя из геометрических параметров зонда и строилась каротажная диаграмма, диаграмма представлена на рисунке 5.18.

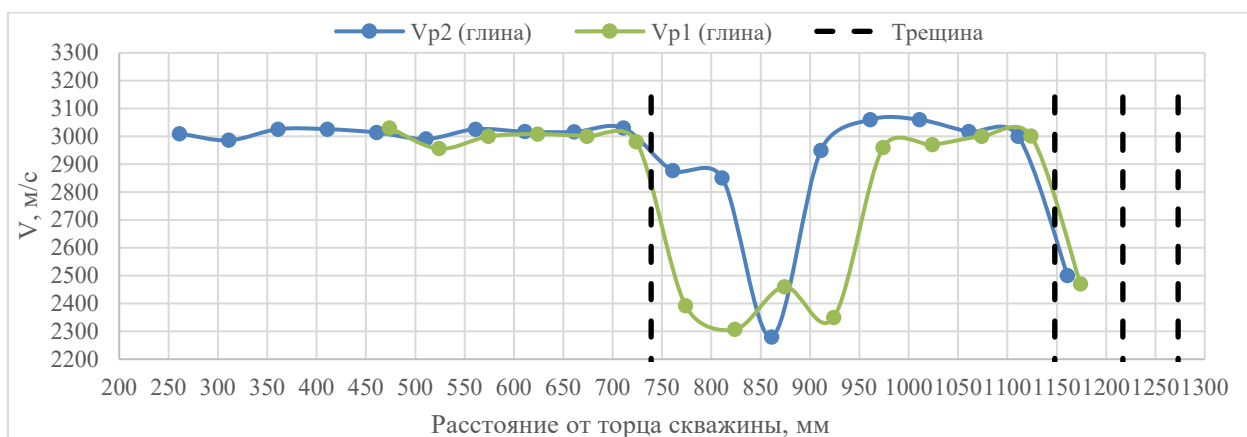


Рисунок 5.18 – Каротажная диаграмма, полученная на третьем этапе

Полученные в результате третьего этапа испытаний данные в целом соответствуют данным, полученным на трещинах, заполненных водой. В случае заполнения трещин глиной падение значений  $V_p$  оказывается хоть и менее контрастным, но все еще весьма значительным. Очевидно, в данном случае также может проявляться эффект потери первого вступления, особенно это справедливо для сигналов, проходящих через систему трещин. Существенного влияния типа заполнителя трещины на определении ее координаты не

наблюдается, т.к. во всех рассмотренных случаях при нахождении трещины на базе прозвучивания регистрируемые УЗ импульсы претерпевают значительные изменения. Результаты проведения лабораторных испытаний разработанного зонда изложены в [102].

Также следует отметить малую информативную ценность положения максимума спектра. Действительно, основное влияние на этот параметр оказывает резонансная частота используемых преобразователей. Изменения спектрального состава УЗ импульсов при их прохождении через трещины может проявляться в виде снижения амплитуд высокочастотных компонент спектра. Однако в случае вынужденного использования сухого контакта на границе «преобразователь-порода» даже незначительные изменения в давлении прижима или шероховатости поверхности могут приводить к существенным изменениям спектрального состава УЗ колебаний [119].

### 5.3 Проведение физического моделирования с целью выделения водозаполненных трещин

Для физического моделирования определения водозаполненных трещин использовались модель скважины, изготовленная в подразделе 5.1, и ультразвуковой каротажный зонд, описанный в главе 4, а также дефектоскоп УСД-60Н.

Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе акустический зонд помещался в зону ненарушенного массива (Рисунок 5.19) 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.

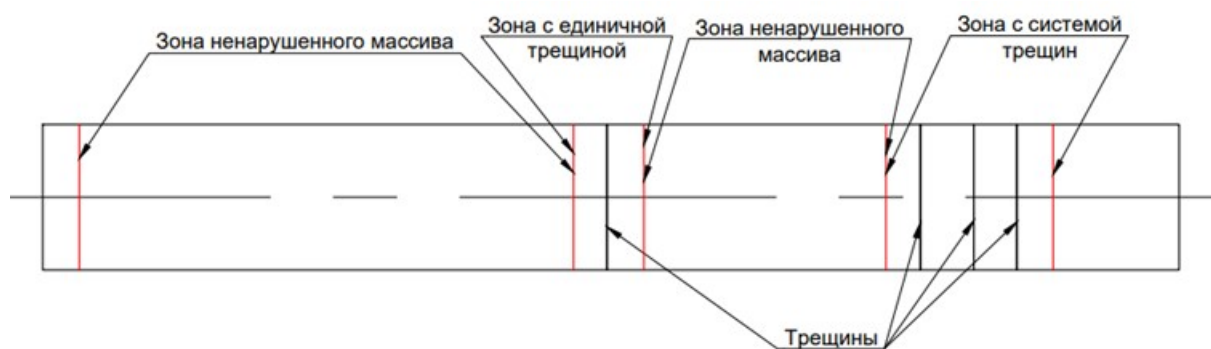


Рисунок 5.19 – Схема зон контроля в физической модели

На обоих этапах производилась запись волнового фронта длительностью 416 мкс с шагом дискретизации 25 нс. Полученные волновые формы представлены на рисунке 5.20.

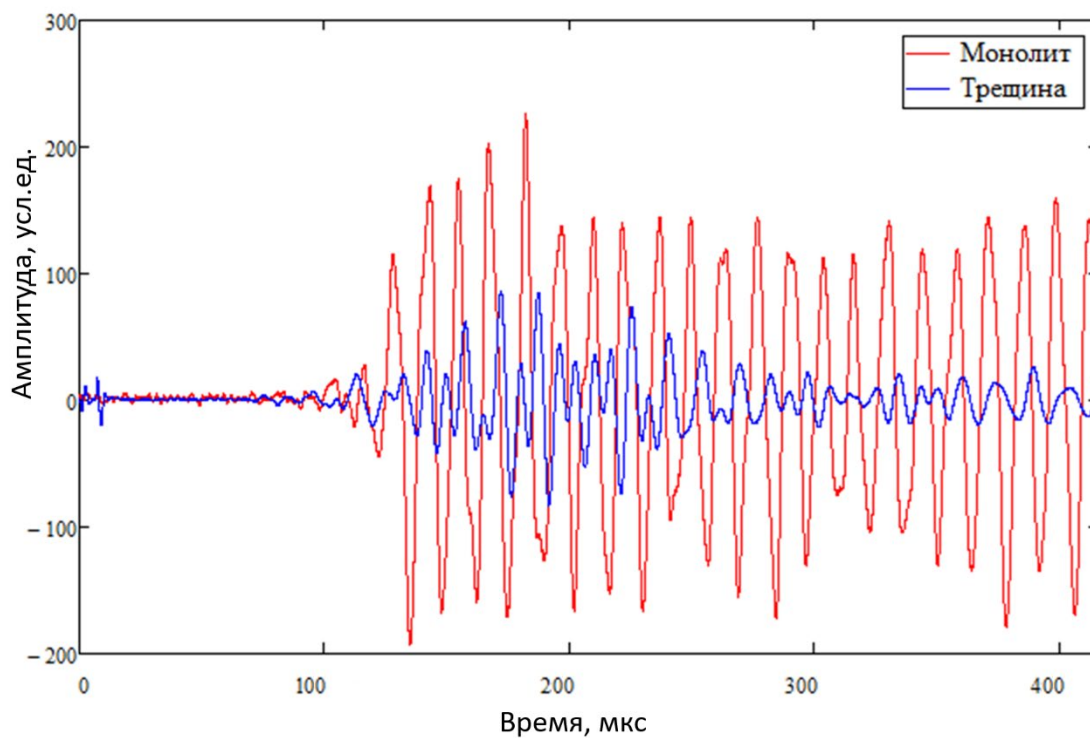


Рисунок 5.20 – Волновые формы для монолитного участка и участка с водозаполненной трещиной

Далее было произведено построение амплитудно-частотных спектров в программной среде MathCad. Результаты расчёта амплитудно-частотного спектра смоделированных случаев представлены в графическом виде на рисунке 5.21.

