

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»



На правах рукописи

УДК 622.83:550.3

Кормнов Алексей Алексеевич

**Обоснование и разработка ультразвукового корреляционного метода
диагностики структуры и напряжённого состояния массива в
окрестностях горных выработок**

Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
канд. техн. наук
Николенко П.В.

Москва 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АКТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	9
1.1 Общая характеристика проблемы информационного обеспечения оценки и прогноза устойчивости горных выработок	9
1.2 Характеристика активных ультразвуковых методов и решаемых ими задач геоконтроля	17
1.3 Схемы реализации и информативные параметры ультразвуковых импульсных методов оценки строения и структурных неоднородностей массива горных пород в окрестностях выработок.....	21
1.4. Использование скважинных ультразвуковых импульсных измерений для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестностях горных выработок.....	24
1.5 Современное состояние ультразвукового контроля геосреды с использованием шумовых зондирующих сигналов и их статистической обработки.	28
Выводы и постановка задач исследования	31
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ	33
2.1 Теоретические предпосылки контроля приконтурного массива на основе применения ультразвуковых шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки	33
2.2 Характеристика зондирующих сигналов, информативных параметров и схем реализации ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжений массива в окрестностях выработки	38
Выводы к главе 2:.....	45
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В НИХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА	47
3.1. Компьютерное и физическое моделирование влияния структурных неоднородностей горных пород на корреляционные характеристики распространяющегося в них ультразвукового шумового сигнала.....	47
3.2 Оценка чувствительности метода ультразвукового корреляционного каротажа при выявлении трещиновидных дефектов в при-скважинной области массива	59
3.3 Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании образцов горных пород в условиях их одноосного механического нагружения	64

3.4 Компьютерное и физическое моделирование влияния контактных условий акустических преобразователей с геосредой на информативные параметры ультразвукового корреляционного метода геоконтроля	68
Выводы к главе 3:	74
ГЛАВА 4. АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА.	76
4.1. Принципы и реализация аппаратного обеспечения скважинного ультразвукового корреляционного метода геоконтроля с использованием шумовых зондирующих сигналов.....	76
4.1.1 Генератор шума для ультразвуковых корреляционных измерений в массиве горных пород ..	77
4.1.2 Скважинный зонд для излучения и приёма ультразвуковых шумовых сигналов	83
4.1.3 Аналого-цифровое преобразование и корреляционная обработка принятого шумового сигнала.....	87
4.2 Обоснование скважинных ультразвуковых способов контроля состояния массива в окрестностях горных выработок на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки	91
4.2.1 Способ ультразвукового каротажа пород кровли горных выработок на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки	91
4.2.2 Способ определения пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки	97
4.3 Натурные испытания ультразвукового корреляционного метода структурной диагностики приконтурного массива и оценки пространственного распределения напряжений в нём	102
4.3.1 Структурная диагностика пород кровли горной выработки	102
4.3.2 Применение ультразвуковых межскважинных корреляционных измерений для изучения пространственного распределения напряжений в окрестностях горной выработки.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Потеря устойчивости подземных горных выработок является обычно следствием динамики взаимодействующих между собой полей разномасштабной поврежденности и напряжений в окружающем выработки массиве. Вот почему наличие информации о параметрах этих полей и их пространственно-временных изменениях является необходимым условием надежного решения соответствующих прогнозных задач геомеханики. Получение указанной информации возможно с использованием широкого спектра геофизических методов, важное место среди которых занимают методы ультразвукового (УЗ) каротажа и межскважинного прозвучивания с использованием пробуренных в приконтурном массиве контрольных скважин. Традиционный вариант реализации этих методов предполагает применение в качестве зондирующих импульсных ультразвуковых сигналов, а в качестве информативных параметров – скорости их распространения и затухания в исследуемой геосреде. В тоже время известно, что информативность, помехозащищенность и чувствительность ультразвуковых импульсных измерений при оценке структурной поврежденности массива и его напряженно-деформированного состояния (НДС) чрезвычайно ограничены. В связи с этим представляется актуальным решение задач теоретического, методического и аппаратного характера, связанных с принципиальным совершенствованием УЗ измерений в окрестностях выработок за счет использования шумовых акустических сигналов и их последующей корреляционной обработки, а также обоснования и разработки на этой основе соответствующего метода геоконтроля.

Настоящая работа проводилась в рамках государственного задания № 2014/113 Минобрнауки РФ на 2014 -2016 гг. в сфере научной деятельности по теме «Оценка структуры, свойств и состояния горных пород на основе использования пассивных и активных шумовых акустических сигналов».

Цель работы состоит в установлении закономерностей влияния структурных неоднородностей и напряжений на корреляционные характеристики распространяющегося в геологической среде ультразвукового сигнала в виде стационарного случайного шума, обосновании и разработке на этой основе метода диагностики состояния массива в окрестностях горных выработок.

Идея работы заключается в использовании для оценки структурных особенностей и напряжённо-деформированного состояния приконтурного массива изменений параметров автокорреляционной и взаимной корреляционной функций распространяющегося в нём ультразвукового непрерывного шумового сигнала.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Межскважинное ультразвуковое прозвучивание и каротаж с использованием стационарного узкополосного шумового сигнала со средним равным нулю (в качестве зондирующего), а также параметров его корреляционных функций в точках приёма (в качестве информативных), позволяют достичь высокой чувствительности и надёжности диагностики геологического разреза, структурной неоднородности и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок.

2. Оптимальный алгоритм структурной диагностики кровли горных выработок предполагает пошаговое перемещение каротажного зонда вдоль контрольной скважины и измерение коэффициента взаимной корреляции ρ и интервалов корреляции τ_v и τ_n ультразвуковых шумовых сигналов, принимаемых в точках, расположенных симметрично выше и ниже точки излучения. При этом, величина ρ позволяет судить о наличии и степени структурной неоднородности околоскважинного массива между точками приема, а соотношение величин τ_v и τ_n - о расположении границы неоднородности относительно точек излучения и приема.

3. Минимизация помехового влияния контактных условий двух расположенных симметрично относительно излучателя приемников шумовых УЗ сигналов на результаты диагностики напряжений в окрестностях выработки корреляционным методом межскважинного прозвучивания достигается увеличением усилия прижима приемников к стенкам скважины до момента прекращения изменений интервалов корреляции сигналов на каждом из них. Измеренные после достижения этого момента коэффициенты взаимной корреляции указанных сигналов на различных глубинах контрольных скважин наиболее точно отражают пространственное распределение напряжений в приконтурном массиве.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- качественным совпадением установленных по результатам компьютерного моделирования, лабораторных и натурных экспериментов, закономерностей изменения корреляционных информативных параметров УЗ контроля в функции от дефектности и напряженного состояния геосреды, представительным объемом экспериментальных данных, лежащих в основе указанных закономерностей;

- использованием при проведении исследований апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов и программ компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных, а также средств измерений с высокими метрологическими характеристиками;

- удовлетворительным совпадением данных контроля исследуемых объектов геосреды ультразвуковым корреляционным и альтернативными геофизическими методами.

Методы исследований включают: анализ и обобщение научно-технической информации; теоретический анализ потенциальных возможностей, схем и информативных параметров корреляционного метода геоконтроля; компьютерное моделирование влияния структурной неоднородности геосреды на корреля-

ционные характеристики распространяющегося в ней шумового УЗ сигнала; лабораторный эксперимент на образцах горных пород различной поврежденности, а так же образцах, подвергаемых механическому нагружению с проведением в них УЗ время-импульсных и корреляционных измерений; натурное экспериментальное исследование приконтурного массива на основе его межскважинного прозвучивания и каротажа с использованием шумовых зондирующих УЗ сигналов.

Научная новизна работы заключается:

- в установлении закономерностей изменения информативных параметров УЗ корреляционного метода контроля под влиянием структурных неоднородностей и напряженного состояния геосреды;

- в обосновании возможных и выборе наиболее эффективных схем реализации и информативных параметров УЗ корреляционного метода изучения массива в окрестностях выработок;

- в обосновании способов определения структурной поврежденности и пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве на основе его межскважинного УЗ прозвучивания и каротажа с использованием шумовых сигналов и их корреляционной обработки;

- в разработке принципов построения аппаратного обеспечения УЗ корреляционного метода геоконтроля на основе сочетания аппаратных и программных средств формирования и статистической обработки шумовых акустических сигналов.

Практическая значимость и реализация полученных результатов

В рамках диссертационной работы разработана «Методика структурной диагностики пород кровли горных выработок с использованием ультразвукового корреляционного каротажа». Ее применение позволит повысить достоверность прогноза устойчивости выработок при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Методика используется ГИ УРО РАН на рудниках ПАО

«Уралкалий», а также передана ГИ КНЦ РАН и ИГД ДВО РАН, которыми планируется к использованию на горнорудных предприятиях соответствующих регионов.

Материалы диссертационной работы вошли в учебное пособие «Физико-технический контроль и мониторинг процессов горного или нефтегазового производства», которое используется в НИТУ «МИСиС» при подготовке специалистов по направлению «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

Апробация работы

Основные научные и практические результаты работы были доложены: на 18-й Международной экологической конференции студентов и молодых ученых (МГГУ, Москва, 2014 г.); на научных симпозиумах «Неделя горняка» (НИТУ «МИСиС», Москва 2015-2017 гг.); на X Международной школе-семинаре и VI Российско-китайском научно-техническом форуме (КНЦ РАН, Апатиты, 2016 г.); на Практической конференции по вопросам реализации научных разработок (Минобрнауки, Москва, 2016 г.), а также научных семинарах НИТУ «МИСиС».

Результаты работы были представлены и удостоены Диплома на Всероссийском конкурсе научно-технического творчества молодёжи НТТМ (Москва, 2016) отмечены грантом Американского акустического общества (Acoustical Society of America), 2016.

Публикации По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 6 – в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка использованной литературы из 142 источников, содержит 47 рисунков и 5 таблиц.

Глава 1. Современное состояние активных ультразвуковых методов информационного обеспечения оценки и прогноза устойчивости подземных горных выработок

1.1 Общая характеристика проблемы информационного обеспечения оценки и прогноза устойчивости горных выработок

Устойчивость горных выработок характеризует их способность сохранять форму и размеры поперечного сечения для нормального выполнения своих целевых функций в течение заданного времени [1]. Указанная устойчивость во многом определяет эффективность и безопасность освоения месторождений полезных ископаемых, строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения. Именно поэтому оценка и прогноз устойчивости выработок рассматриваются в качестве одной из приоритетных задач геомеханики и геоконтроля.

Основными формами потери устойчивости выработок являются вывалообразование, обрушение и смещение поверхности выработок, прежде всего их кровли [2,3]. Указанным, как и всем другим формам потери устойчивости, как правило, предшествует определенный «подготовительный» период, в процессе которого в окружающем выработку массиве происходят те или иные изменения структуры, свойств и состояния горных пород. Получение информации об этих изменениях лежит в основе решения соответствующих прогнозных задач, направленных на установление функциональной и структурной устойчивости выработок. В тоже время сложность решения указанных задач представляется достаточно очевидной, поскольку устойчивость выработок является функцией чрезвычайно большого количества факторов, определяющих горнотехнологические и горно-геологические условия каждой конкретной выработки. Обычно информация о горнотехнических условиях, хотя и характеризуется некоторой неопределённостью, всё же является относительно полной и содержится в соответствующей проектной и эксплуатационной документации. При этом информация

о горно-геологических условиях всегда ограничена. Последнее, наряду с несовершенством геомеханических критериев оценки устойчивости выработок, объясняет, почему указанная оценка принципиально возможна только на вероятностном уровне. Из сказанного следует важность повышения достоверной вероятности прогнозных оценок устойчивости подземных горных выработок. Фактически существует два основных направления такого повышения. Первое из них связано с совершенствованием соответствующих критериев прогноза, что является предметом рассмотрения теоретической и прикладной геомеханики [4,5]. Второе направление связано с повышением качественных и количественных показателей информации о горно-геологических условиях, в которых строятся и эксплуатируются выработки. Реализация указанного направления предполагает совершенствование методов и средств геоконтроля, прежде всего геофизических [6,7].

Важнейшими задачами, решаемыми геофизическими методами при оценке состояния горных выработок, являются изучение геологического строения и параметров, характеризующих разномасштабные структурные неоднородности и дефектность приконтурного массива, а также его напряженно-деформированное состояние и изменение последнего во времени и пространстве.

Геофизические методы, привлекаемые для решения этих задач, могут быть разбиты на две группы. Первая из них объединяет так называемые дистанционные методы. Последние еще называют не скважинными, так как они не предполагают нарушений сплошности массива в окрестностях горных выработок, т.е. бурения в нем контрольных шпуров (скважин).

К указанным методам относится, в частности, резонансный (спектральный) акустический метод [8 - 10], заключающийся в ударном возбуждении свободной поверхности кровли и последующем анализе резонансных откликов каждого из слоев, слагающих кровлю. Исходя из существующих теоретических представлений, частоты резонансных максимумов полученных спектрограмм

несут информацию о расстоянии от кровли выработки до соответствующих литологических слоев, а их амплитуда о качестве контакта между слоями. В тоже время, резонансный метод эффективен только при выявлении достаточно резких акустических границ и не позволяет получать какую-либо информацию о НДС приконтурного массива.

Еще один дистанционный метод так называемого сейсмического профилирования. Он позволяет оценить в приконтурной области массива положения зон опорного давления и границы основной и непосредственной кровли по спектрам интерференционных волн, регистрируемых вдоль профиля на контуре выработки [11]. Однако такая оценка оказывается возможной далеко не всегда, поскольку не всегда реальные горно-геологические условия благоприятны для возникновения интерференционных волн.

Имеются отдельные примеры успешного решения тех же задач методом активной георадиолокации в условиях месторождений каменных солей, а также изучения пород кровли на основе георадарных исследований в условиях гипсового месторождения [12].

Оперативный контроль критического состояния массива в окрестностях выработок возможен также путём регистрации и анализа возникающей в нём электромагнитной эмиссии [13 - 15].