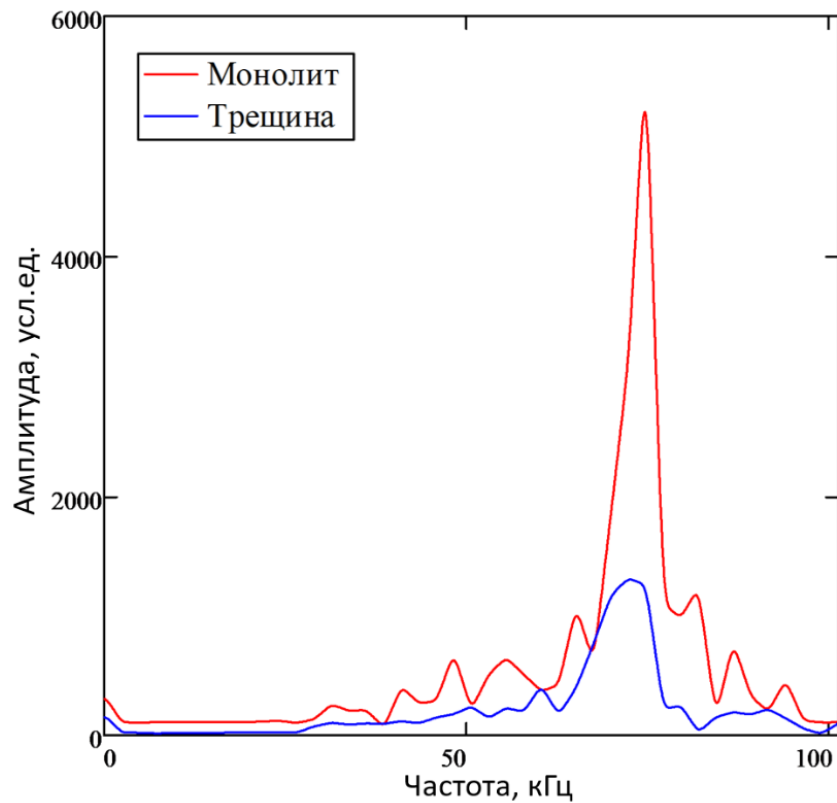


Рисунок 5.21 – Амплитудно-частотные спектры для монолитного участка и участка с водозаполненной трещиной

Из графиков спектров (Рисунок 5.21) видно, что в волновом фронте, относящемуся к монолитному участку породы, явно выделяется гармоника с частотой 74 кГц, что соответствует частоте излучаемой волны в модель. Из графиков волновых фронтов (Рисунок 5.20) и ограниченного объема модели можно предположить, что приёмный преобразователь фиксирует волновые пакеты, отражённые от границ модели, что приводит к искажению фиксируемых волновых фронтов и их амплитудно-частотных спектров.

Для исключения искажений был сокращён рассматриваемые волновые фронты в 2 раза до 208 мкс и вновь рассчитаны их амплитудно-частотные спектры. Полученные волновые формы и амплитудно-частотные спектры представлены на рисунках 5.22 и 5.23, соответственно.

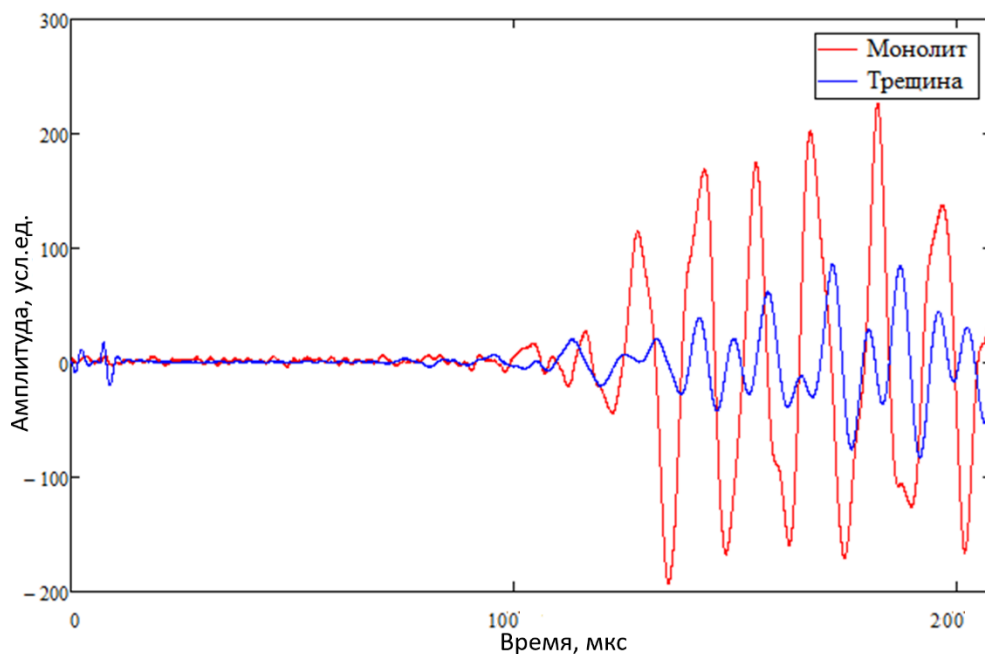


Рисунок 5.22 – Волновые формы для монолитного участка и участка с водозаполненной трещиной для сигнала длительностью 208 мкс

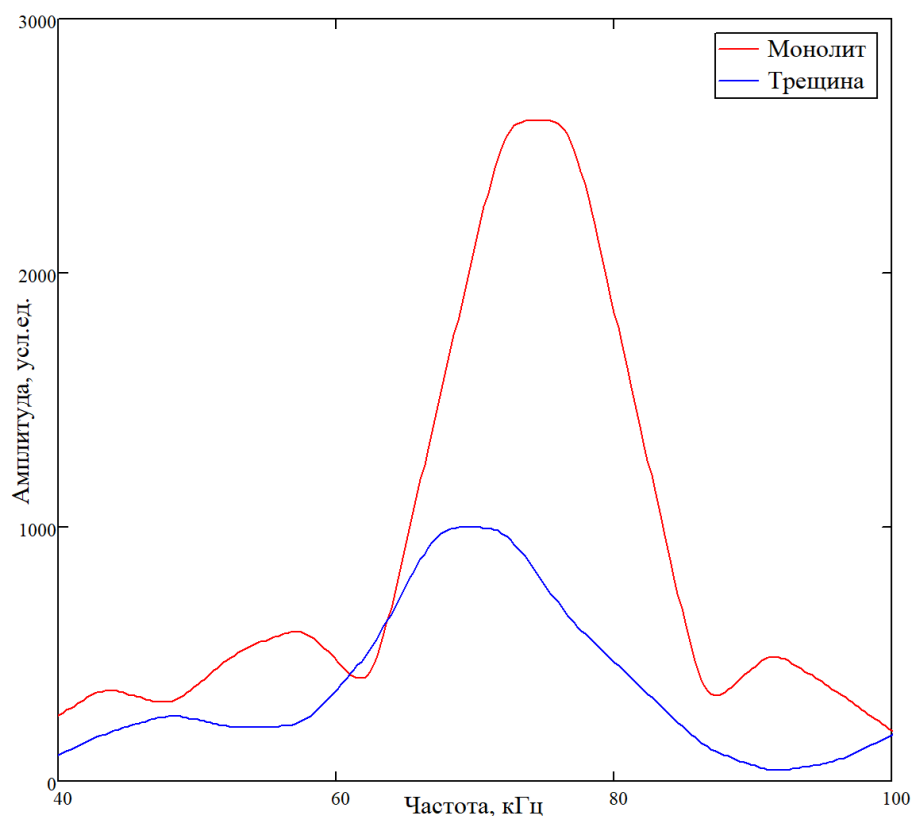


Рисунок 5.23 – Амплитудно-частотные спектры для монолитного участка и участков с водозаполненной трещиной для сигнала длительностью 208 мкс

Из рисунка видно, что на частоте 75 кГц происходит значительное снижение амплитуды гармоники в 2,6 раза. Сравнивая амплитудно-частотные характеристики с

полученными при компьютерном моделировании (Рисунок 3.8), 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.

#### **5.4 Выводы**

Физическое моделирование показало, что посредством ультразвукового каротажа с использованием сконструированного зонда возможна локализация как единичных, так и целых систем неоднородностей. Все три этапа проведения испытаний показали одинаковые результаты по определению местонахождения трещин, вне зависимости от типа заполнителя и их количества.

Более того было установлено, что тип заполнителя оказывает значительное влияние на получаемые данные. При воздушном заполнении происходит полная потеря сигнала как в единичной трещине, так и в системе трещин. При заполнении единичной трещины водой, полной потери сигнала не происходит, при этом скорость распространения ультразвуковой волны сильно снижается даже при малом раскрытии трещин (вплоть до 2000 м/с). Если в качестве заполнителя трещин выступает глина, то полной потери сигнала также не происходит, однако в среднем скорость не опускается ниже 2200 м/с, как при заполнении трещин водой, что также подтверждает возможность отличия оценки типа заполнителя трещин в реальных условиях.

Установлено, что на частоте 75 кГц происходит значительное снижение амплитуды гармоники в 2,6 раза, что сходно с результатами, полученными при численном моделировании.

## **6 Проведение полевых исследований трещиноватых зон в окрестности горной выработки**

### **6.1 Описание условий проведения исследований**

Обследуемые выработки размещаются в горном массиве, сложенном метаморфическим комплексом пород докембрийского возраста, прорванным мелкими штоками гранитов и дайками основного состава. С дневной поверхности массив перекрыт маломощным плащом делювиально-элювиальных отложений (1-5 м, у основания склонов логов – до 15-18 м).

На глубину 10-15 м метаморфические породы сильно выветрены до рыхло-дресвяно-щебнистой массы, которая является мел-палеогеновой корой выветривания. Ниже до глубины 60-70 м за счет экзогенных процессов они разбиты сеткой трещин до глыбово-щебнистого материала. Ниже 70 м следы физического выветривания в разрезе отсутствуют.

Метаморфические породы относятся к исаевскому метакомплексу позднего архея. Наибольшим распространением (до 80-90 %) пользуются серые, темно-серые, зеленовато-серые биотит-плагиоклазовые гнейсы с однородной массивной, реже полосчатой и пятнисто-очковой текстурой.

Другие разновидности метаморфических пород встречаются редко и представлены (%) роговообманковыми (3-5), двуслюдистыми (3-5) гнейсами, кварцито-гнейсами (3-5) и биотитовыми, биотит-хлоритовыми сланцами (1). Интрузивные образования относятся к раннепротерозойскому ярлычихинскому комплексу метабазитов. Последние отмечаются в виде даек диабазов, амфиболитов и порфиритов (3-5 %), иногда значительной протяженности (десятки и сотни метров) и мощности (15-20 м), однако чаще их мощность составляет 0,8-1,5 м. Преимущественное простирание даек – меридиональное, падение восточное под углом 60-80° [120].

Гидрогеологические условия исследуемого участка определяются наличием трещин и характером их заполнения. Обводненность пород неравномерная: водораздельные области глубоко расчленены и почти полностью дренированы.

Участок размещения подземного объекта характеризуется наличием вод рыхлых отложений и гидравлически связанных с ними трещинных вод коренных пород.

Воды супесчано-суглинистых делювиальных отложений не имеют сплошного распространения, приурочены к пониженным участкам рельефа, имеют мощность 0,6-15 м.

Воды характеризуются неустойчивым режимом, ничтожностью ресурсов и низким дебитом родников, вскрываются на глубине от 0,3-2,9 м.

Трещинные воды, согласно классификации Плотникова, можно разделить на два типа: трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды.

Трещинно-грунтовые воды развиты в верхней части массива, связаны с региональной экзогенной трещиноватостью, затухающей на глубинах до 80 м, приуроченной к зоне поверхностного выветривания гнейсов. Эти трещины перехватывают поверхностный сток и верховодку и проводят их ниже местного базиса эрозии. Воды безнапорные. Уровень воды отмечен на глубине 10–35 метров от поверхности земли. Абсолютные отметки уровня от 323 м до 390 м. Поверхность подземных вод не горизонтальна, а, в общем, наследует формы рельефа. Исследованиями установлено, что породы ниже глубин 70-80 м практически безводны. Исходя из этого, мощность горизонта трещинно-грунтовых вод можно оценить в 35-70 м.

Питание горизонта происходит в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков (на отдельных участках интенсивность разная в зависимости от мощности делювиальных отложений). В скважинах с малой мощностью делювиального слоя отмечается тесная связь питания водоносного горизонта с количеством атмосферных осадков. В скважинах, которые фиксируют наличием мощного (8-13 м) слабопроницаемого покрова делювиальных отложений, проявляется запаздывание изменений уровня вод от времени выпадения осадков.

Трещинно-жильные воды можно выделить условно, только по приуроченности к зонам локальной тектонической трещиноватости. Этот тип вод образует локально линейно вытянутые водоносные зоны, прослеживающиеся на сотни метров в глубину. Вода насыщает заполнитель зон дробления и рассланцевания, скапливается и максимально проявляется обычно в висячем крыле зоны дробления субмеридиональной системы, сжатой до состояния экрана, и фильтруется сквозь зоны рассланцевания и гидравлические окна узлов сопряжения зон структурного ослабления.

Воды обоих типов гидравлически связаны между собой, поэтому по составу и свойствам трещинно-жильные воды мало отличаются от трещинно-грунтовых вод.

Питание трещинно-жильных вод происходит за счет перетекания из трещинно-грунтового водоносного горизонта.

Трещины, находящиеся ниже зоны экзогенной трещиноватости, в большинстве случаев закрыты или залечены вторичными продуктами и водонепроницаемы, обводненность исчезает и на отметках заложения основных сооружений подземные воды проявляются в виде капеза или увлажнения пород на отдельных участках выработок. Встречаемые в выработках водопроявления наблюдаются по зонам расланцевания, дробления и в местах контактов даек с вмещающими породами. Величина водопритоков максимально достигала 0,1-0,2 л/мин, при обычных значениях притоков 0,01-0,05 л/мин.

Коэффициенты фильтрации пород метаморфического и дайкового комплексов, и зон тектонических нарушений (дробления и расланцевания) составляют 0,007-0,3 м/сут. Наличие зон повышенной проводимости (зон тектонических нарушений) с глубиной подтверждаются данными расходомерии. Эти зоны связаны с повышенной трещиноватостью, относительной незаполненностью трещин и, помимо данных расходомерии, наличие их подтверждается пониженным выходом керна и значительным поглощением промывочной жидкости. Зоны повышенной проводимости не выдержанны по мощности и простираению и имеют достаточно сложный характер. Это видно на геолого-гидрогеологических разрезах. Значения коэффициента фильтрации изменяются от 0,0005 до 0,001 м/сут (по данным расходомерии). Среднее значение коэффициента фильтрации для всего горизонта равно 0,0008 м/сут. Ненарушенные породы характеризуются крайне низкой пористостью и проницаемостью.

В качестве объектов исследования были выбраны камеры объектов 120. Выработки сооружались буровзрывным способом, в результате чего вокруг них была сформирована зона искусственной трещиноватости (EDZ).

При выполнении исследований использовались скважины диаметром 76 мм и глубиной до 30 м для изучения состояния массива. Бурение скважин осуществлялось колонковым способом (алмазными коронками), перпендикулярно стенкам подземных выработок (в горизонтальной плоскости) с положительным углом к горизонту 3°- 5°. После бурения стволы скважин были промыты от бурового шлама.

## **6.2 Используемое исследовательское оборудование, диапазоны и состав регистрируемых параметров**

Осуществлялось изучение акустических параметров массива, выполняемое с целью характеристики нарушенных приконтурных зон выработок, в т.ч. установления местоположения трещиноватых участков.

Для проведения ультразвукового каротажа использовался каротажный комплекс, состоящий из модульного скважинного зонда, низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н, пневматического насоса для обеспечения прижима преобразователей, коммутирующего устройства и комплекта разборных досылочных штанг. Внешний вид каротажного комплекса представлен на рисунке 6.1.

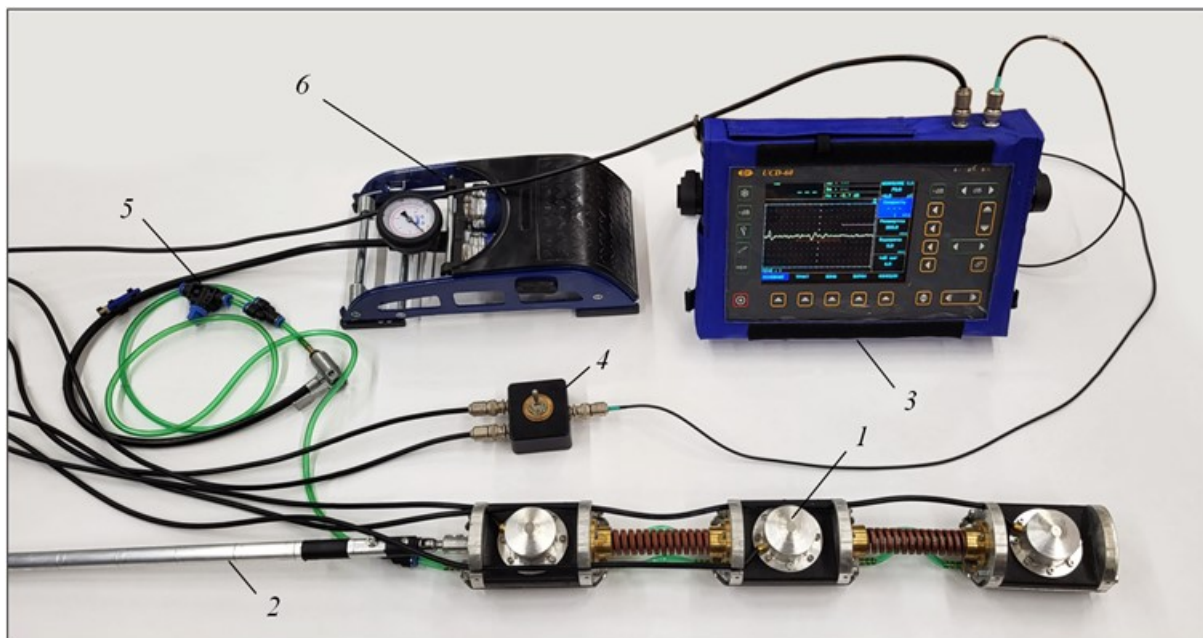


Рисунок 6.1 – Общий вид каротажного комплекса: 1 – ультразвуковой каротажный зонд; 2 – досылочная штанга; 3 – дефектоскоп УСД-60Н; 4 – коммутатор; 5 – воздушный клапан; 6 – пневматический насос

Комплекс предназначен для ультразвукового прозвучивания прискважинного массива в горизонтальных, наклонных и вертикальных скважинах, не заполненных водой. При этом допускается наличие умеренного водопритока – все элементы зонда выполнены из коррозионностойких материалов, а электрические элементы акустических преобразователей надежно заизолированы.

Для передвижения зонда по скважине использовались досылочные штанги, представляющие собой метровые алюминиевые трубки, оснащённые переходными втулками для соединения между собой.

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.

Кроме того, с целью получения дополнительной информации о показателях трещиноватости пород (тип водопроницаемости), акустический каротаж в скважинах был выполнен дважды - до опытных фильтрационных работ (ОФР) и после.