Для дистанционного контроля состояния массива в окрестностях выработок принципиально может быть использован широкий спектр электрометрических методов горной и инженерной геофизики, которые подробно рассмотрены, например, в [16 - 19]. Это (относительно редко) различные модификации методов естественного электрического поля, а также (чаще) - методы постоянного и переменного тока от искусственных источников, реализуемые по схемам электрического зондирования или профилирования. Однако реальные примеры использования указанных методов при контроле устойчивости подземных горных выработок единичны. В основном они сводятся к выявлению и оконтуриванию в

приконтурном массиве нарушенных (трещиноватых) зон. Для этих методов характерны относительно низкое разрешение, сильное помеховое влияние влаги, а также высокая трудоёмкость, как самих измерений, так и интерпретации их результатов. Причём однозначность указанной интерпретации представляет собой не просто сложную, но в ряде случаев и неразрешимую задачу. Это связано с тем, что удельное электрическое сопротивление разных типов пород (и даже одних и тех же, но с разным содержанием флюидов) с увеличением давления может как уменьшаться, так и увеличиваться [20]. Кроме того, указанное сопротивление в некоторых типах пород (например, угле) существенно зависит от температуры.

Принципиально для выявления неоднородностей в окрестностях выработок может быть использована звуковая и ультразвуковая локация со свободной поверхности. Однако реально для решения соответствующих задач она практически не используется из-за принципиальной невозможности одновременного достижения требуемой глубинности и разрешающей способности контроля. В основном исследования в области акустической эхо-локации приконтурного массива ограничиваются теоретическими проработками [21, 22].

Оценивая, в целом, дистанционные (не скважинные) методы оценки структурных особенностей и состояния массива в окрестностях горных выработок можно сделать следующие выводы. Все они имеют явное и очевидное преимущество перед скважинными методами, проявляющееся в большей производительности контроля и его меньшей трудоёмкости. В то же время у этих методов имеется и ряд принципиальных недостатков. Это - относительно низкая разрешающая способность, чувствительность и помехозащищённость, сложность и возможная неоднозначность интерпретации экспериментальных данных, ограниченная глубина и др. Кроме того, каждый из рассмотренных методов, используя конкретное физическое поле, оказывается относительно эффективным при исследовании только определенных типов горных пород и неоднородностей. Другими словами, ни один из них не может считаться универсальным и применимым в различных горно-геологических условиях.

Скважинные методы изучения приконтурного массива в окрестностях выработок предполагают перемещение одного (в случае каротажных измерений) или нескольких (в случае межскважинных измерений) измерительных зондов в глубину массива от свободной поверхности выработки. В процессе такого непрерывного или дискретного перемещения с помощью зонда в массиве возбуждаются сигналы той или иной физической природы, которые затем (после прохождения соответствующего исследуемого участка) воспринимаются приемными преобразователями того же (при каротаже) или других (при прозвучивании или просвечивании) зондов. Затем принятые сигналы, в зависимости от их природы, подвергаются той или иной обработке, направленной на извлечение искомой информации о структурных особенностях приконтурного массива и его НДС [23].

Описанные скважинные методы относятся к так называемым активным методам, которые предполагают излучение в массив специально генерируемого сигнала. При прохождении последнего через исследуемый участок массива происходит изменение его информативных параметров, содержащих искомую информацию геоконтроля.

В отличие от активных методов пассивные предполагают только прием сигналов, которые «генерируются» горными породами и могут иметь самую различную физическую природу. Другими словами, источником таких сигналов является сам исследуемый участок массива [24].

Существует значительное количество активных и пассивных скважинных методов исследования массива: электрические и электромагнитные; ядерно-геофизические; радиометрические; термические; магнитные и др. [25 - 31]. Однако, по чисто физическим, технологическим и техническим причинам далеко не все из них являются эффективными при изучении структурных особенностей и напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестностях выработок. Это обусловлено неоднозначностью взаимосвязей информативных параметров контроля и искомых параметров геосреды (как это характерно, например, для скважинной электрометрии). избирательной чувствительностью

каждого из методов к определённым свойствам геосреды. Кроме того, для ряда методов это связано с существующими ограничениями по диаметру и глубине скважин в условиях подземных выработок. Существуют также ограничения, обусловленные соответствующими правилами безопасности, невозможностью использования аппаратного обеспечения, которое разрабатывалось в большинстве случаев для решения задач геологоразведки и инженерно-геологических изысканий с земной поверхности.

Тем не менее, можно выделить ряд методов, которые позволяют оценить структурные особенности массива и (или) его напряженно-деформированное состояние в окрестностях горных выработок на основе скважинных измерений. При этом будем рассматривать только те методы, которые могут быть реализованы в скважинах малого диаметра (не более 42 мм).

Прежде всего, отметим телевизионный каротаж с использованием либо скважинного акустического телевизора (САТ) [30], либо телевизионной аппаратуры исследования скважин (ТАИС) [32]. Разрешающая способность САТ приблизительно равна длине излучаемой волны и составляет 0,8 – 1,0 мм по горизонтали и вертикали. Разрешающая способность ТАИС достигает 0,2 мм. Хотя создание САТ для работы в скважинах малого диаметра принципиально возможно, однако промышленностью они не выпускаются. Что касается ТАИС, то имеются разработки МГГУ и DMT (Германия), предназначенные для работы в шпурах диаметром 42 мм. Основным недостатком телевизионного каротажа является возможность получения с его помощью информации только с поверхности скважин. Отметим, что каротаж с использованием САТ по сути является активным, в то время как каротаж на основе ТАИС – пассивным.

Среди пассивных геофизических методов, которые реально могут быть использованы для исследования приконтурного массива в режиме каротажа следует выделить акустико-эмиссионный метод. Он позволяет, измеряя параметры акустической эмиссии (АЭ), качественно оценивать напряженно-деформирован-

ное состояние в окрестности выработки, оконтуривать ослабленные зоны, фиксировать активность (подвижность) отдельных структурных элементов массива и изучать степень их поврежденности [30 - 33]. Аналогичные задачи могут решаться и с помощью каротажных измерений параметров электромагнитной эмиссии (ЭМИ), а также совместного измерения параметров ЭМИ и АЭ [34, 35]. В тоже время информация, получаемая с помощью АЭ и ЭМИ исследований, является чисто качественной, а проблема однозначной интерпретации этой информации до настоящего времени не решена.

Определенный интерес для исследования напряжённого состояния и повреждённости приконтурного массива представляют методы на основе акустико-эмиссионного и электромагнитного эмиссионного эффектов памяти (ЭП) горных пород [36, 37]. Реализация этих методов стала возможной, благодаря представленным в [38] методическим и аппаратным разработкам скважинных преобразователей, обеспечивающих измерение параметров АЭ и ЭМИ в шпурах при одновременном циклическом механическом нагружении стенок скважины. В тоже время очевидно, что эмиссионные скважинные методы контроля напряжений в приконтурном массиве требуют своего совершенствования. Последнее связано с созданием устройств направленного сосредоточенного нагружения скважин, учитывающего ориентацию главных напряжений в массиве, а также методик интерпретации результатов измерений, учитывающих сложнапряженное состояние реального массива. Кроме того, следует учитывать, что на проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти значительное влияние может оказывать естественная неоднородность и нарушенность горных пород. В связи с этим представляет интерес подход, при котором оценка напряжений осуществляется на основе проявлений акустико-эмиссионного эффекта памяти не в горных породах, а в размещаемых в контрольных скважинах относительно однородных композиционных материалах [39].

Существуют и другие геофизические методы, пригодные для исследования массива из скважин малого диаметра, пройденных непосредственно из выработок. Это, прежде всего, методы инфракрасной радиометрии (ИКР) [26], электроемкостного каротажа (ЭЕК) [40]; ультразвукового (УЗ) прозвучивания и каротажа [27].

Важным достоинством первых из двух указанных выше методов является отсутствие необходимости в обеспечении контактных условий соответствующих первичных преобразователей со стенками скважины. В тоже время метод ИКР чувствителен (причём относительно мало) только к изменениям НДС вдоль скважины, а различный литологический состав, а значит и теплофизические свойства пород, пересекаемых скважиной, выступают в качестве помехового фактора.

Возможности метода ЭЕК, по крайней мере на сегодня, ограничены только выявлением и идентификацией структурных неоднородностей в окрестностях скважины, прежде всего трещиноватости. Метод предполагает получение на основе электроемкостных одночастотных измерений значений комплексной проводимости геологической среды вдоль измерительной скважины. Далее по указанным значениям определяют межэлектродную ёмкость зонда, диэлектрическую проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и удельную электрическую проводимость исследуемой геосреды [41].

Представляется, что при использовании оптимальных (лучше нескольких) частот электроемкостных измерений, перечисленные информативные параметры могут быть использованы и для оценки динамики НДС вдоль скважины. Однако создание необходимого для этого аппаратного и методического обеспечения является нетривиальной задачей, которая ещё требует своего решения.

Для оценки структурных особенностей массива в окрестностях выработок могут использоваться различные модификации активных и пассивных скважинных электрометрических измерений, для которых, однако, характерны те же недостатки и проблемы, которые были отмечены выше для дистанционных электрометрических измерений [42].

Что касается УЗ каротажа и межскважинного прозвучивания, то возможности их использования для оценки строения и структурной поврежденности массива в окрестностях выработок, а также оценки его НДС обоснованы теоретически и доказаны экспериментально [23, 27, 40, 43, 44]. Более того, накоплен достаточно большой опыт практического использования УЗ измерений для оценки состояния целиков и подземных выработок различного назначения [30, 44].

Видимо на сегодняшний день УЗ методы являются наиболее эффективными среди скважинных методов контроля состояния массива в окрестностях выработок. В тоже время, хотя эти методы отличаются довольно высоким уровнем аппаратного и методического обеспечения, однако они имеют свои недостатки, в существующем виде во многом не удовлетворяют требованиям практики геоконтроля, а их потенциальные возможности остаются не реализованными. Поскольку настоящая работа посвящена вопросам совершенствования УЗ методов, ниже предлагается подробный анализ последних с акцентом на суть и причины их недостатков.

1.2 Характеристика активных ультразвуковых методов и решаемых ими задач геоконтроля

Среди активных геофизических методов геоконтроля особое место занимают методы, основанные на применении упругих колебаний и волн так как последние связаны устойчивыми функциональными и корреляционными связями с важнейшими физико-механическими свойствами, структурными особенностями и напряженно-деформированным состоянием горных пород. Вне зависимости от диапазона частот упругих волн указанные методы принято относить к геоакустическим.

Ультразвуковые (УЗ) методы, являющиеся важной составляющей геоакустических, предполагают использование упругих колебаний и волн, частота которых превышает 20 кГц и имеет верхнюю границу, как правило, не выше 1 МГц [27].

УЗ методам принадлежит ведущая роль при решении задач горной геофизики, связанных с экспрессным исследованием образцов горных пород или относительно небольших участков массива, но требующих высокого разрешения. Во многом это обусловлено уровнем их теоретического, методического и аппаратного обеспечения, который был достигнут благодаря исследованиям Ватолина Е.С., Воляровича М.П., Глушко В.Т., Голяминой И.П., Данилова В.Н., Ермолова И.Н., Мамбетова Ш.А., Кажиса Р.И., Козырева А.А., Меркуловой В.М., Панина В.И., Рубана А.Д., Савича А.И., Силаевой О.И., Турчанинова И.А., Тютюнника П.М., Шкуратника В.Л., Ямщикова В.С. и др. учёных.

Первоначально УЗ методы геоакустики использовались для моделирования волновых явлений в лабораторных условиях и петрофизических исследований на образцах горных пород. Во многом развитию таких исследований способствовали теоретические работы Лившица И.М. и Меркулова Л.Г., доказавшие чувствительность информативных параметров УЗ контроля к структурным особенностям поликристаллов и синтезированных твёрдых сред [46, 47].

Позднее, начиная со второй половины прошлого века, УЗ методы стали применяться для: структурной диагностики геоматериалов; дефектоскопии блоков природного камня, изучения степени их нарушенности под влиянием выветривания и термических воздействий; скважинных исследований структуры, свойств и состояния массива в окрестностях горных выработок [30, 48 - 51].

Среди задач геоконтроля, которые могут решать УЗ методы, следует выделить определение ряда физико-технических параметров, характеризующих свойства горных пород. Совокупность таких параметров, расклассифицированных в соответствии с [52], представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-технические параметры горных пород, определяемые УЗ методами

Группа свойств	Подгруппа свойств	Определяемый параметр	Литературные источники
1	2	3	4
Плотностные	-	Плотность Пористость	52,53,54,55,56
Механические	Упругие	Модуль Юнга Коэффициент Пуассона Модуль сдвига	55,57,58
	Пластические	Коэффициент пластичности Модуль деформации	45,59
	Прочностные	Предел прочности при сжатии Угол внутреннего трения	21,55,60
	Реологические	Период релаксации	45,61
Волновые	Акустические	Скорость распространения волн Коэффициент затухания Коэффициент отражения Коэффициент преломления Удельное волновое сопротивление	54,55,62,63
Горно-технологические	Характеризующие общую разрушаемость	Коэффициент крепости Твердость	64,65

Отметим, что из приведенных в указанной таблице параметров только упругие связаны с акустическими характеристиками горных пород функциональными связями. Для определения всех остальных параметров используются корреляционные зависимости, которые, как правило, индивидуальны не только для каждого типа пород, но и для каждого месторождения и даже отдельных его участков. Кроме того, на эти зависимости сильно влияют многочисленные помеховые факторы, например, влажность, температура, степень выветривания и др.

УЗ методы, конечно же, не ограничиваются определением свойств горных пород на образцах. Они позволяют решать ряд практических задач геоконтроля непосредственно в массиве. В частности, имеются данные об использовании УЗ

метода для оценки эффективности мер, применяемых для снижения рисков возникновения горных ударов, таких, например, как нагнетание воды в удароопасный пласт [66].

Имели место попытки прогнозирования УЗ методами внезапных выбросов соли и газа на калийных рудниках [67], базирующиеся на установленном авторами факте повышения скорости распространения ультразвука в газоносных зонах.

В [27,53] приведено обоснование возможности использования данных о распространении ультразвука для оценки пористости и трещиноватости скальных горных пород. Здесь же показано, что используя различные типы упругих волн и измеряя скорость их распространения в определенных направлениях относительно основной системы трещин, а также сопоставляя скорости продольных волн в сухих и водонасыщенных породах можно оценить полную и открытую пустотность пород.

В работе [68] теоретически и экспериментально установлены закономерности влияния микротрещин различной ориентации в геосреде на скорость распространения продольных и поперечных УЗ волн в ней, на основе чего обоснован соответствующий метод изучения микротрещиноватости.