В целом, ультразвуковой каротаж производился в следующей последовательности:

- 1) Излучатель и приёмники зонда подключались ко входам генератора и усилителя, через коммутирующее устройство, соответственно. Пневматическая система прижима соединялась с электрическим насосом;
- 2) Досылочные штанги подсоединялись к зонду;
- 3) Зонд подавался в скважину, в начальной точке устье скважины совпадала с местом крепления досылочных штанг и зонда;
- 4) На насосе выставлялось давление в 2.5 атм, и затем нагнетался воздух в пневматическую систему прижима;
- 5) В полевой журнал заносилась информация о скорости прохождения и амплитуде первого вступления продольной волны от излучателя к одному из приёмников. Затем с помощью коммутирующего устройства происходило переключение с одного приёмника на другой. В полевой журнал также заносилась информация о номере приёмника используемого в момент измерения;
- 6) После завершения измерений в точке давление из пневматической системы прижима стравливалось, и происходило передвижение зонда на заранее выбранный шаг. По меткам на досылочном устройстве определялось глубина размещения зонда, данная информация заносилась в полевой журнал;
- 7) Далее шаги 4-6 повторялись до достижения зондом забоя скважины или до глубины, позволяемой общей длиной досылочных штанг.

На рисунке 6.2 представлена фотофиксация процесса проведения ультразвукового каротажа.

Первичным результатом реализации описанного алгоритма измерений явился журнал записей, содержащий информацию о скважине, значения скоростей продольных

волн с отметками координат зонда, а также набор сохраненных волновых форм. Результаты проведения ультразвукового каротажа для скважины представлены в таблице 6.1.



Рисунок 6.2 – Процесс проведения ультразвукового каротажа

Таблица 6.1 – Результаты проведения ультразвукового каротажа на скважине

Отметка штанги, мм	До ОФР						После ОФР					
	Приёмник 1			Приёмник 2			Приёмник 1			Приёмник 2		
	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.
0	224	0	0	436	0	0	224	0	0	436	0	0
150	374	0	0	586	0	0	374	0	0	586	0	0
300	524	0	0	736	0	0	524	0	0	736	0	0
450	674	0	0	886	0	0	674	0	0	886	0	0
750	974	0	0	1186	0	0	974	0	0	1186	0	0
1050	1274	4790	55	1486	3460	55	1274	0	0	1486	0	0
1350	1574	4720	51	1786	4770	51	1574	4700	49	1786	0	0
1650	1874	4010	51	2086	3970	55,5	1874	4480	51,5	2086	4770	56,5
1950	2174	3870	54	2386	4030	52	2174	4770	48,5	2386	4610	55
2250	2474	3990	63	2686	3870	54	2474	4610	54	2686	4700	41
2550	2774	0	0	2986	3460	64	2774	4480	50,5	2986	4660	54
2850	3074	5000	39,5	3286	0	0	3074	0	0	3286	4570	44,5
3150	3374	4540	52	3586	5000	42,5	3374	4890	46	3586	0	0
3450	3674	4890	34,5	3886	0	0	3674	3420	48,5	3886	5240	52,5
3750	3974	4700	49,5	4186	4820	47	3974	4660	41	4186	0	0
4050	4274	4350	43,5	4486	4350	47,5	4274	4720	52	4486	4890	50,5
4350	4574	3990	51	4786	4220	56	4574	4820	41	4786	4820	50,5
4650	4874	4300	48	5086	3460	59	4874	4070	51	5086	4460	52,5
4950	5174	4350	49,5	5386	4260	47	5174	4330	52,5	5386	4460	54
5250	5474	4280	58,5	5686	4260	50	5474	4460	50	5686	4770	50
5550	5774	4480	49	5986	3970	48,5	5774	4460	60	5986	4660	57
5850	6074	4570	48,5	6286	3750	55,5	6074	4280	48,5	6286	4200	63,5
6150	6374	4480	53	6586	4630	58	6374	4500	49	6586	4570	53,5
6450	6674	4700	53	6886	4700	53	6674	4520	54	6886	4590	55

Отметка штанги, мм	До ОФР						После ОФР					
	Приёмник 1			Приёмник 2			Приёмник 1			Приёмник 2		
	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.	Отметка скважины, мм	Скорость, м/с	Амплитуда, у.е.
6750	6974	4660	57	7186	0	0	6974	4480	51	7186	4680	54
7050	7274	4430	59,5	7486	4770	52,5	7274	4700	47	7486	0	0
7350	7574	0	0	7786	4680	57,5	7574	3910	51	7786	4890	47
7650	7874	4300	57,5	8086	0	0	7874	0	0	8086	3630	50,5
7950	8174	3570	57,5	8386	4460	52	8174	4660	50,5	8386	0	0
8250	8474	4630	55,5	8686	4700	51,5	8474	4430	52	8686	4480	55
8550	8774	4240	48,5	8986	4480	48,5	8774	4660	57,5	8986	4660	64
8850	9074	0	0	9286	4350	49,5	9074	0	0	9286	0	0
9150	9374	4140	51,5	9586	3420	53	9374	4010	57	9586	4280	47,5
9450	9674	3950	56,5	9886	4050	58,5	9674	3990	50	9886	3420	53
9750	9974	3830	46,5	10186	3970	59,5	9974	0	0	10186	3730	51
10050	10274	3990	54	10486	3930	49	10274	3970	51,5	10486	3930	66,5
10350	10574	4110	50,5	10786	4240	55,5	10574	3970	49,5	10786	3950	59
10650	10874	0	0	11086	4200	52,5	10874	4200	52	11086	4350	55,5
10950	11174	4700	62	11386	0	0	11174	0	0	11386	4330	54,5
11250	11474	4570	57	11686	4660	62	11474	4140	57,5	11686	4430	50
11550	11774	4260	56	11986	4200	61	11774	0	0	11986	4700	55
11850	12074	4280	48	12286	4330	45	12074	4160	42	12286	3440	50,9

### 6.3 Обработка полученных данных и результаты исследований

На первом этапе обработки результатов ультразвукового каротажа в первичные данные (Таблица 6.1) были внесены поправочные коэффициенты, учитывающие расстояние от начала зонда до соответствующих преобразователей. В этом случае координаты получения значений  $V_p$  на канале 1 ( $L_1$ ) и канале 2 ( $L_2$ ) вычислялись в соответствии с устьем скважины (в случае центрального расположения излучающего преобразователя):

$$L_1 = L + 0,224, \quad (6.1)$$

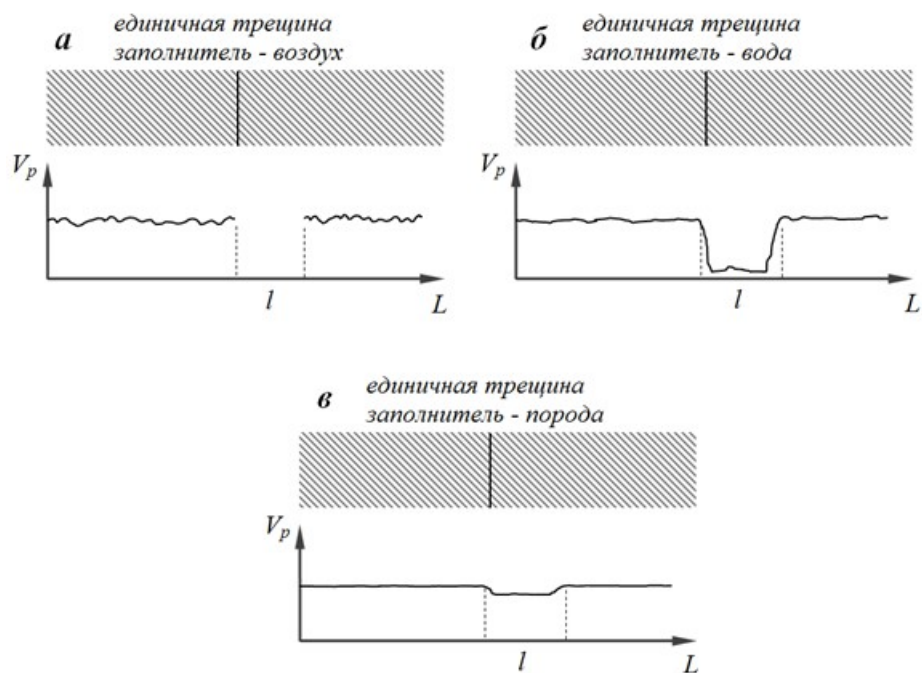
$$L_2 = L + 0,436, \quad (6.2)$$

где  $L$  – положение начала зонда в скважине, м. Для случая, когда сканирование скважины начиналось с точки совмещения начала зонда и устья скважины,  $L = 0$ .

После введения поправок на координату строились каротажные кривые  $V_p(L_i)$ , где  $i$  – номер канала.

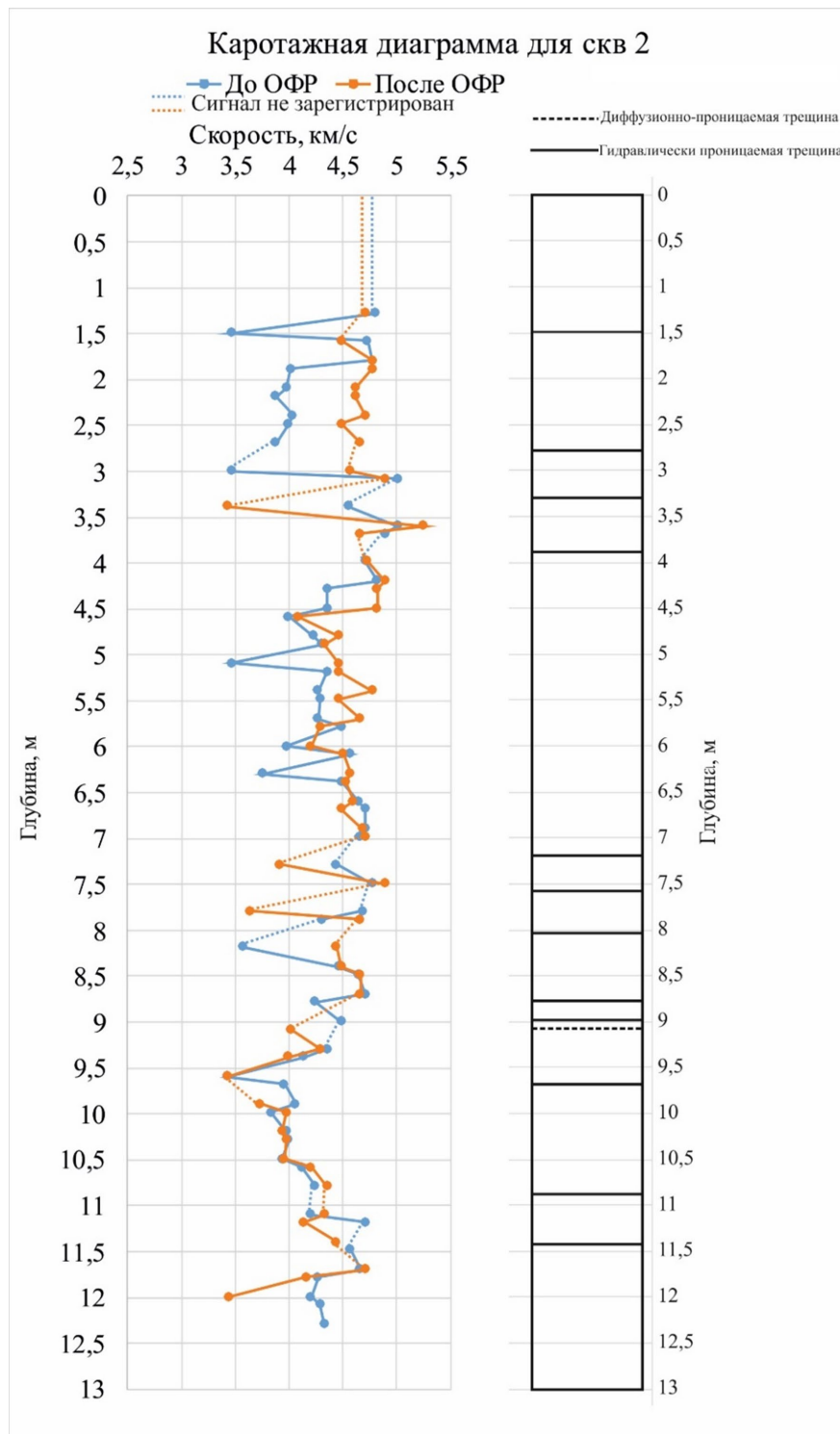
Целью интерпретации каротажных диаграмм являлось выявление аномалий скоростей продольных волн вдоль оси скважины. Подобные аномалии могут быть вызваны такими особенностями строения приконтурного массива, как единичные трещины с различными заполнителями, системы близкорасположенных трещин, пропластки пород с контрастными акустическими свойствами. На рисунке 6.3 представлены примеры скоростных аномалий, возникающих под влиянием единичной трещины при сканировании вдоль оси скважины на глубину  $L$  зондом с базой прозвучивания  $l$ .

В случае нахождения между излучателем и приемником трещины, заполненной воздухом, затухания УЗ колебаний возрастает настолько, что сигнал практически перестает распространяться. Выделить первое вступление в этом случае, как правило, не удастся. В случае заполнения трещины водой на каротажной диаграмме наблюдается резкое снижение  $V_p$ , которое может достигать 1000 м/с. В случае, если трещина заполнена породой со сниженными прочностными свойствами (залеченная трещина или заполненная раздробленной породой), то наблюдается умеренное снижение параметра  $V_p$ . Конкретная амплитуда снижения скорости будет сильно зависеть от контраста акустических свойств пород и заполнителя трещин, которые могут колебаться в очень широких пределах. Во всех рассмотренных случаях положение нарушенного участка определялось по началу аномалии на графике  $V_p(L)$ .

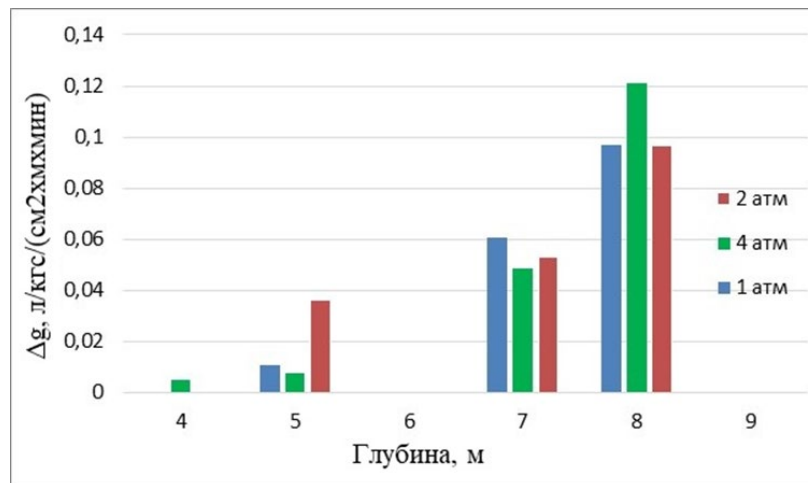


Также, по результатам сравнения полученных данных до и после ОФР произведено разделение трещин по типу их водопроводимости на диффузионный и гидравлические типы. Таким образом в случае, если после опытного нагнетания (ОФР) удалось зарегистрировать ультразвуковой сигнал (на том интервале, где до ОФР сигнал отсутствовал), то принималось решение об отнесении выявленной трещины к диффузионному типу, иначе к гидравлическому.

На рисунке 6.4 приведены результаты измерений, представленные в таблице 6.1 с учетом внесенных поправок в соответствии с выражениями (6.1) и (6.2).



В ходе проведения опытно-фильтрационных работ и дальнейшей обработки были получены гистограммы распределения удельного водопоглощения по глубине скважины (Рисунок 6.5).



На участках скважины 0-3 м и 9 м и далее метров не удалось достичь постоянного давления вследствие обильного водопоглощения.

Приведенные результаты показывают, что:

- Мощность железобетонной крепи на участке расположения скважины 2 составляет 1,5 м. На отметке  $1,5 \pm 0,1$  м явно выделяется зона контакта крепь-порода - на двух этапах проведения ультразвукового каротажа происходила полная потеря сигнала. Это свидетельствует о наличии трещины гидравлического типа водопроводимости. При этом на всём интервале железобетонной крепи, за исключением малого участка вблизи зоны контакта, не удалось получить информацию о скорости прохождения продольной упругой волны. Предположительно, это связано с недостаточным контактом протектора пьезопреобразователей с контуром скважины вследствие сложной неровной поверхности скважины;

- За крепью начинается зона техногенной нарушенности пород, простирающаяся до отметки 3 м (мощность зоны до 1,5 м), за которой начинается относительно монолитный участок породы, соответствующий зоне опорного давления. Данный участок характеризуется сниженным значением скорости продольной упругой волны равной в среднем 3.9 км/с. Также фиксируется наличие одной трещины гидравлического типа водопроводимости на отметке  $2,8 \pm 0,1$  м;

- Зона опорного давления выделяется в интервале 3.0 - 4.2 м. Она характеризуется увеличенным значением скорости продольной волны, составляющей в среднем 4.8 км/с. При этом, в ходе интерпретации результатов акустического каротажа были выделены две трещины гидравлического типа водопроводимости на отметках:  $3.3 \pm 0.1$  м и  $3.9 \pm 0.1$  м. Несмотря на наличие выделенных трещин, проведение опытных нагнетаний

не показало наличие водопроводящих участков на данном интервале, что говорит об отсутствии гидравлической связи этих трещин с другими трещинными системами;

– В зоне естественного напряжения возможно выделить два интервала. Первый ограничен отметками  $3,5\pm 0,1$  м и  $7,2\pm 0,1$  м. Данный интервал характеризуется монолитным строением с незначительными колебаниями значений скорости прохождения продольной упругой волны, которая в среднем составляет 4.3 км/с, однако в начале интервала присутствует открытая трещина гидравлического типа на отметке  $3,9\pm 0,1$  м. Наличие данного нарушения может объясняться близким расположением зоны разгрузки;

– Начиная с отметки  $7,2\pm 0,1$  м до забоя скважины массив характеризуется нарушенным состоянием, вероятнее всего, соответствующим естественному уровню дефектности. Трещины были обнаружены на следующих отметках: одна диффузионного типа водопроницаемости –  $9,1\pm 0,1$  м; восемь трещин гидравлического типа –  $7,2\pm 0,1$  м,  $7,6\pm 0,1$  м,  $8,1\pm 0,1$  м,  $8,8\pm 0,1$  м,  $9,0\pm 0,1$  м,  $9,7\pm 0,1$  м,  $10,9\pm 0,1$  м и  $11,4\pm 0,1$  м.