Важным направлением использования УЗ методов является изучение и контроль напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива в окрестностях горных выработок. Они позволяют: определять пространственное распределение поля напряженности в техногенно нарушенном массиве, а также абсолютные значения напряжений на основе предварительно полученных тарировочных зависимостей; контролировать динамику напряжений во времени и пространстве; оценивать устойчивость конструктивных элементов систем разработки, например целиков [27, 53, 59, 69-72].

УЗ методы позволяют оценить случайные (обусловленные флуктуацией свойств породы) и регулярные или структурные (связанные с определенными

геометрическими закономерностями строения и состояния геосреды, ее трещиноватостью, слоистостью, блочностью, разрывными нарушениями и т.д.) неоднородности массива. Соответствующая оценка строится на анализе средней скорости продольных волн от частоты, базы и направления УЗ измерений [53, 58, 71, 72].

1.3 Схемы реализации и информативные параметры ультразвуковых импульсных методов оценки строения и структурных неоднородностей массива горных пород в окрестностях выработок

Ультразвуковой контроль состояния приконтурного массива осуществляется с использованием схем межскважинного прозвучивания и каротажа [27, 53]. И в том, и в другом случае реализуется метод проходящих волн, когда область воздействия эксперимента (контролируемая область геосреды) находится между излучающим и приемным пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП).

При межскважинном прозвучивании ПЭП могут располагаться как на одной, так и на разных глубинах минимум в двух параллельных скважинах, в которых они синхронно перемещаются от контура выработки вглубь массива. В тоже время при каротаже указанные ПЭП располагаются в одной скважине на некотором фиксированном расстоянии друг от друга и также синхронно перемещаются вдоль скважины.

В ряде случаев применяются и другие схемы УЗ измерений, например, реализуется диагональное межскважинное прозвучивание, позволяющее, в частности, выделять поперечные упругие волны за счёт особенностей их диаграммы направленности [53, 70]. Что касается каротажа, то довольно часто используются схемы измерений, с одним излучающим и несколькими приемными ПЭП.

В качестве зондирующего сигнала при реализации УЗ методов геоконтроля используются импульсные сигналы. Последние обеспечивают временное разрешение при УЗ измерениях и возможность выделения времени прихода

на приёмный ПЭП различных типов волн [73]. Однако, для возбуждения указанных сигналов приходится использовать довольно высокое импульсное электрическое напряжение, что обусловлено значительным затуханием ультразвука в геосреде [71]. При этом возникают проблемы, связанные с обеспечением искровзрывобезопасности соответствующей аппаратуры [74].

Кроме того, недостатками традиционных импульсных УЗ методов проходящих волн являются низкая фронтальная разрешающая способность и отсутствие разрешающей способности вдоль направления прозвучивания [27, 73], а при реализации в скважинном варианте еще и проблема обеспечения надежных контактных условий ПЭП с массивом [75].

В качестве информативного параметра при межскважинном прозвучивании и каротаже преимущественно используется скорость распространения продольных волн C_p , что объясняется высоким уровнем соответствующего аппаратного обеспечения. Реже используется скорость распространения поперечных упругих волн C_s и амплитудные характеристики импульсного УЗ сигнала. Это связано с тем, что точное автоматическое их измерение в современных приборах так и не реализовано [74]. Кроме того, формирование и прием поперечных упругих волн специальными сдвиговыми ПЭП в скважинах представляет серьезную техническую проблему из-за ограниченного диаметра скважин и сложности обеспечения жесткого и надёжного акустического контакта ПЭП со стенками последних. Отмеченное обуславливает также чрезвычайно ограниченное использование при скважинных измерениях амплитудных характеристик УЗ сигнала, которые обладают большей абсолютной чувствительностью, но при этом малой относительной (учитывающей влияние помеховых факторов) [72]. Следует также учитывать специфику скважинных измерений в окрестностях выработок, которая заключается в использовании не обсаженных скважин, стенки которых характеризуются различного рода неровностями. Кроме того, скважины могут быть в различной степени обводнены, что также влияет на качество контактных условий ПЭП с массивом [76].

Важнейшим критерием выбора информативного параметра θ УЗ контроля является его информативность. Для оценки последней используются различные показатели, наиболее удачный из которых обоснован в [72]. Этот показатель I представляет собой отношение приращения информативного параметра $\Delta\theta$ при изменении изучаемого фактора к среднеквадратическому отклонению σ_θ результатов многократных измерений величины параметра θ :

$$I_\theta = \Delta\theta / \sigma_\theta \quad (1.1)$$

Показатель (1.1) с одной стороны характеризует чувствительность соответствующего информативного параметра, а с другой – уровень его флуктуаций, обусловленных влиянием помеховых факторов различной физической природы.

Многочисленные экспериментальные исследования влияния структурных неоднородностей приконтурного массива (в частности его трещиноватости) на скорость распространения C_p и амплитуду A импульсного УЗ сигнала свидетельствуют о том, что $\Delta C_p \ll \Delta A$. В тоже время и $\sigma_c \ll \sigma_A$, что связано главным образом со значительным влиянием на величину A контактных условий ПЭП со стенками скважины. В целом же показатель информативности $I_A < I_c$ [72].

Таким образом, как скорость распространения C_p , так и амплитуда A обладают низкими показателями информативности I . Причем, если повышение I_A , хотя и сложно, но в принципе возможно за счёт различных способов уменьшения σ_A , то повышение значения I_c (поскольку оно определяется в основном величиной ΔC_p) не представляется возможным из-за чисто физических ограничений.

Кроме величин C_p и A в качестве информативных параметров УЗ дефектоскопии горных пород в массиве могут использоваться также частота f_m максимума амплитудного спектра принятого импульсного сигнала и длительность переднего фронта τ его первой полуволны.

Дефект, например, в виде трещины влияет на указанный сигнал как фильтр низких частот, который смещает максимум амплитудного спектра сигнала f_m в низкочастотную область, что сопровождается ростом τ . Причём, следует

отметить, что информативность параметров f_m и τ может превышать информативность параметра C , но только при определённых соотношениях между f_m и величиной раскрытия трещины [72, 77]. Это является объективным ограничением возможностей использования указанных информативных параметров.

Отметим, что применение величин f_m , а значит и τ , в качестве информативных параметров контроля структурной повреждённости геосреды при её ультразвуковом прозвучивании, впервые теоретически было обосновано достаточно давно [77, 78]. Однако до настоящего времени использование указанных информативных параметров в практике ультразвукового контроля приконтурного массива носит единичный характер. Примеры такого использования в основном связаны с дефектоскопией блоков облицовочного камня [79]. Для выявления трещиновидных дефектов непосредственно в массиве эти параметры используются достаточно редко, что связано, прежде всего, с указанным выше ограничением условий, при которых они достаточно информативны. Кроме того, для измерения f_m отсутствует соответствующее серийно выпускаемое аппаратное обеспечение. Что касается величины τ , то для её измерения в автоматическом режиме был разработан и серийно выпускался ПО «Волна» (г. Кишинёв) специализированный прибор УК-14П [78]. Тем не менее, по указанной выше причине, связанной с определёнными ограничениями информативности параметра τ , а также существенным влиянием на его величину контактных условий ПЭП с массивом, широкого использования этот параметр так и не получил.

1.4. Использование скважинных ультразвуковых импульсных измерений для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестностях горных выработок.

Впервые эффект влияния напряжений на скорость распространения упругих волн в твёрдых средах был экспериментально установлен ещё в начале 50-х годов прошлого века [80]. Впоследствии этот эффект был назван акусто-

упругостью, а основанный на этом эффекте метод контроля, получивший название метода акустической тензометрии, начал широко использоваться для определения механических напряжений в различных конструкционных материалах [81]. Что касается традиционного метода ультразвукового импульсного прозвучивания, то первые попытки его активного практического применения для оценки НДС массива в окрестностях выработок относятся к середине 60-х годов [44, 45, 58]. Такое применение базируется на установленном теоретически и экспериментально влиянии давления на акустические характеристики геосреды, а значит и параметры принятого акустического сигнала.

Согласно существующим представлениям, с увеличением давления закрываются поры и трещины, растёт количество и степень упругих связей, что сопровождается увеличением скорости C распространения продольных и поперечных упругих волн в горных породах и уменьшением их коэффициента затухания α . Отмеченное происходит вплоть до напряжений, при которых начинается дезинтеграция (разрушение) геоматериала, когда изменяется на противоположный знак производной величин ΔC и $\Delta \alpha$ [53, 82, 83]. Отметим общепринятую сегодня точку зрения о том, что изменение параметров упругих волн под влиянием напряжений связано не столько с динамикой физико-механических свойств геосреды, сколько с изменениями её структуры и повреждённости.

Реализация контроля напряжений в приконтурном массиве осуществляется в большинстве случаев с использованием тех же схем скважинных УЗ измерений, которые используются при изучении строения и структурных особенностей геосреды. При этом использовался изначально и продолжает использоваться до настоящего времени импульсный режим излучения УЗ сигналов, после приема которых на заданной базе L контроля, измеряются их кинематические и динамические информативные параметры. Чаще всего это время t_p между моментами излучения и приема указанных сигналов, которое далее пересчитывается в скорость распространения C_p продольных упругих волн в геосреде. Величина C_p , в свою очередь, коррелирует с НДС горных пород [53, 71, 82].

Реальные возможности применения УЗ метода для оценки НДС горных пород в массиве ограничены относительно низкой тензочувствительностью акустических характеристик (особенно скоростей распространения УЗ сигналов), влиянием на неё ряда помеховых факторов. Среди указанных факторов (которые ещё и усложняют интерпретацию результатов УЗ измерений) особенно следует отметить: неоднородность и анизотропию свойств горных пород; значительное влияние режимов нагружения геоматериала на его акустическую тензочувствительность. В частности, последняя существенно уменьшается в условиях сложнопонапряжённого состояния, которое препятствует процессам дезинтеграции горной породы. [84].

Применение ультразвукового метода для количественной оценки напряжений, действующих в массиве, связано с необходимостью предварительных тарировочных измерений. Последние могут проводиться в лабораторных условиях на образцах, а также непосредственно в массиве, путём нагружения его участков с помощью гидродомкрата. Возможен также вариант сочетания проводимых параллельно УЗ измерений и измерений методом разгрузки [85].

Принципиально УЗ скважинный метод позволяет осуществлять определение даже полного тензора напряжений в приконтурном массиве. Такое определение реализуется на основе соответствующих измерений в кровле и стенках выработки (соответственно, в трёх ортогональных направлениях) в сочетании с упомянутыми выше тарировочными измерениями [85]. В то же время необходимо отметить, что сложность проведения тарировочных измерений, а главное низкая надёжность получаемых с их помощью корреляционных зависимостей, объясняет почему для количественной оценки НДС скважинные УЗ измерения используются достаточно редко.

В основном указанные измерения применяются для изучения пространственного распределения напряжений в окрестностях горных выработок. В частности, они позволяют выявлять зоны: естественных напряжений; опорного давления; нарушенных пород. Для первой из них характерно отсутствие влияния

выработанного пространства, для второй - максимальный уровень напряжений, для третьей - пониженная несущая способность [1, 2, 86]. Близость зоны опорного давления к контуру выработки и неизменность её положения во времени и в пространстве являются важными прогностическими признаками устойчивости выработки, которые могут быть использованы при мониторинге её состояния.

В настоящее время получили распространение два направления повышения эффективности контроля напряжений в окрестностях выработок с использованием традиционных скважинных УЗ измерений. Первое из них предполагает совершенствование методического и аппаратного обеспечения измерения соответствующих информативных параметров: скорости распространения импульсного УЗ сигнала и его амплитуды. В основе такого совершенствования лежат: оптимизация параметров излучаемого сигнала; повышение эффективности пьезоэлектрических преобразователей; учёт влияния на принятый сигнал частотно-зависимого затухания упругих волн в геосреде; переход от аналоговой к цифровой обработке измерительной информации; обеспечение помехозащищённости УЗ измерений и др. [87- 92].

Второе и основное из указанных выше направлений связано с повышением информативности УЗ контроля НДС за счёт снижения влияния на его результаты несовершенства контактных условий ПЭП с массивом [93, 94]. Такое снижение позволяет перейти от менее информативных кинематических параметров УЗ сигнала к более информативным динамическим, например, за счёт реализации УЗ контроля с использованием: режима эхо-локации или одновременных двухчастотных измерений [95-97].

Подводя итоги предыдущего и настоящего параграфа, можно отметить следующее. Несмотря на достаточно высокий достигнутый на сегодняшний день уровень методического и аппаратного обеспечения традиционных УЗ скважинных измерений в приконтурном массиве, они ещё во многом не удовлетворяют требованиям практики геоконтроля. Более того, их совершенствование воз-

можно только на основе принципиально новых подходов, предполагающих использование иных нежели импульсные УЗ сигналов и принципиально новых по сравнению с традиционными методов их обработки.

1.5 Современное состояние ультразвукового контроля геосреды с использованием шумовых зондирующих сигналов и их статистической обработки.

Понятие «шум» чаще ассоциируется с понятием «помеха» нежели с сигналом, несущим полезную информацию. Поэтому не удивительно, что на протяжении долгого времени, абсолютное большинство научно-технических публикаций, посвящённых шумам, было связано с их подавлением, а не использованием в качестве источника информации [98, 99]. Однако, уже во второй половине прошлого века, в нашей стране и за рубежом акустические шумы, возникающие в геосреде (их принято называть геоакустическими), всё чаще стали использоваться для исследования её структурных неоднородностей и происходящих в ней динамических явлений. При этом осуществлялся пассивный режим контроля в низкочастотных областях сейсмического и звукового диапазонов частот [100, 101]. Соответствующее направление геофизических исследований в настоящее время продолжает интенсивно развиваться [102, 103].

Активный режим геоконтроля с использованием акустических шумов в качестве носителя информации о геологической среде получил развитие относительно недавно. Реализация такого режима может осуществляться в двух вариантах. Первый вариант предполагает использование шумовых акустических сигналов, возникающих в массиве при взаимодействии с ним породоразрушающего инструмента различного технологического оборудования [104 - 108]. При этом, как правило, возникают относительно широкополосные и мощные акустические сигналы, позволяющие исследовать массив горных пород на достаточно больших базах и в широком диапазоне частот [109]. Однако эти сигналы являются

принципиально нестационарными, что накладывает серьёзные ограничения на способы их статистической обработки, значительно усложняет реализацию последней, а также снижает надёжность получаемой информации о массиве.

Второй вариант реализации активного контроля геосреды с использованием шумовых акустических сигналов предполагает возбуждение последних с помощью пьезоэлектрического преобразователя, который, в свою очередь, возбуждается электрическим генератором шума. Именно этот вариант позволяет осуществлять контроль горных пород в УЗ диапазоне частот, представляющем наибольший интерес для рассматриваемых в настоящей работе задач.

Соответствующий метод контроля (получивший название шумового статистического метода) был предложен и практически реализован применительно к дефектоскопии блоков природного камня В.Н. Носовым в Московском горном институте (МГИ) более 40 лет назад [110]. Тогда же были обоснованы спектральные и корреляционные информативные параметры контроля [111], разработаны принципы аппаратного обеспечения метода [112].

Созданный в МГИ комплекс соответствующей аппаратуры включал: генератор шума с полосой частот 10 – 500 кГц и выходным напряжением до 100 В; последовательный анализатор спектра шумовых сигналов в диапазоне рабочих частот 55 – 80 кГц и полосой анализа 500 Гц; корреляционный анализатор, обеспечивающий измерение параметров автокорреляционной и взаимной корреляционной функций в частотном диапазоне 20 – 200 кГц. Все составляющие комплекса имели автономное питание и относительно небольшие массу и габаритные размеры, что позволяло использовать их в полевых условиях. В тоже время, в основе реализованных в аппаратуре схемных решений, лежали аналоговые принципы обработки сигналов, что во многом ограничивало её технические возможности. Особенно это касается корреляционного анализатора, в котором были использованы довольно громоздкие дискретно переключаемые LC линии задержки. Последние обеспечивали интервал времени задержки 16 мкс с разрешением 0,2- 04 мкс.

Важнейшей составляющей аппаратного комплекса являлись пьезоэлектрические преобразователи, рабочая частота и полоса частот которых, а также эффективность электроакустического и акустоэлектрического преобразования, во многом определяли эффективность реализации самого шумового статистического метода контроля.

Экспериментально было показано также, что в качестве источника шумовых упругих волн может быть использован струйный генератор, обеспечивающий возбуждение в блоке природного камня стационарного сигнала со спектральной плотностью мощности $\sim 0,2 \text{ Вт}/(\text{Гц} \cdot \text{м}^2)$ в диапазоне частот 60 – 80 кГц [113].

Метод показал свою эффективность при выявлении трещин в блоках природного камня, а также для дефектоскопии ряда уникальных объектов монументального строительства. При этом экспериментально было установлено следующее. Использование шумовых сигналов (по сравнению с импульсными) в сочетании с их статистической обработкой и применением соответствующих информативных параметров контроля позволяет: значительно увеличить базы прозвучивания горных пород при относительно небольших напряжениях возбуждения ПЭП; обеспечить высокую эффективность выявления трещиновидных дефектов; реализовать помехозащищённость УЗ измерений и управление параметрами диаграмм направленности ПЭП [114 - 118].

Следует отметить, что отказ от импульсных зондирующих сигналов в пользу шумовых в принципе не означает отказ от использования скорости C_p распространения ультразвука в качестве информативного параметра контроля. Действительно, при распространении шумового сигнала на известной базе L его взаимная корреляционная функция будет иметь максимум при сдвиге τ , равном времени распространения сигнала на указанной базе, а значит $C_p = L/\tau$ [119]. Правда здесь существует проблема получения достаточно точной «копии» сигнала в точке приёма из-за его частотно-фазовых искажений при распространении

в геосреде. Однако, как показано в [120], эта проблема частично может быть преодолена, например, если в качестве зондирующего сигнала использовать во многом аналогичную шуму псевдослучайную видеопоследовательность.

Попыток использования УЗ шумовых зондирующих сигналов в сочетании с их статистической обработкой (в частности, корреляционной) для изучения строения, структурной неоднородности и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях выработок до настоящего времени не предпринималось.

Выводы и постановка задач исследования

Приведённые выше обзор и анализ литературных источников позволяют сделать следующие выводы.

1. Контроль, прогноз и обеспечение устойчивости горных выработок являются важнейшими задачами геоконтроля и геомеханики, без решения которых не возможно эффективное и безопасное освоение месторождений полезных ископаемых, строительство и эксплуатация подземных сооружений различного назначения.

2. Необходимым условием решения отмеченных в п.1 задач является наличие надёжной информации о горно-геологических условиях в области залегания выработок и, прежде всего, о строении, структурной повреждённости и напряжённо-деформированном состоянии массива непосредственно в их окрестностях.

3. Для получения указанной в п.3 информации относительно широкое распространение получили методы горной геофизики и, в частности, ультразвуковые методы межскважинного прозвучивания и каротажа. Несмотря на известные достоинства этих методов, они во многом не удовлетворяют требованиям практики геоконтроля при оценке структурной поврежденности и НДС приконтур-

ного массива. В основном это обусловлено тем, что их реализация, связана с использованием импульсных УЗ сигналов и их кинематических и динамических параметров в качестве информативных. Первые из этих параметров обладают малой абсолютной информативностью $\Delta\theta$, а вторые – малой относительной информативностью I_θ .

4. Потенциально перспективным направлением совершенствования УЗ скважинных методов контроля состояния массива в окрестностях выработок является использование непрерывных стационарных шумовых сигналов в качестве зондирующих и их корреляционных характеристик в качестве информативных.

Отмеченное, определяет сформулированную выше цель настоящей работы, для достижения которой необходимо решить следующие задачи диссертационного исследования:

1. Теоретическое обоснование принципов, информативных параметров и схем реализации скважинного ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях выработок.

2. Компьютерное и физическое моделирование влияния структурных неоднородностей и НДС геосреды на корреляционные характеристики распространяющегося в ней ультразвукового шумового сигнала.

3. Компьютерное и физическое моделирование влияния контактных условий акустических преобразователей с геосредой на информативные параметры ультразвукового корреляционного метода контроля.

4. Обоснование и разработка аппаратного обеспечения и способов контроля состояния приконтурной области массива горных пород на основе скважинных УЗ корреляционных измерений.

5. Апробация разработанного скважинного ультразвукового корреляционного метода контроля состояния массива в окрестностях горных выработок в натурных условиях.

Глава 2. Теоретические предпосылки ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горной выработки

2.1 Теоретические предпосылки контроля приконтурного массива на основе применения ультразвуковых шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки

Пусть в некоторой точке условно безграничного объёма геосреды действует источник непрерывного стационарного шумового акустического сигнала УЗ диапазона частот. При этом диаграмма направленности этого источника имеет шаровую симметрию. Тогда в каждой точке указанного объёма с координатами x_i, y_i, z_i будет создаваться акустическое поле давления $p(x_i, y_i, z_i, t_i)$, являющееся комплексной амплитудно-фазовой функцией как указанных координат, так и текущего времени t_i .

Представим, что физически реализуема возможность помещения в любую точку геосреды акустических приёмников давления. В этом случае пространственное распределение корреляционных характеристик акустического поля в контролируемом объёме может быть описано корреляционной матрицей вида

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Диагональные элементы матрицы (2.1), соответствующие условию $i = j$, представляет собой автокорреляционные функции (АКФ) сигналов, а элементы, для которых $i \neq j$, являются взаимными корреляционными функциями (ВКФ). Эта матрица может рассматриваться в качестве модели, отражающей параметры структуры (C_1), свойств (C_2) и состояния (C_3) исследуемого объёма геосреды, поскольку $B_{ij} = f(C_1, C_2, C_3)$.

Пусть случайное акустическое поле в исследуемом объёме однородно в узком смысле, то есть стационарно по t и однородно по x, y, z [121]. Тогда элементы матрицы (2.1) будут являться функцией модуля вектора \bar{L} , определяющего пространственное положение точки приёма II_i относительно точки излучения II .

В случае, если исследуемый объём геосреды однороден, но анизотропен, элементы матрицы (2.1) будут определяться не только модулем, но и аргументом вектора \bar{L} .

Реальный массив горных пород (независимо от масштабов его исследуемого участка) всегда неоднороден, причём, в общем случае, по всем трём параметрам C_1, C_2, C_3 . Следовательно, элементы соответствующей ему корреляционной матрицы будут зависеть от координат точек приёма, то есть $B_{ij}=F(x_i, y_i, z_i)$.

Таким образом, измеряя в каждой точке приёма информативные параметры АКФ и ВКФ шумовых УЗ сигналов, можно получить набор матриц информативных параметров, описывающих пространственное распределение параметров C_1, C_2, C_3 .

Распространение УЗ сигналов в неоднородной геосреде всегда сопровождается различными волновыми явлениями, приводящими к изменениям их амплитудных, частотных и фазовых характеристик, а значит и декорреляции. Понятно, что степень декорреляции будет зависеть не от любых неоднородностей, а прежде всего тех, которые характеризуются изменениями акустической жёсткости вдоль «канала» распространения УЗ сигнала [122].

Обобщённая схема реализации УЗ корреляционного метода геоконтроля представлена на рис.2.1 [123].

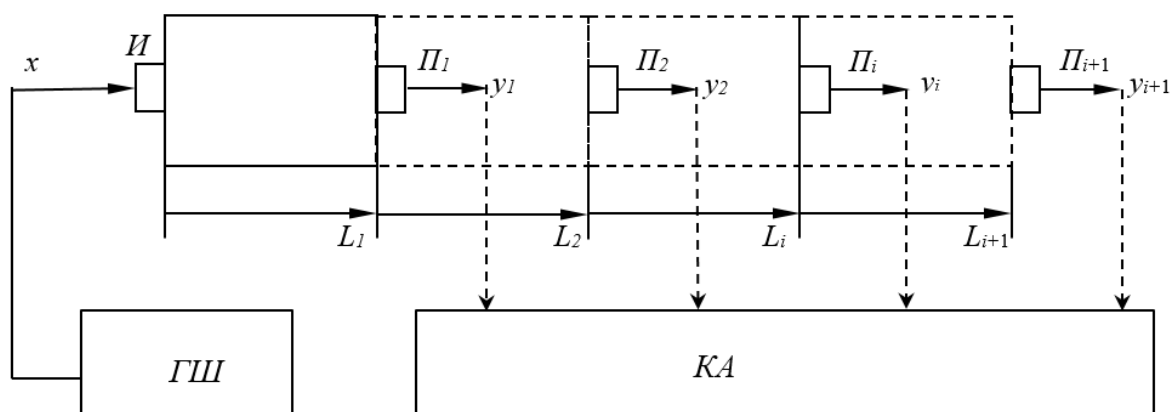


Рисунок 2.1 - Обобщенная схема УЗ корреляционного контроля геосреды

Эта схема предполагает возбуждение излучающего пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) *И* шумовым электрическим сигналом *x* от генератора шума (ГШ). С помощью ПЭП *И* уже акустический сигнал излучается в исследуемую область массива, пройдя которую, принимается каждым из приёмных ПЭП *П_i*, подключённых к корреляционному анализатору (КА). При этом независимо от конкретной схемы контроля участки массива между любыми двумя приемниками *П_i* УЗ сигналов могут рассматриваться как линейные системы, частотные характеристики $H_j(f)$ которых аналогичны характеристикам фильтра нижних частот

$$H_j(f) = \exp [-\alpha_j(f) \cdot L_j], \quad (2.2)$$

где $\alpha_j(f)$ – частотно-зависимое затухание геосреды на базе $L_j = (L_i - L_{i-1})$ контроля между соответствующими приемниками.

Пусть электрический сигнал *x*, возбуждающий излучающий ПЭП, представляет собой белый шум со средним равным нулю. Амплитудный спектр этого сигнала $G_x(f) = A = \text{const}$ при всех частотах *f*. Отметим, что полоса частот реального белого шума всегда конечна. В противном случае пришлось бы считать, что сигнал имеет либо бесконечную мощность, либо нулевую спектральную плотность. УЗ сигнал на выходе излучающего ПЭП с резонансной частотой f_0 имеет ограни-

ченную полосу частот Δf , определяемую его добротностью $Q=f_0/\Delta f$. Откуда следует, что спектральная плотность амплитуд излученного УЗ сигнала при идеальной прямоугольной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ПЭП и его коэффициенте электроакустического преобразования k_1

$$G_x(f) = \begin{cases} k_1 A & \text{при } (f_0 - \Delta f/2) \leq f \leq (f_0 + \Delta f/2) \\ 0 & \text{при } (f_0 - \Delta f/2) > f > (f_0 + \Delta f/2). \end{cases} \quad (2.3)$$

Если коэффициент акустоэлектрического преобразования приемных ПЭП равен k_2 , то с учетом (2.2) и (2.3) спектральная плотность амплитуд принятых сигналов может быть записана в виде

$$G_{y_i}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_j(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_j(f) \cdot L_j], \quad (2.4)$$

$$G_{y_{(i+1)}}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_{j+1}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_{j+1}(f) \cdot L_{j+1}]. \quad (2.5)$$

Используя соотношения (2.4), (2.5) и известные преобразования [119], связывающие корреляционные и спектральные характеристики ограниченных в полосе Δf шумовых сигналов со средним $\mu = 0$, получим [123]

$$\begin{aligned} B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_{(i+1)}(t + \tau) dt = \\ &= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-\alpha_i(f) L_i - \alpha_{(i+1)}(f) L_{(i+1)}] \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} B_{y_i/y_i}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_i(t + \tau) dt = \\ &= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-2\alpha_i(f) L_i] \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau)$ – взаимная корреляционная функция сигналов (ВКФ) y_i и $y_{(i+1)}$, $B_{y_i/y_i}(\tau)$ – автокорреляционная функция (АКФ) сигнала y_i , T – время интегрирования корреляционного анализатора.

Функция (2.6) характеризует общую зависимость значений случайных шумовых сигналов, регистрируемых i -м и $(i+1)$ -м приемными ПЭП, а функция (2.7) – зависимость значений шумового сигнала в некоторый данный момент времени от его значений в некоторый момент в прошлом. В тоже время указанные функции должны характеризовать структурную неоднородность геосреды. Физически это понятно, поскольку любые формы структурной неоднородности и поврежденности последней должны приводить к декорреляции принимаемых сигналов, то есть их преобразованиям, сопровождающимся устранением корреляционной зависимости между отдельными элементами сигналов.

В выражениях (2.6), (2.7) первый из сомножителей представляет собой константу, зависящую только от характеристик аппаратных элементов электроакустического тракта контроля; второй сомножитель отражает частотно-зависимое затухание шумового сигнала на контролируемой базе геосреды, которое в решающей степени определяется ее поврежденностью; третий сомножитель описывает огибающую соответствующей корреляционной функции и при определенных схемах и методиках измерений может характеризовать степень структурной однородности геосреды и ее дефектность; четвертый сомножитель несет информацию о частоте максимума спектральной плотности принятого сигнала, которая определяется крутизной характеристики $H_i(f)$, а значит и структурными особенностями, которым эта характеристика соответствует.

Влияние напряжений в геосреде на корреляционные характеристики проходящего через нее шумового ультразвукового сигнала до настоящего времени не изучалось. В тоже время очевидно, что такое влияние должно иметь место. Это следует из того, что механическое нагружение горной породы в зависимости от стадии деформирования сопровождается структурными изменениями, связанными с процессами либо её уплотнения, либо дезинтеграции. При этом высокая чувствительность параметров АКФ и ВКФ к указанным изменениям представляется не только очевидной, но и подтверждается как более ранними работами

[110, 111], так и экспериментальными исследованиями, которые будут представлены ниже в главе 3 настоящей диссертации.

Для получения выражения АКФ шумового УЗ сигнала, прошедшего базу L_i геоматериала (с модулем объёмной упругости K) в условиях действия одноосного напряжения σ , можно воспользоваться соотношением [82]

$$\alpha_p \cong \alpha_{p0} [1 + \sigma / (3K)]^{-1,5}, \quad (2.8)$$

где α_p и α_{p0} – коэффициенты затухания продольных упругих волн, при наличии и отсутствии действия напряжения σ .

Формула (2.8) справедлива для условий совпадения направлений действия напряжения σ и распространения сигнала продольных упругих волн. При этом предполагается, что деформирование горной породы под влиянием механического нагружения происходит на стадии квазиидеальной нелинейной упругости. Подставляя (2.8) в (2.7), имеем

$$\begin{aligned} B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_{(i+1)}(t + \tau) dt = \\ &= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp\{-2\alpha_i(f) L_i [1 + \sigma / (3K)]^{-1,5}\} \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Таким образом $B_{y_i/y_i}(\tau)$ является функцией напряжений.

2.2 Характеристика зондирующих сигналов, информативных параметров и схем реализации ультразвукового корреляционного метода диагностики структуры и напряжений массива в окрестностях выработки

Из опыта гидроакустических, геоакустических и радиолокационных измерений известно, что их потенциальные возможности по информативности и помехозащищённости, а также максимальным базам контроля, во многом определяются параметрами используемых зондирующих сигналов [98, 99, 110, 124 - 126].

Важнейшим из указанных параметров являются параметры μ и γ . Первый из них представляет собой произведение эффективной ширины спектра ΔF на длительность T_c сигнала

$$\mu = \Delta F \times T_c. \quad (2.10)$$

С увеличением μ возможности контроля на основе УЗ измерений должны возрастать. В тоже время известно, что для простых сигналов $\mu == const \approx 1$, и только для сложных сигналов $\mu \gg 1$ [99]. При этом, для сложных сигналов однозначная связь между ΔF и T_c отсутствует, а величина их ΔF определяется не столько длительностью, сколько исходным спектром и характеристиками модулирующих функций. В нашем случае последние будут зависеть, в частности, от свойств геосреды, в которой распространяется УЗ сигнал.

Второй параметр γ связан с первым соотношением

$$\gamma = \mu \times \Delta F / F_0, \quad (2.11)$$

где F_0 - центральная частота спектра излучаемого сигнала (в нашем случае является резонансной частотой ПЭП).

Второй сомножитель в (2.11) при УЗ измерениях с использованием ПЭП будет определяться их добротностью $Q = F_0 / \Delta F$, то есть отношением резонансной частоты к полосе частот. В настоящее время имеется ряд разработок широкополосных низкодобротных ПЭП [127]. Однако большинство этих разработок не охватывает практически важный для геоконтроля диапазон частот от 60 до 150 кГц. Широкополосность ПЭП в указанном частотном диапазоне обычно достигается механическим демпфированием пьезоэлементов, которое неизбежно сопровождается потерей эффективности как излучения, так и приёма УЗ колебаний. Поэтому в реально используемых для УЗ измерений в геосреде ПЭП величина Q обычно не превышает 10. С учётом сказанного, для того, чтобы выполнялось условие $\mu \gg 1$, необходимо увеличивать величину T в (2.6, 2.7), а значит время интегрирования корреляционного анализатора на приёмном конце соответствующего электроакустического тракта. В частности, при $Q = 10$ и $F_0 = 100$

кГц необходимо, чтобы выполнялось условие $T \geq 1\text{мс}$. Это условие вполне реализуемо, если УЗ сигнал на выходе излучающего ПЭП стационарен, а контактные условия ПЭП с массивом в течение указанного времени остаются неизменными.

Кроме стационарности необходимым требованием к излучаемому сигналу является равенству нулю его среднего значения. Только в этом случае, корреляционные функции тождественно равны ковариационным, а УЗ сигналы y_i и $y_{(i+1)}$ будут некоррелированы, если при всех значениях τ соблюдается условие $B_{y_i/y_{(i+1)}}(\tau) = 0$ [119].

Установленная ранее экспериментально возможность прозвучивания более значительных баз геоматериала УЗ шумовыми сигналами, чем импульсными, качественно может быть объяснена, исходя из следующих представленных ниже идеализированных представлений.

Пусть с периодом следования $T = 0,02\text{с}$ в массив излучается последовательность прямоугольных УЗ импульсов амплитудой $A_u = 500\text{ В}$ и длительностью $\tau = 5\text{ мкс}$ (что соответствует длительности полуволны на частоте $F_0 = 100\text{ кГц}$). В то же время амплитуда непрерывного шумового сигнала $A_{ш} = 50\text{ В}$ (что соответствует реальным используемым на практике значениям). Будем считать, что излучаемая в массив акустическая энергия импульсного и шумового сигналов пропорциональна их площади S_u и $S_{ш}$ на временных диаграммах, то есть произведению амплитуды на длительность. Тогда, за время T значения S_u и $S_{ш}$ составят $25 \times 10^{-4}\text{ В} \cdot \text{с}$ и $1\text{ В} \cdot \text{с}$ соответственно, а отношение $(S_{ш} / S_u) = 400$, что качественно объясняет возможность прозвучивания шумовыми УЗ сигналами значительно больших баз геоматериала по сравнению с импульсными. Кроме того, следует иметь в виду, что возбуждение излучающего ПЭП, как и любой другой инерционной колебательной системы, более эффективно непрерывным, чем импульсным сигналом.

Теперь рассмотрим вопрос о том, какие параметры УЗ корреляционного метода контроля могут выступать в качестве информативных [123]. На рисунке

2.2 приведены характерные качественные графики функций (2.6) и (2.7) для узкополосного случайного шумового УЗ сигнала, прошедшего условно ненарушенную однородную геосреду, а также неоднородную со структурными нарушениями. Эти графики, которые следует рассматривать как ожидаемые, получены с учётом представленных в [110, 119] данных о возможных искажениях АКФ и ВКФ шумового сигнала в среде со структурными нарушениями.

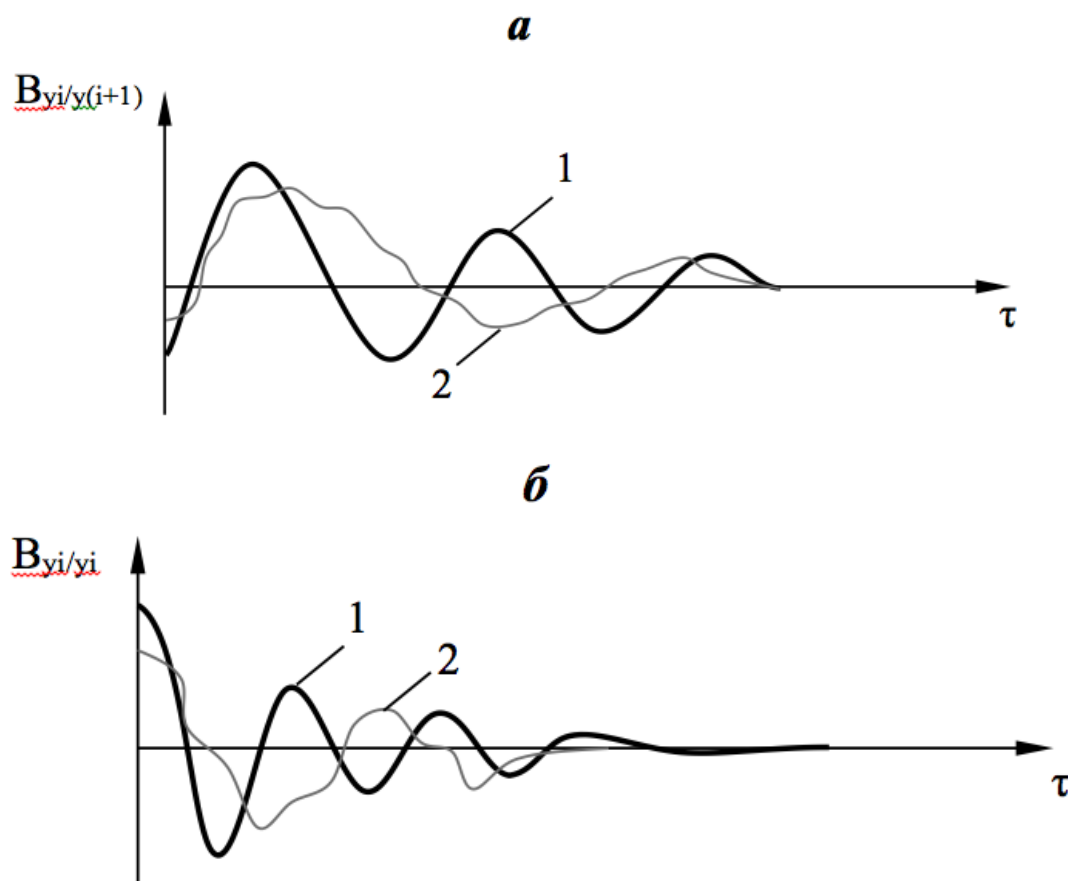


Рисунок 2.2 - Графики ВКФ (а) и АКФ (б) УЗ шумового сигнала для условно структурно однородной (1) и нарушенной (2) геосреды

Анализ этих графиков позволяет обосновать следующие информативные параметры корреляционного УЗ метода контроля. Во-первых, это связанные с затуханием УЗ сигнала значения $B_{yi/y(i+1)}(0)$ и $B_{yi/yi}(0)$. Во-вторых, это величина периода τ_0 функций $B_{yi/y(i+1)}$ и $B_{yi/yi}$, $\tau_0=1/f_0$. В-третьих, смещение $\Delta\tau$ максимума

функции $B_{yi/y(i+1)}(\tau)$, которое соответствует времени задержки шумового УЗ сигнала на базе $L = L_{i+1} - L_i$, и позволяет определить скорость распространения этого сигнала $C = L/\Delta\tau$. В-четвертых, коэффициенты корреляции ρ соответствующих функций. Для взаимной корреляционной функции

$$\rho_{yi/y(i+1)}(\tau) = \frac{B_{yi/y(i+1)}(\tau)}{\sqrt{B_{yi}(0) \cdot B_{y(i+1)}(0)}}, \quad (2.8)$$

для автокорреляционной функции

$$\rho_{yi/yi}(\tau) = \frac{B_{yi/yi}(\tau)}{B_{yi/yi}(0)}. \quad (2.9)$$

С увеличением структурной поврежденности геосреды коэффициенты (2.8) и (2.9) уменьшаются, их максимальное значение $\rho \leq 1$, а минимальное $\rho = 0$.

Пятым информативным параметром УЗ корреляционного метода является интервал корреляции $\tau_{ук}$, который с увеличением поврежденности (неоднородности) исследуемой геосреды будет увеличиваться. Выражения для определения $\tau_{ук}$ ВКФ и АКФ представлены формулами (2.10) и (2.11) соответственно

$$\tau_{ук} = \frac{1}{B_{yi/y(i+1)}(0)} \int_0^{+\infty} B_{yi/y(i+1)}(\tau) d\tau, \quad (2.10)$$

$$\tau_{ук} = \frac{1}{B_{yi/yi}(0)} \int_0^{+\infty} B_{yi/yi}(\tau) d\tau, \quad (2.11)$$

Графическое определение величины $\tau_{ук}$ иллюстрируется рисунком 2.3.

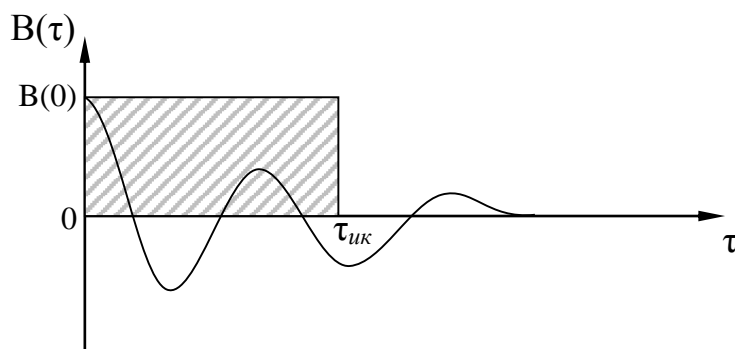


Рисунок 2.3 - Графическое нахождение интервала корреляции $\tau_{ук}$

В соответствие с рисунком 2.3, значение $\tau_{ук}$ находится как сторона прямоугольника, вторая сторона которого равна $B(0)$, а его площадь равна площади под автокорреляционной (взаимной корреляционной) функцией.

Наряду с интервалом корреляции сигнала в качестве информативного параметра контроля может выступать пространственный радиус r корреляции, который в соответствии с [121] является расстоянием, на котором функция $B_{11}(\tau)$ уменьшается примерно вдвое по сравнению с дисперсией σ^2 . С увеличением неоднородности исследуемой геосреды значение r уменьшается [106, 107].

Устойчивость горных выработок определяется прежде всего устойчивостью их кровли и в меньшей степени почвы и боковых пород. Поэтому ниже рассмотрим возможные схемы реализации УЗ корреляционного метода на примере контроля кровли, понимая при этом, что для оценки структурных неоднородностей почвы и боковых пород эти схемы также применимы.

Можно выделить ряд структурных особенностей кровли, оказывающих существенное влияние на ее устойчивость. Основными из этих особенностей являются: границы между основной и непосредственной кровлей, а также расслоения на этой границе; степень однородности пород кровли и наличие в них участков с повышенной трещиноватостью, а также преобладающее направление трещин на этих участках. Все указанные структурные особенности могут быть выявлены с использованием схем ультразвукового межскважинного прозвучивания и каротажа, представленных на рисунке 2.4 [123].

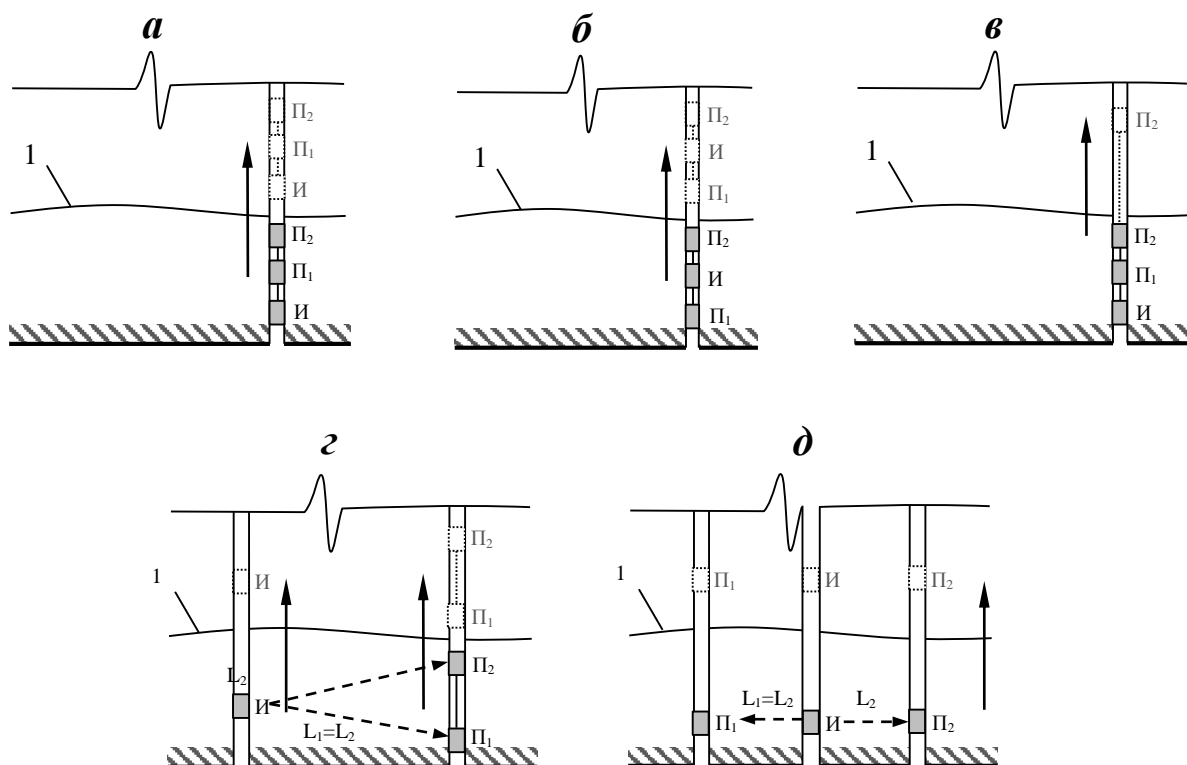


Рисунок 2.4 - Схемы ультразвуковых корреляционных измерений: каротаж с постоянным расстоянием l между приемными ПЭП (а); каротаж с постоянным расстоянием l между излучающим и двумя приемными ПЭП (б); каротаж с изменяющимся расстоянием l между приемными ПЭП (в); межскважинное прозвучивание с симметричным расположением приемных ПЭП относительно излучателя при использовании ВКФ (г) и АКФ (д); 1 – граница между основной и непосредственной кровлей.

Возможность определения границы между основной и непосредственной кровлей и наличия расслоений на этой границе с использованием схем каротажа на рисунках 2.4а, 2.4б, 2.4в и прозвучивания на рисунке 2.4г очевидна. При пересечении преобразователем П₂ указанной границы должны скачкообразно изменяться корреляционные информативные параметры: $V(0) \uparrow$, $\tau_0 \uparrow$, $\Delta\tau \downarrow$, $\tau_{ик} \uparrow$, $\rho \downarrow$. Примерное постоянство этих параметров по мере углубления скважинных зон-

дов (в случае измерений по схемам 2.4а, 2.4б, 2.4г) или их плавное незначительное изменение (при измерениях по схеме 2.4в) свидетельствует об отсутствии каких-либо горизонтальных акустических границ и относительной однородности пород кровли. Выявление трещин, ориентированных вертикально или под некоторым углом к поверхности кровли, целесообразно осуществлять с использованием схем измерений на рисунках 2.4г и 2.4д. Последние позволяют также выявлять структурные неоднородности массива за счет сравнения указанных выше корреляционных информативных параметров контроля на симметрично расположенных приемниках Π_1 и Π_2 . Именно такое симметричное относительно излучателя И расположение приёмников позволяет исключить влияние базы контроля L на измеряемые информативные параметры при реализации взаимных корреляционных измерений. Это определяет принципиальное преимущество схем измерений, представленных на рис 2.4 б, г, д, по сравнению с другими.

Выводы к главе 2:

1. В качестве модели, отражающей пространственное распределение и параметры структуры, свойств и состояния геосреды может рассматриваться корреляционная матрица, состоящая из элементов АКФ и ВКФ шумовых сигналов, принятых в различных точках контролируемого объёма. Такие элементы будут являться: для однородной среды функцией модуля вектора \bar{L} , определяющего координаты x_i, y_i, z_i точек приёма относительно точки излучения; для однородной анизотропной среды - функцией как модуля, так и аргумента вектора \bar{L} ; для неоднородной среды – функцией указанных выше координат.

2. Любые формы разномасштабной неоднородности и повреждённости геосреды приводят к частотным и фазовым искажениям распространяющегося в ней шумового сигнала, а значит и его декорреляции, степень которой может быть оценена по изменениям информативным параметрам АКФ и ВКФ указанного сигнала, регистрируемого в точках контроля.

3. Механическое нагружение горной породы сопровождается структурными изменениями, обусловленными, в зависимости от стадии деформирования, процессами либо её уплотнения, либо дезинтеграции. Указанные изменения влияют на информативные параметры АКФ и ВКФ шумового зондирующего сигнала, что создаёт предпосылки для оценки пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве на основе ультразвуковых корреляционных измерений в нём.

4. УЗ непрерывные шумовые сигналы позволяют контролировать значительные базы геосреды даже при относительно небольшом напряжении возбуждения и ограниченной полосе пропускания ПЭП, т.к. благодаря своей длительности могут быть отнесены к разряду сложных, и обеспечивают закачку в массив существенно большей акустической энергии, чем импульсные.

5. В качестве основных информативных параметров скважинного УЗ корреляционного метода контроля при оценке структурной неоднородности и НДС массива могут выступать дисперсии, периоды, интервалы и коэффициенты корреляции принимаемых шумовых сигналов, определяемые по их АКФ или ВКФ, и зависящие от декоррелирующих свойств геосреды, а значит и степени её акустической неоднородности.

6. Одним из важнейших факторов, определяющих потенциальные возможности УЗ корреляционного метода контроля приконтурного массива, является многообразие возможных схем его реализации в массиве. Наиболее эффективными из последних являются схемы прозвучивания и каротажа с симметричным расположением двух приёмников относительно излучателя, позволяющие исключить влияние базы на измеряемые информативные параметры при реализации взаимных корреляционных измерений в массиве.

Глава 3. Компьютерное и физическое моделирование влияния структурных неоднородностей и напряжённо-деформированного состояния горных пород на корреляционные характеристики распространяющегося в них ультразвукового шумового сигнала

3.1. Компьютерное и физическое моделирование влияния структурных неоднородностей горных пород на корреляционные характеристики распространяющегося в них ультразвукового шумового сигнала

Компьютерный эксперимент, основанный на использовании метода конечных элементов, достаточно широко используется для оценки устойчивости пород в окрестностях горных выработок [128, 129]. В настоящей работе он используется для моделирования влияния строения и нарушенности приконтурного массива на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала.

Моделирование, особенности реализации и результаты которого подробно представлены в [130], осуществлялось применительно к схеме каротажа, представленной на рис. 2.4б. Она предполагало дискретное с шагом Δl перемещение вглубь массива акустического зонда, в котором приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) $П_1$ и $П_2$ размещены симметрично относительно излучающего ПЭП $И$. Последний является источником шумового стационарного акустического сигнала с нулевым средним значением. Считается, что все ПЭП имеют одинаковые резонансные частоты f_0 и полосы частот $\Delta f \approx 0.1f_0$.

С учетом особенностей указанной схемы среди всего многообразия информативных параметров корреляционного метода контроля [123] выбраны коэффициент взаимной корреляции $\rho_{y1/y2}$ сигналов y_1 и y_2 на выходе приемных ПЭП $П_1$ и $П_2$ соответственно, который определяется формулой (2.8), а также отношение интервалов автокорреляционных функций этих сигналов $\tau_{ик/y1}$ и $\tau_{ик/y2}$:

$$\frac{\tau_{y2}}{\tau_{y1}} = \frac{B_{y1}(0) \int_0^{+\infty} B_{y2}(\tau) d\tau}{B_{y2}(0) \int_0^{+\infty} B_{y1}(\tau) d\tau}, \quad (3.1)$$

где B_{y1}, B_{y2} - автокорреляционные функции сигналов y_1 и y_2 .

В численных экспериментах исследовалось влияние на указанные информативные параметры единичной трещины, а также ортогональные по отношению к контрольной скважине границы различных типов пород, пересекающих контрольную скважину.

Суть первого из компьютерных экспериментов сводилась к следующему. В осесимметричном пространстве задавалась модель массива в виде цилиндра, радиус и высота которого были много больше исследуемого при каротаже участка кровли, представленной гипсом.

Граница кровли совпадала с нижней границей цилиндра, в центре которого (со стороны выработки) моделировалась вертикальная скважина диаметром 80 мм и высотой 8 м. На высоте 1.5 м от границы кровли задавалась симметричная относительно оси скважины и ортогональная ей трещина в виде прямоугольника со стороной 0.5 м. Раскрытие трещины составляло 0.1 мм. Она была заполнена породой, которая имела пониженные относительно вмещающей геологической среды значения модуля упругости и плотности. Наличие виртуального излучающего ПЭП *И* каротажного зонда отражалось в модели путем задания на грани конечного элемента граничных условий в виде горизонтальных перемещений, соответствующих реальному УЗ сигналу, возбуждаемому шумовым генератором. Общий вид модели представлен на рисунке 3.1.

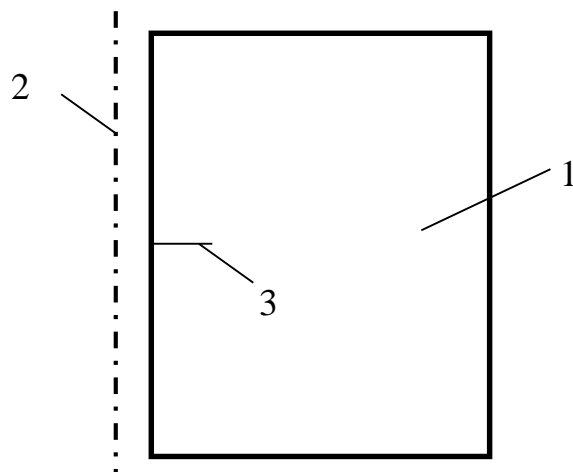


Рисунок 3.1 – Модель осесимметричного пространства породного массива, нарушенного горизонтальной трещиной (1 - модель геосреды, 2 – ось симметрии, 3 – трещина)

Волновая форма шумового сигнала и его спектр представлены на рисунке 3.2.

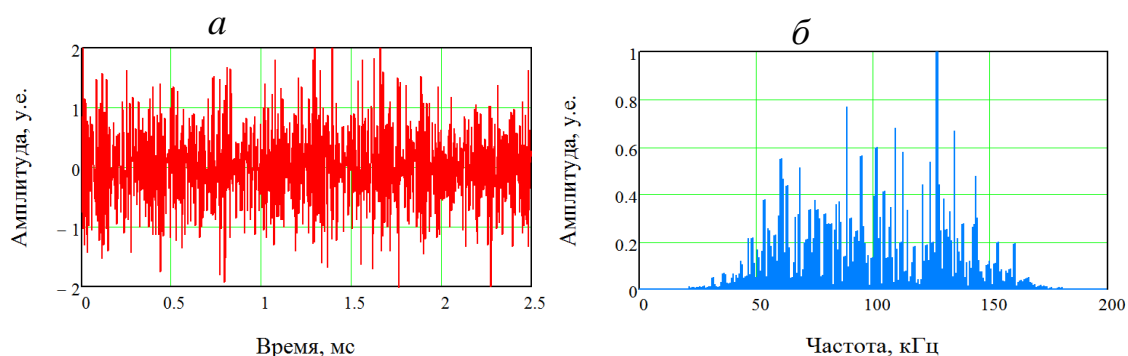


Рисунок 3.2 – Волновая форма (а) и спектр (б) синтезированного шумового акустического сигнала

Наличие виртуальных приемных ПЭП $П_1$ и $П_2$ отражалось в модели путем регистрации горизонтальных смещений в точках, отстоящих вверх и вниз на 25 см от точки размещения излучателя.

Виртуальный скважинный зонд перемещался вверх по стенке скважины с шагом 25 см на глубину до 2.5 м (точкой отсчета считался центр зонда). В точке *И* в массив излучался шумовой акустический сигнал длительностью 10 мс. Эта

длительность существенно меньше времени прохождения сигнала до вертикальных и верхней горизонтальной границ модели, что исключает влияние последних на результаты моделирования. Принятые в точках $П_1$ и $П_2$ сигналы подвергались корреляционной обработке, целью которой было нахождение величин $\rho_{y1/y2}$ и τ_{y2}/τ_{y1} .

В дополнение к указанным параметрам определялась скорость распространения продольной волны C_p , измеряемая с учетом расстояния между излучающим и приемными преобразователями и времени первого вступления акустического сигнала.

На рисунке 3.3 приведен чертеж модели, разбитый на сетку конечных элементов, а на рисунке 3.4 приведен результат расчета в виде визуализации распространения продольной волны в геосреде.

На рисунке 3.5 представлены примеры волновых форм сигналов зарегистрированных в точках $П_1$ и $П_2$ для положения зонда на однородном массиве и в зоне трещиноватости.

Анализ представленных данных показывает, что при приближении “зонда” к трещине коэффициент корреляции $\rho_{y1/y2}$ начинает падать. Он достигает минимума в случае, когда трещина находится между излучателем и одним из приемных преобразователей.

В точке, где излучатель находится ровно над трещиной, наблюдается локальное увеличение коэффициента $\rho_{y1/y2}$, что, очевидно, связано с симметричностью расположения приемных преобразователей относительно излучающего.

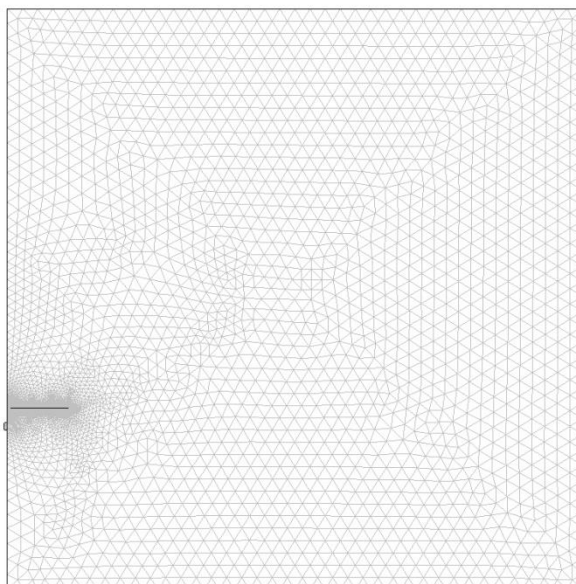


Рисунок 3.3 – Компьютерная модель, разбитая на сетку конечных элементов

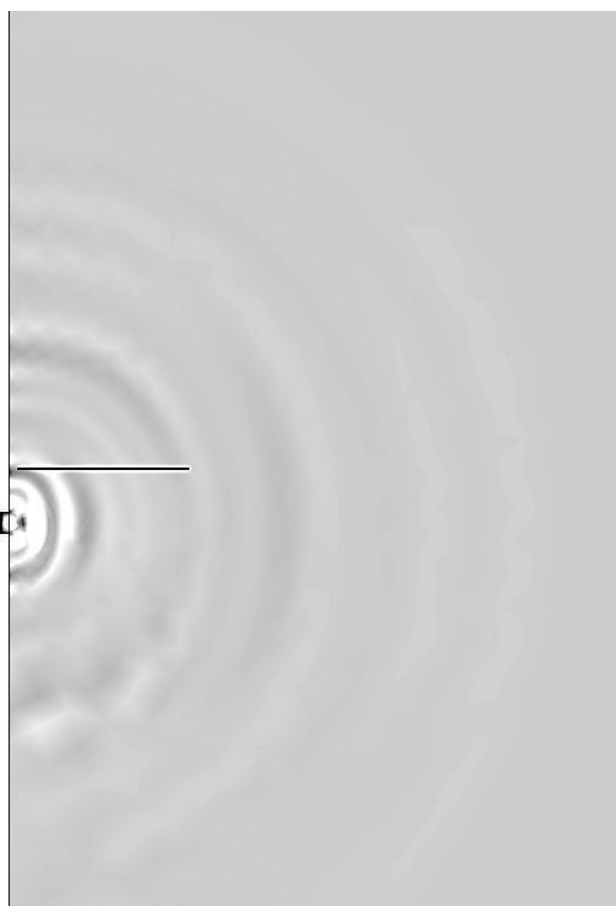


Рисунок 3.4 – Распространение упругого импульса в геосреде (результат расчета)

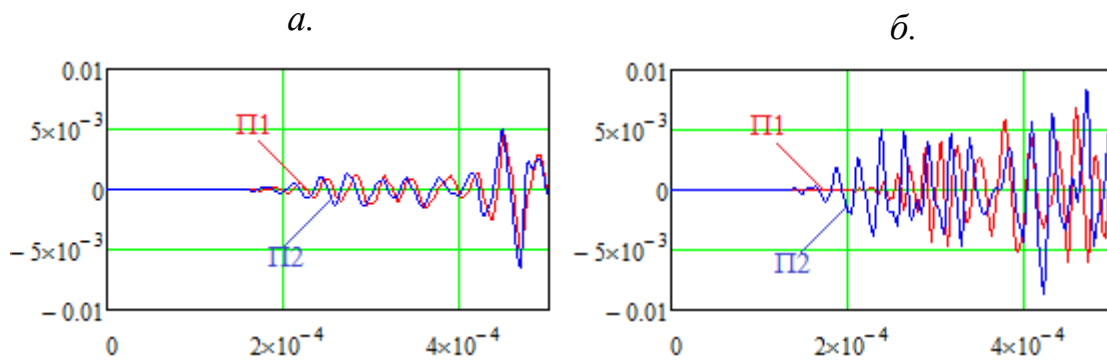


Рисунок 3.5 – Волновые формы сигналов в однородной зоне (а) и в зоне нахождения трещины (б)

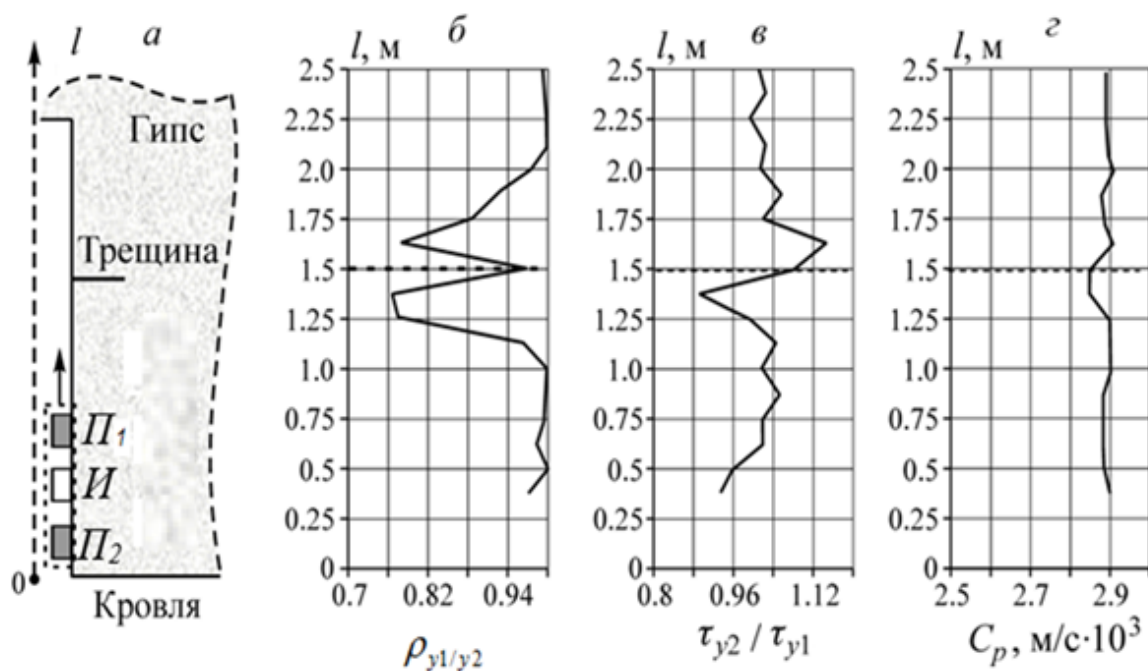


Рисунок 3.6 – Схема ультразвукового корреляционного каротажа, используемая при моделировании (а), и зависимости изменения параметров $\rho_{y1/y2}$ (б), τ_{y2}/τ_{y1} (в) и скорости продольной волны C_p (г) с глубиной (пунктиром отмечено место расположения трещины)

С точки зрения соотношения τ_{y2}/τ_{y1} полученный график следует интерпретировать следующим образом. В том случае, когда трещина находится между точками расположения преобразователя П₁ и излучающего преобразователя И,

наблюдается резкое увеличение интервала корреляции τ_{y1} на преобразователе $П_1$, что приводит к уменьшению отношения τ_{y2}/τ_{y1} . Напротив, в случае, когда трещина находится между $И$ и $П_2$, увеличение τ_{y2} приводит к росту величины τ_{y2}/τ_{y1} . В то же время относительное изменение величины C_p в зоне трещины составляет всего $\sim 2\%$, что соизмеримо с погрешностью большей части современной ультразвуковой аппаратуры геоконтроля.

Отдельно следует отметить наличие зоны аномальных значений величин $\rho_{y1/y2}$ и τ_{y2}/τ_{y1} вблизи от нижней горизонтальной границы модели. Такого рода отклонения связаны с отражением шумового сигнала от этой границы и его интерференционными искажениями, что и приводит к частичной декорреляции указанного сигнала на участке массива, не содержащем трещины.

Второй компьютерный эксперимент проводился с целью установления влияния на корреляционные параметры шумового сигнала границы между двумя слоями пород в кровле - гипсом и доломитом.

Геометрические параметры модели, а также параметры виртуального “зонда” и шумового сигнала задавались такими же, как и в первом случае. Граница между породами пролежала на глубине 1.5 м.

Схема компьютерной модели двуслойной среды и разбиение ее на конечные элементы представлены на рисунке 3.7.

Результаты расчетов соответствующих информативных параметров представлены на рисунке 3.8.

Анализ приведенных на рисунке 3.8 зависимостей показывает, что аналогично трещине граница между породами с различной акустической жесткостью вызывает декорреляцию шумового сигнала. При этом стоит отметить, что указанная граница частично отражает акустический сигнал, вызывая его интерференционную декорреляцию, когда зонд находится от границы еще относительно далеко.

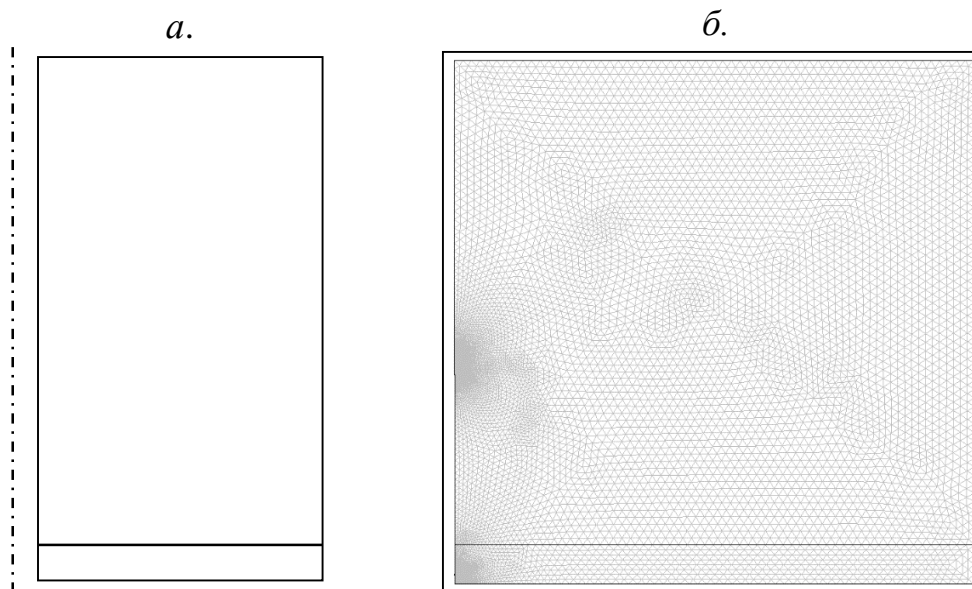


Рисунок 3.7 – Схема компьютерной модели (а) и разбиение её на конечные элементы (б)

Использованные при моделировании механические характеристики пород кровли и заполнителя трещины приведены в таблице 3.1, где E - модуль Юнга, μ - коэффициент Пуассона, ρ - плотность.

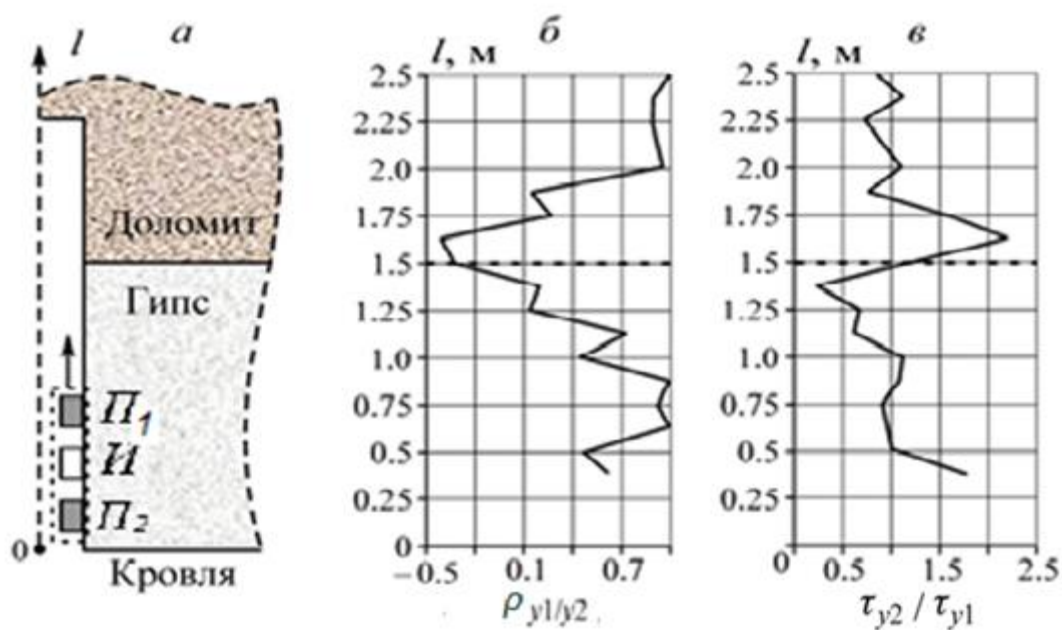


Рисунок 3.8 – Схема ультразвукового корреляционного каротажа, используемая при моделировании (*а*), и результаты расчетов для коэффициента корреляции $\rho_{y1/y2}$ (*б*) и отношения τ_{y2}/τ_{y1} (*в*) (пунктиром отмечена граница между слоями)

Таблица 3.1 – Механические характеристики пород модели

Порода	E , ГПа	μ	ρ , кг/м ³
Гипс	14	0.30	2300
Нарушенный гипс (заполнитель трещины)	6	0.30	1200
Доломит	30	0.27	2850

С целью подтверждения закономерностей, полученных при компьютерном моделировании массива с трещиной, проведены две серии лабораторных физических экспериментов. Обе серии выполнены на плите мрамора размерами 350×320×50 мм с единичной сомкнутой трещиной, выходящей на поверхность длинной грани плиты на расстоянии 250 мм от ее ребра.

Суть первого эксперимента сводилась к следующему. Образец подвергался имитирующему каротаж поверхностному профилированию с использованием низкочастотного дефектоскопа УД2М-П.

Профилирование велось по длинной стороне с постоянной базой 50 мм между излучающим *И* и приемным *П* преобразователями, которые имели резонансную частоту $f_0 = 150$ кГц и полосу пропускания $\Delta f = 15$ кГц. Основным информативным параметром контроля выступала скорость распространения продольной волны C_p , получаемая с учетом измеренного дефектоскопом времени первого вступления импульсного ультразвукового сигнала. Схема проведения эксперимента и результаты профилирования представлены на рисунке 3.9.

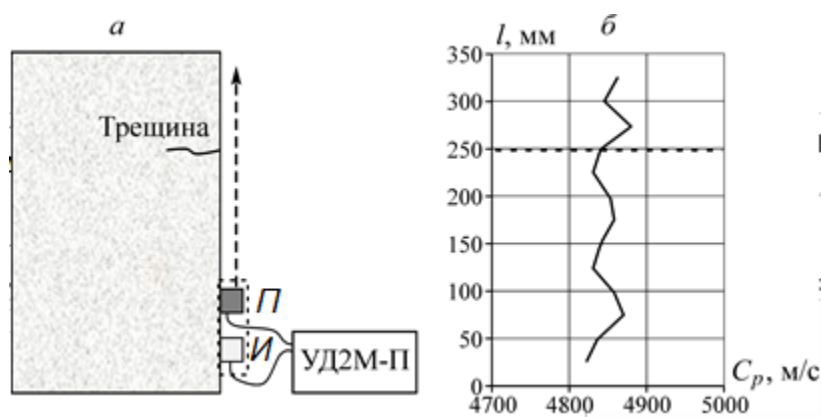


Рисунок 3.9 – Схема проведения лабораторного эксперимента (а) и результаты УЗ профилирования (б) (пунктиром показано место расположения трещины)

В отличие от результатов компьютерного моделирования, на реальном объекте различия в скоростях продольных волн в областях, не содержащих и содержащих трещину, практически отсутствуют. Очевидно, что естественная неоднородность горной породы вызывает значительный разброс значений C_p , снижение которых в области трещины оказывается сравнительно незначительным.

Второй эксперимент проводился на том же блоке мрамора, но уже по схеме шумового корреляционного каротажа с использованием одного излучающего и двух расположенных на равных расстояниях от него приемных преобразователей.

Излучающий ПЭП подключался к генератору шума ГШ-1, обеспечивающему генерацию шумового ультразвукового сигнала со средним, равным нулю. Амплитуда этого сигнала составляла 20 В, а его частотный диапазон от 10 до 500 кГц. Приемные ПЭП $П_1$ и $П_2$ подключались к двухканальному АЦП с частотой дискретизации 10 МГц, подключенному к персональному компьютеру.

Основными информативными параметрами, как и в случае компьютерного моделирования, выступили коэффициент взаимной корреляции $\rho_{y1/y2}$ сигналов на выходе приемных ПЭП $П_1$ и $П_2$, а также отношение интервалов корреляции их автокорреляционных функций, τ_{y2} и τ_{y1} . Расчет указанных информативных

параметров производился программным путем. Прозвучивание осуществлялось с постоянной базой в 50 мм между излучающим и приемными преобразователями с шагом 25 мм вдоль профиля. Результаты лабораторных исследований представлены на рисунке 3.10. Их анализ показывает, что в отличие от времени импульсного ультразвукового метода, проведенные корреляционные исследования позволяют достаточно отчетливо выявлять местоположение сомкнутой трещины в модели массива. Результаты лабораторного эксперимента качественно совпадают с результатами компьютерного исследования (см. рис. 3.6), а точность определения координаты трещины зависит от шага профилирования.

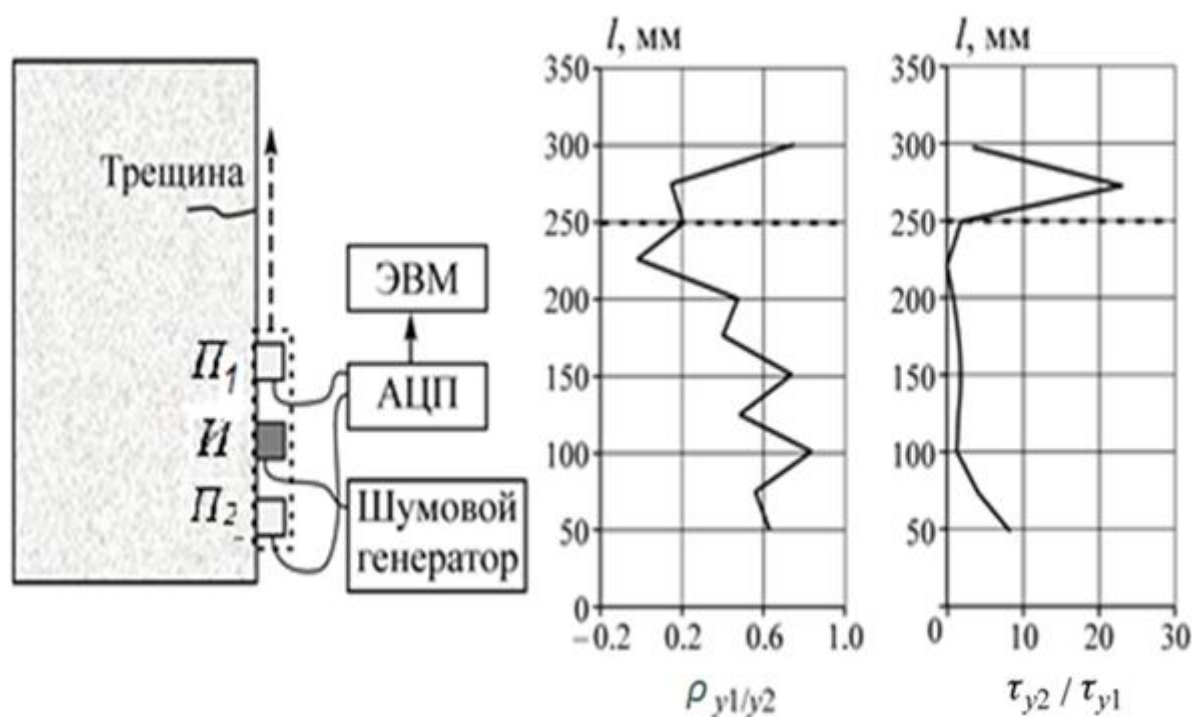


Рисунок 3.10 – Схема проведения шумового корреляционного контроля (а) и зарегистрированные изменения параметров $\rho_{y1/y2}$ (б) и τ_{y2}/τ_{y1} (в) вдоль исследуемого профиля (пунктиром показано место расположения трещины)

Для подтверждения закономерностей, полученных при компьютерном моделировании двухслойного массива, выполнен лабораторный эксперимент. Об-

разец длиной 800 мм представлял собой склеенные пластины мрамора и плексигласа длиной 400 мм, шириной 400 мм и толщиной 50 мм. Профилирование образца с использованием шумового акустического сигнала велось по схеме, аналогичной схеме профилирования образца с единичной трещиной.

Схема проведения измерений, а также зависимости $\rho_{y1/y2}$ и τ_{y2}/τ_{y1} в функции от l показаны на рисунке 3.11.

Установленные в рамках лабораторного эксперимента закономерности полностью соответствуют таковым, полученным по результатам компьютерного моделирования, как относительно снижения коэффициента $\rho_{y1/y2}$ на границе слоев, так и резкого уменьшения и последующего возрастания значения τ_{y2}/τ_{y1} на этой границе [129, 130].

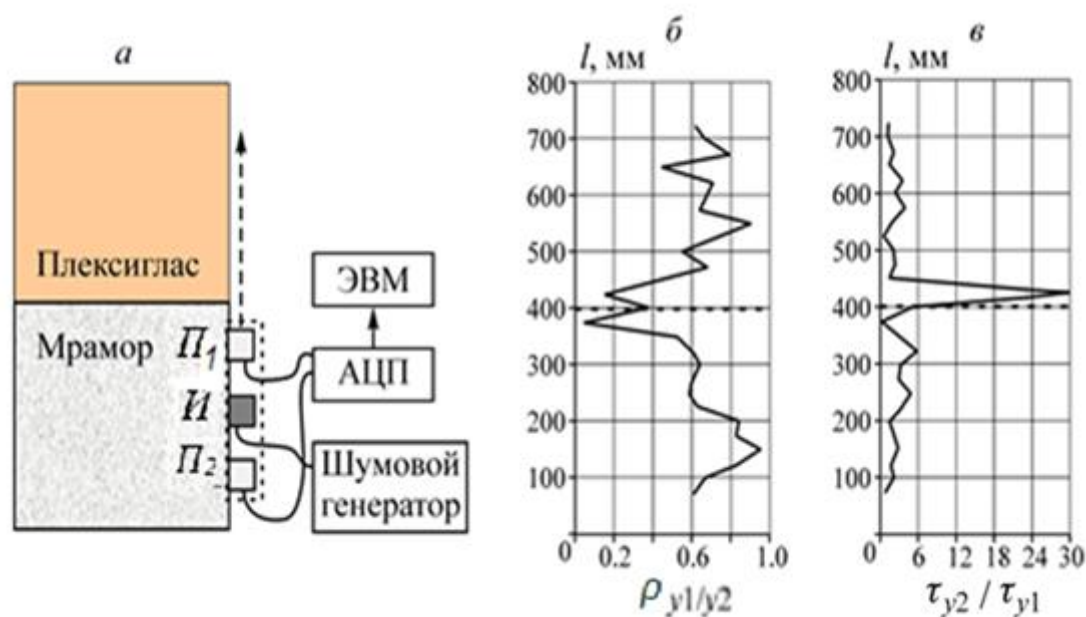


Рисунок 3.11 – Схема проведения шумового корреляционного контроля двухслойной среды (а) и зарегистрированные изменения параметров $\rho_{y1/y2}$ (б) и τ_{y2}/τ_{y1} (в) вдоль исследуемого профиля (пунктиром показано место границы слоев)

Установленные в рамках лабораторного эксперимента закономерности полностью соответствуют таковым, полученным по результатам компьютерного моделирования, как относительно снижения коэффициента взаимной корреляции $\rho_{y1/y2}$ на границе слоев, так и резкого уменьшения и последующего возрастания значения отношения τ_{y2}/τ_{y1} на этой границе [129, 130].

Результаты проведенного компьютерного и физического моделирования свидетельствуют о том, что потенциальные возможности ультразвуковых методов исследования структурных неоднородностей массива в окрестностях горных выработок далеко не исчерпаны. Для практической реализации таких возможностей необходим отход от традиционных, доминирующих сегодня подходов, при которых в качестве зондирующих используются импульсные УЗ сигналы, а в качестве информативных параметров - скорость их распространения в исследуемой геосреде.

В качестве более перспективных следует рассматривать подходы, предполагающие применение при каротажных ультразвуковых измерениях непрерывных стационарных шумовых сигналов и их корреляционной обработки, что позволит повысить не только чувствительность структурной диагностики пород кровли горных выработок, но и надежность и помехозащищенность такой диагностики.

3.2 Оценка чувствительности метода ультразвукового корреляционного каротажа при выявлении трещиновидных дефектов в при-скважинной области массива

Как показано в пункте 3.1, ультразвуковой корреляционный метод обладает чрезвычайно высокой чувствительностью даже к сомкнутым трещинам при условии, если они ортогональны оси скважины, непосредственно пересекают ее и имеют условно неограниченную протяженность. Ниже рассматривается вопрос о чувствительности метода по отношению к трещинам в зависимости от их протяженности, угла наклона к оси скважины и расстояния от ее контура. Задача

оценки чувствительности метода решается с помощью компьютерного и физического моделирования, результаты которых подробно отражены в [131].

Компьютерное моделирование корреляционного метода ультразвукового каротажа выполнялось в среде Comsol Multiphysics. В осесимметричном пространстве задавался участок массива в виде цилиндра высотой $h = 20$ м и радиусом $r = 20$ м, что значительно превышает область влияния акустического каротажа. В качестве породы, слагающей массив, был выбран гипс, скорость распространения продольных упругих волн C_p в котором, а также модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность соответственно равны: $C_p = 4500$ м/с, $E = 15.3$ ГПа, $\mu = 0.3$, $\rho = 2300$ кг/м³. Нижняя грань цилиндра оставалась свободной и имитировала кровлю горной выработки. Вдоль оси цилиндра моделировалась измерительная скважина диаметром $D = 80$ мм и глубиной $l = 8$ м.

В измерительной скважине размещалась модель каротажного зонда, состоящая из излучающего ПЭП I , а также двух симметрично расположенных по разные стороны от него приемных ПЭП $П_1$ и $П_2$. Устройство и принцип действия подобного зонда подробно описано ниже в главе 4. При компьютерном моделировании функции излучающего и приемных ПЭП задавались горизонтальными смещениями свободных граней выбранных конечных элементов. Зарегистрированные на приемных ПЭП сигналы y_1 и y_2 подвергались корреляционной обработке, целью которой было нахождение их коэффициента корреляции $\rho_{y1/y2}$. Компьютерная модель решалась для 40000 конечных элементов на основе применения несимметричного мультифронтального метода UMFPACK.

Наряду с компьютерным моделированием проводилось физическое моделирование на специально изготовленных образцах из гипса, представляющих собой параллелепипеды со сторонами 300 мм, 500 мм и 70 мм, длинная грань которых моделировала поверхность скважины, по которой перемещались излучающий и приемные ПЭП. Трещины в образцах создавались с помощью размещения

пластин