По результатам ультразвукового исследования образца керна изъятых с интервала  $9,1\pm 0,1$  по определению граничного раскрытия между капиллярной и сверхкапиллярной трещины, представленных в главе 2, установлено, что данная трещина имеет граничную величину раскрытия до 150 мкм с шероховатостью поверхности трещины 17,5 мкм. Наличие данной трещины на этом интервале было подтверждено в ходе проведения видеокаротажа (Рисунок 6.6). 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 гидравлического типа, вносящими основной вклад в проницаемость описываемого интервала.

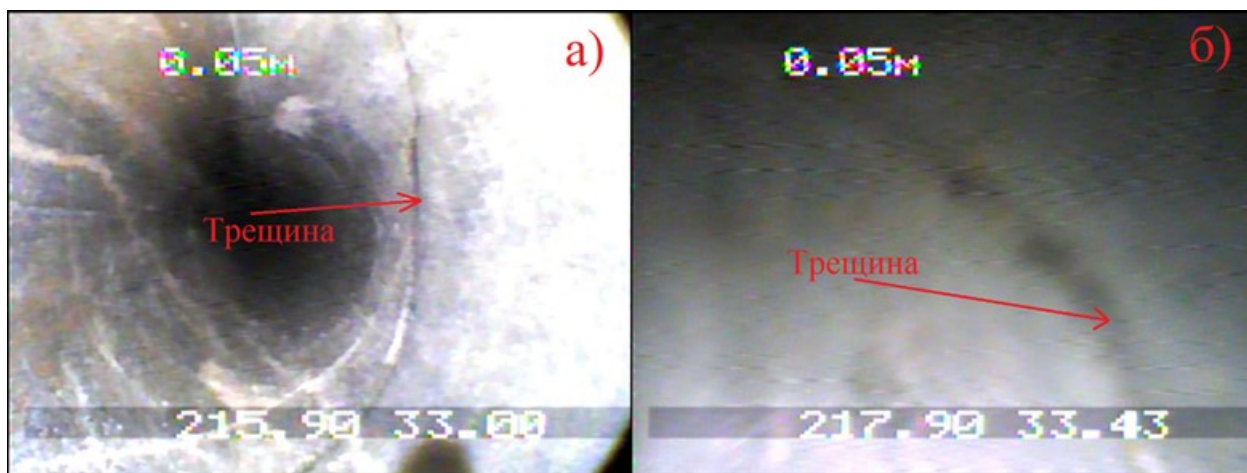


Рисунок 6.6 – Трещина с небольшим раскрытием на отметке  $9,1\pm 0,1$  м: а) изображение, полученное с фронтальной камеры; б) с боковой камеры

Установлено, что результаты выделения капиллярных и сверхкапиллярных трещин посредством ультразвукового каротажа хорошо коррелируются с результатами опытных нагнетаний. В скважине зоны со значительным водопоглощением совпадают с интервалами, на которых выделяются трещины гидравлического типа водопроводимости: на отметках 0-3 м не удалось обеспечить постоянного давления в системе в следствие наличия крупных трещин, наличие которых подтверждает ультразвуковой каротаж; на отметках 7-8 м также фиксируется наличие как крупных трещин, так и зон повышенного водопоглощения.

Результаты проведения полевых исследований трещиноватых зон в окрестности горной выработки представлены в [121].

#### **6.4 Выводы**

По итогам полевых исследований трещиноватых зон в окрестностях горной выработки комплексом методов, состоящим из ультразвукового каротажа и опытно-фильтрационных работ, 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 водопроводящей 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 водопроводимости на 2 группы: двенадцать гидравлически проницаемых и одна диффузионно-проницаемая трещина;

- По результатам лабораторных исследований изъятго образца керна с участка с диффузионно-проницаемой трещиной было определено, что её раскрытие не более 150 мкм, шероховатость поверхности трещины ( $Ra$ ) составила 17,5 мкм;

- 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 6.7.

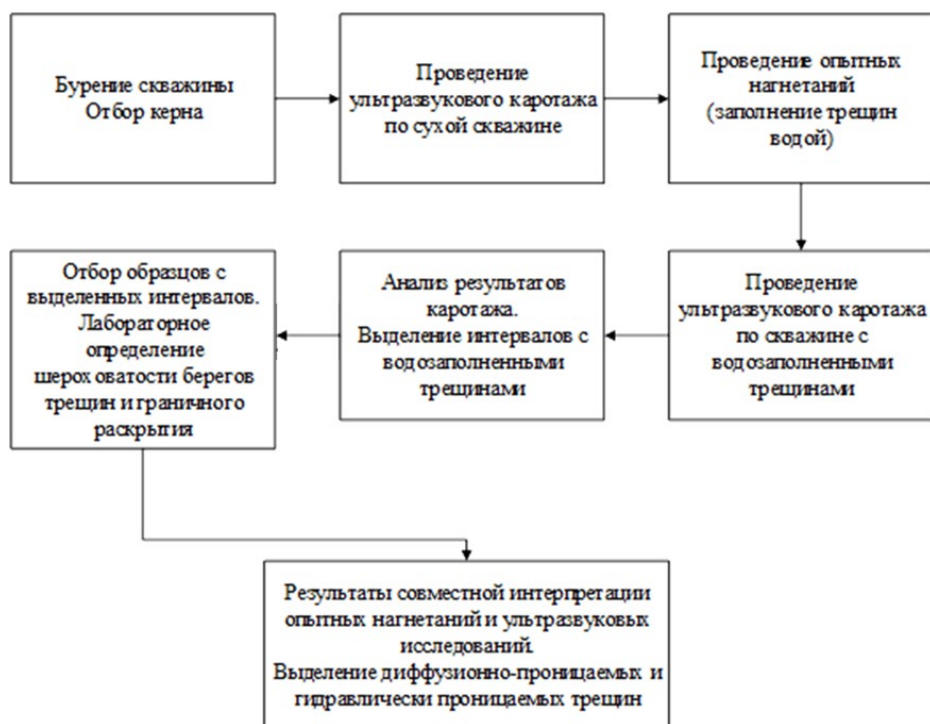


Рисунок 6.7 – Блок-схема алгоритма определения типа водопроницаемости трещин

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований изложено новое техническое решение актуальной задачи определения типа водопроводимости единичных трещин массива 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 водопроницаемости;

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

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

**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 наукометрической 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 водопроницаемости 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рац М.В., Чернышёв С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1970. – 160 с.
2. Чернышёв С.Н. Трещины горных пород. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
3. Корсаков А.К. Структурная геология: Учебник. – М.: КДУ, 2009. – 328 с.
4. Бахтеев М.К. Структурная геология: Курс лекций. – М.: МГГА, 1988. – 120 с.
5. Кушнарёв И.П., Лукин Л.И. Об изучении трещинной тектоники // Проблемы тектонофизики: Тр. I Всесоюз. тектонофиз. совещ. 1957 г. – М.: Госгеолиздат, 1960. – С. 120–126.
6. Riedmüller G., Käsling H.-E., Perzlmaier S., Thuro K. Engineering geological characterization of brittle faults and classification of fault rocks // Felsbau. – 2001. – Vol. 19, No. 4. – P. 13–19.
7. Епифанцев О.Г., Плетенчук Н.С. Трещиноватость горных пород: основы теории и методы изучения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. – 41 с.
8. Румынин В.Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1(1). – С. 44–55.
9. Мюллер Л. Механика скальных массивов. – М.: Мир, 1971. – 254 с.
10. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и откосов. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 102 с.
11. Ломизе Г.М. *Фильтрация в трещиноватых породах.* – М.: Госэнергоиздат, 1951. – 127 с.
12. Ромм Е.С. *Фильтрационные свойства трещиноватых пород.* – М.: Недра, 1966. – 283 с.
13. Шедеггер А. *Физика течения жидкостей через пористые среды.* – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 249 с.
14. Webster D.S., Marine I.W., Proctor J.F. *Two-well tracer test in fractured crystalline rock.* – U.S. Government Printing Office, 1970. – 67 p.
15. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Петров В.А. и др. Методологические основы исследований на завершающем этапе выбора площадок для

размещения хранилищ ОЯТ в кристаллических породах // Геоэкология. Инж. геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – № 1. – С. 3–12.

16. Гупало В.С., Казаков К.С., Минаев В.А., Озерский Д.А., Устинов С.А., Нафигин И.О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. – 2021. – № 1(14). – С. 76–86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.

17. Raven K.G., Gale J.E., Parks K. Geoscientific site characterization of the proposed Deep Geologic Repository, Tiverton, Ontario // GeoCanada 2010 Convention Proceedings. – Calgary, 2010. – 10 p.

18. Тесля В.Г., Расторгуев А.В. Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 4(13). – С. 58–70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.

19. Snow D.T. Anisotropic permeability of fractured media // *Water Resources Research*. – 1969. – Vol. 5, No. 6. – P. 1273–1289.

20. Hsieh P.A., Bredehoeft J.D., Rojstaczer S.A. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 2. Methodology and application to fractured rocks // *Water Resources Research*. – 1985. – Vol. 21, No. 11. – P. 1667–1676.

21. Zhang X., Sanderson D.J. Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses // *Engineering Geology*. – 1995. – Vol. 40, No. 1–2. – P. 65–75.

22. Zimmerman R.W., Chen D.-W., Cook N.G.W. The effect of contact area on the permeability of fractures // *Journal of Hydrology*. – 1992. – Vol. 139. – P. 79–96.

23. Singhal B.B.S., Gupta R.P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. – Springer, 2010. – 408 p.

24. Oda M., Hatsuyama Y., Ohnishi Y. Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. – 1987. – Vol. 92, No. B8. – P. 8037–8048.

25. Zheng J., Wang X., Lü Q., et al. A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses // *Journal of Hydrology*. – 2020. – Vol. 585. – Art. 124811.

26. Lei G., Dong P.C., Mo S.Y., et al. Calculation of full permeability tensor for fractured anisotropic media // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2015. – Vol. 5. – P. 167–176.
27. He J., Chen S., Shahrour I. Numerical estimation and prediction of stress-dependent permeability tensor for fractured rock masses // *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 59. – P. 70–79.
28. Hadgu T., Karra S., Kalinina E., et al. A comparative study of discrete fracture network and equivalent continuum models for simulating flow and transport in the far field of a hypothetical nuclear waste repository in crystalline rock // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 553. – P. 59–70.
29. Rong G., Peng J., Wang X., et al. Permeability tensor and representative elementary volume of fractured rock masses // *Hydrogeology Journal*. – 2013. – Vol. 21, No. 7. – P. 1655–1668.
30. Lang P.S., Paluszny A., Zimmerman R.W. Permeability tensor of three-dimensional fractured porous rock and a comparison to trace map predictions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – Vol. 119, No. 8. – P. 6288–6307.
31. Pan J.B., Feng X.T., Li S.J., Zhou H. Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock // *Engineering Geology*. – 2010. – Vol. 116, No. 1–2. – P. 166–177. DOI: 10.1029/JB092iB08p08037.
32. Yao C., Jiang Q.H., Shao J.F. A numerical analysis of permeability evolution in rocks with multiple fractures // *Transport in Porous Media*. – 2015. – Vol. 108. – P. 289–311.
33. Liu R., Zhu T., Jiang Y., et al. A predictive model correlating permeability to two-dimensional fracture network parameters // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – Vol. 78. – P. 1589–1605.
34. Liu Y., Yin G., Zhang D., et al. Directional permeability evolution in intact and fractured coal subjected to true-triaxial stresses under dry and water-saturated conditions // *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 119. – P. 22–34.
35. Нейштадт Л.И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 103 с.
36. Красилова Н.С. Анализ характера трещиноватости скальных пород при мелкомасштабной инженерно-геологической съёмке // *Инженерная геология*. – 1979. – № 4. – С. 38–48.

37. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В. Методы изучения трещиноватости горных пород: Учеб.-метод. пособие. – Томск: ТГАСУ, 2015. – 80 с.
38. Пустовит О.Е., Попов Ю.В. Методика изучения и анализа трещиноватости. Ч. 2: Графические методы изображения ориентировки трещин и анализ трещиноватости. – Ростов-н/Д: ЮФУ, 2009. – 34 с.
39. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки (П-717-80). – М.: Гидропроект, 1981. – 98 с.
40. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин. – М.: Стройиздат, 1986. – 143 с.
41. ГОСТ 23278–2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. – М.: Стандартиформ, 2015. – 31 с.
42. Banks D., Frengstad B., Midtgård A.K., et al. Permeability and stress in crystalline rocks // *Terra Nova*. – 1996. – Vol. 8, No. 3. – P. 223–235.
43. Жуков В.С., Моторьгин В.В. Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности на проницаемость // *Вестн газовой науки*. – 2019. – № 1(38). – С. 82–88.
44. Tsang C.F., Neretnieks I., Tsang Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories // *Water Resources Research*. – 2015. – Vol. 51, No. 9. – P. 6923–6972.
45. Chopra M., Nair R.N., Sunny F., Sharma D. N. Migration of radionuclides from a high-level radioactive waste repository in deep geological formations. *Environ Earth Sci*. 2015. vol. 73. pp. 1757–1768. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3525-x>.
46. Jia S., Dai Z., Yang Z., Du Z., Zhang X., Ershadnia R., Soltanian M. R. Uncertainty quantification of radionuclide migration in fractured granite // *Journal of Cleaner Production* – 2022 – vol. 366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132944>.
47. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Татаринев В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В.Н. Морозова. – М.: Горная книга, 2011. – 592 с.
48. Савельева Е.А. Международная кооперация по геологическому захоронению РАО в кристаллических горных породах («Кристаллический клуб») // *Радиоактивные отходы*. – 2019. – № 2(7). – С. 58–64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.
49. Magnor B. Äspö Pillar Stability Experiment: Geological mapping of tunnel TASQ. – Stockholm: SKB Report R-02-43, 2004. – 47 p.

50. Staub I., Andersson J.C., Magnor B. Äspö Pillar Stability Experiment: Geology and mechanical properties of the rock in TASQ. – Stockholm: SKB Report (SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB), 2004. – 207 p.
51. Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д. Оценка состояния геологической среды участка «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 4(9). – С. 46–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
52. Гупало В.С., Казаков К.С., Крючков Д.В., Панкратенко А.Н., Плешко М.С. и др. Изучение состояния массива пород при строительстве ПИЛ как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 1(6). – С. 90–99.
53. Озерский Д.А., Гупало В.С., Казаков К.С., Неуважаев Г.Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации ПИЛ на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 4(21). – С. 78–89. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89.
54. Chen X., Schmitt D.R., Kessler J.A., Evans J., Kofman R. Empirical relations between ultrasonic P-wave velocity, porosity and uniaxial compressive strength // *Canadian Journal of Exploration Geophysics*. – 2015. – Vol. 40, No. 5. – P. 24–29.
55. Жуков В.С., Моторыгин В.В. Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности горных пород на скорость продольной волны // *Вести газовой науки*. – 2018. – № 3(35). – С. 249–255.
56. Аверин А.П. Исследование параметров затухания при ультразвуковых наблюдениях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2004. – № 10. – С. 66–70.
57. Машинский Э.И. Влияние амплитудного фактора на затухание продольных и поперечных волн в сухом и водонасыщенном песчаниках // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 95–99.
58. Shirole D., Hedayat A., Walton G. Experimental relationship between compressional wave attenuation and surface strains in brittle rock // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – Vol. 124, No. 6. – P. 5770–5793. DOI:10.1029/2018JB017086
59. Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Тримонова М.А., Барышников Н.А., Новикова Е.В. Динамика роста трещины гидроразрыва по данным ультразвукового

- просвечивания в лабораторных экспериментах // *Физика Земли*. – 2021. – № 5. – С. 104–119. DOI: 10.31857/S0002333721050215
60. Николенко П.В., Зайцев М.Г. Экспериментальное исследование влияния нарушений сплошности на скорости упругих волн в напряжённых образцах горных пород с использованием ультразвуковой интерферометрии // *Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2022. – № 6. – С. 70–79.
61. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы. – М.: Изд-во МГРИ, 1990. – 103 с.
62. Николенко П.В., Косович Э.Л., Шкуратник В.Л., Эпштейн С.А. Физические основы ультразвуковых методов геоконтроля: Учебное пособие. – М.: Горная книга, 2016. – 78 с.
63. Ямщиков В.С. Введение в геоакустику. – М.: МГРИ, 1968. – 275 с.
64. Lockner D.A. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1993. – Vol. 30, No. 7. – P. 883–899. DOI: 10.1016/0148-9062(93)90041-B
65. Stanchits S., Surdi A., Gathogo P., Edelman E., Suarez-Rivera R. Onset of hydraulic fracture initiation monitored by acoustic emission and volumetric deformation measurements // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 47, No. 4. – P. 1521–1532. DOI: 10.1007/s00603-014-0584-y
66. Stanchits S., Burghardt J., Surdi A. Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48, No. 6. – P. 2513–2527. DOI: 10.1007/s00603-015-0848-1
67. Негурица В.П. Исследование и разработка многопараметрового ультразвукового метода и аппаратуры контроля состояния горных пород вблизи выработок: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1970. – 184 с.
68. Сирота Д.Н. Разработка ультразвуковых способов и средств геоконтроля в условиях помех на горных предприятиях: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1987. – 199 с.
69. Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Начев В.А., Турунтаев С.Б., Чумаков Т.К. Совместный акустический и деформационный мониторинг трещины гидроразрыва в лабораторном эксперименте // *Физика Земли*. – 2023. – № 3. – С. 148–157. DOI: 10.31857/S0002333723030134

70. Запорожец В.М. (ред.) Геофизические методы исследования скважин: Справочник геофизика. – М.: Недра, 1983. – 591 с.
71. Мингео СССР. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. – М.: Недра, 1985. – 31 с.
72. Pirson S.J., Trunz J.P., Gomez N.P. How to map fracture development from well logs // *World Oil*. – 1967. – Vol. 164, No. 4. – P. 95–100.
73. Beck J., Schultz A., Fitzgerald D. Reservoir evaluation of fractured Cretaceous carbonates in South Texas // *SPWLA 18th Annual Logging Symposium*. – 1977. – Paper M.
74. Aguilera R. Combined log analyses and material balance help to explain performance of naturally fractured reservoirs below the bubble point // *The Log Analyst*. – 1977. – Vol. 18, No. 6. – P. 3–12.
75. Гик Л.Д. Методы изучения трещин и пор горных пород на основе данных акустического каротажа // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 67–73.
76. Смирнов Н.А., Пивоварова Н.Е. Методическое руководство по применению аппаратуры волнового акустического каротажа АВАК-11. – Тверь: ООО «Нефтегазгеофизика», 2011. – 74 с.
77. Еникеев В.Н., Ташбулатов В.Д., Гайфуллин М.Я. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твёрдых ПИ // *Каротажник*. – 2011. – № 5. – С. 224–237.
78. Перелыгин В.Т., Машкин К.А., Рыскаль О.Е. и др. Аппаратурно-методические комплексы для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин // *Каротажник*. – 2015. – № 9. – С. 99–127.
79. Кормнов А.А. Обоснование и разработка ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжённого состояния массива в окрестностях выработок: Дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2018. – 126 с.
80. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // *Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 3. – С. 41–47.

81. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного нагружения // *Горный журнал*. – 2016. – № 6. – С. 60–63.
82. Николенко П.В., Зайцев М.Г. Перспективы развития ультразвукового метода контроля структуры и состояния массива на основе комплексирования акустических и оптических измерений // *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Тез. 15-й междунар. науч. школы молодых учёных*. – М.: ИПКОН РАН, 2021. – С. 128–131.
83. Che X.H., Qiao W.X. Acoustic field in formation generated by linear phased array transmitters in fluid-filled boreholes // *Chinese Journal of Geophysics*. – 2004. – Vol. 47, Suppl. 1. – P. 26–32. DOI: 10.1002/cjg2.3556
84. Шкуратник В.Л. Контактные условия пьезопреобразователей с массивом как помеховый фактор при реализации ультразвуковых методов геоконтроля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2010. – № 8. – С. 33–36.
85. Кормнов А.А., Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей при реализации ультразвукового корреляционного метода контроля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – Спец. вып. №1. – С. 43–52.
86. Wang H., Toksöz M., Fehler M. *Borehole Acoustic Logging – Theory and Methods*. – Cham: Springer, 2020. – 399 p. DOI: 10.1007/978-3-030-51423-5
87. Zemanek J., Caldwell R.L., Glenn E.E. Jr., Holcomb D.W., Norton L.J., Straus A.J.D. The Borehole Televiwer – a new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection // *Journal of Petroleum Technology*. – 1969. – Vol. 21, No. 6. – P. 762–774.
88. Dudley J.W. Quantitative fracture identification with the borehole televiwer // *Trans. SPWLA 34th Annual Logging Symposium*. – 1993. – Paper QQ.
89. Davidson J.A., Morriss S.L., Podio A.L. Estimates of formation sound speed from ultrasonic reflections // *Proc. SPE Annual Technical Conf. and Exhibition*. – 1995. – SPE-24688, 12 p.
90. Barton C.A., Moos D., Peska P., Zoback M.D. Utilizing wellbore image data to determine the complete stress tensor: application to permeability anisotropy and wellbore stability // *The Log Analyst*. – 1997. – Vol. 38, No. 6. – P. 21–33.

91. Терехов О.В., Горохов В.М., Садыков А.Р., Береснев В.В. Акустический сканер САС-90 как инструмент для решения геолого-геофизических задач при исследовании скважин // *Каротажник*. – 2012. – № 7–8. – С. 25–34.
92. Williams J.H., Johnson C.D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies // *Journal of Applied Geophysics*. – 2004. – Vol. 55, No. 1–2. – P. 151–159. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.06.009
93. Wang J., Huang J., Min H., Wang F., Wang Y., Han Z. Study on the weak interlayer identification method based on borehole photo-acoustic combined measurement: application to a landslide case study // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 20. – Art. 10545. DOI: 10.3390/app122010545
94. Li S.J., Feng X.T., Wang C.Y., Zhou H., Cui J. et al. ISRM suggested method for rock fractures observations using a borehole digital optical televiewer // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2013. – Vol. 46, No. 4. – P. 635–644. DOI: 10.1007/s00603-012-0344-9
95. Shirole D., Hedayat A., Walton G. Illumination of damage in intact rocks by ultrasonic transmission–reflection and digital image correlation // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2020. – Vol. 125, No. 7. – Art. e2020JB019526. DOI: 10.1029/2020JB019526
96. Stumm F., Chu A., Lange A.D., Paillet F.L., Williams J.H., Lane J.W. Use of advanced borehole geophysical techniques to delineate fractured-rock flow and fractures along water tunnels in N. Queens, New York // *USGS Water-Resources Investigations Report 01-4276*. – 2001. – 12 p.
97. Орехов А.Н., Аmani М.М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 198–209.
98. Сковородников И.Г., Штурба Б.А., Неклюдов А.Д., Карпенко А.П. Оценка трещиноватости массива скальных пород по данным геофизических исследований скважин // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2012. – № 3. – С. 154–159.
99. 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;
100. 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;

101.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.

102.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);

103.Глозман И.А. Пьезокерамика. М. Энергия 1967г. 192 с., илл.

104.ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые (2013) // Москва, Стандартинформ.

105.ГОСТ 11326.1-79. Кабель радиочастотный марки РК 50-2-11. Технические условия

106.Chou, C.-P., Hannaford, B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. 1996. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12(1), pp. 90-102

107.Эйгенсон Л. С., Моделирование, М., 1952

108.Кутателадзе С. С., Анализ подобия и физическое моделирование, Новосиб., 1986

109.Седов Л. И., Методы подобия и размерности в механике, 10 изд., М., 1987

110.Гухман А. А., Введение в теорию подобия, М., 1963

111.Насонов И.Д. Моделирование горных процессов/ И.Д. Насонов. – М.: Недра, 1978. – 229 с.

112.Кузнецов Г. Н. Требования по технике и методике моделирования методом эквивалентных материалов, Л: ВНИМИ, 1973. 56 с

113.С. М. Ши, Б. Г. Лиу, Ю. Ю. Сян, Ю. Ци. О выборе эквивалентных материалов для физического моделирования горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2018, 6, с. 64-74

114. Жусупбеков А.Ж., Калданова Б.О. Исследование механических свойств грунтового основания методом эквивалентного материала // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, 2016, 1(51), с. 392-396

115. Росстальной Е. Б. Лабораторные исследования влияния тампонажа закрепного пространства на несущую способность крепей методом эквивалентных материалов // Вестник кузбасского государственного технического университета, 2006, 6-2(58), с. 47-49

116. Гик Л. Д., Бобров Б. А., 1996, Экспериментальное лабораторное изучение анизотропии тонкослоистых сред: Геология и геофизика, 37, 97-110.

117. Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Прокатор О.М., Семёнов В.П. Физическое моделирование трещиноватых сред // Технологии сейсморазведки, 2008, 2, с. 64-73;

118. Tianyang L., Zizhen W., Yu J., Ruihe W., Yuzhong W. Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 183 (2019);

119. Николенко П. В., Зайцев М. Г. Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_5.

120. Гупало, Владимир Сергеевич. Обоснование конструктивных параметров подземных хранилищ радиоактивных отходов с учетом длительных тепловых воздействий на массив скальных пород : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.20, 25.00.22. - Москва, 2003. - 137 с. : ил.

121. 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)/

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Справка об использовании результатов диссертационной работы



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО  
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Б. Тульская ул., 52, Москва, 115191 · тел: (495) 955 22 86, факс: (495) 958 11 51  
pbi@ibrae.ac.ru, www.ibrae.ac.ru · ОГРН 1027700196468, ИНН 7726077310, КПП 772601001

17.03.2026 № 11404/ОП-0334

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Об использовании результатов  
диссертационной работы

#### СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы  
Чумакова Андрея Александровича «Разработка метода определения типа  
водопроницаемости трещин в массиве скальных пород на основе ультразвуковых  
измерений», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,  
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Настоящей справкой подтверждаю, что результаты диссертационного исследования  
Чумакова Андрея Александровича «Разработка метода определения типа водопроницаемости  
трещин в массиве скальных пород на основе ультразвуковых измерений», включая алгоритм работ  
в неводозаполненных скважинах с целью выделения в массиве трещин и определения типа их  
водопроницаемости (далее: Алгоритм), приняты к использованию в ИБРАЭ РАН

Результаты диссертационного исследования Чумакова А.А. на соискание учёной степени  
кандидата технических наук, включая разработанный Алгоритм, используются в ходе выполнения  
геологоразведочных работ по объекту: разведка участка захоронения радиоактивных отходов  
(Енисейский участок Нижне-Канского массива) Лицензия КРР 16117 ЗД от 22.07.2016г. Лицензия  
КРР 014222 ЗП от 26.04.2023 г., выполняемых в рамках реализации утверждённой руководством  
Госкорпорации «Росатом» «Комплексной программы исследований в обоснование  
долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров».

Директор



*Л.В. Матвеев*

Л.В. Матвеев

Исп.  
Тел./ Факс: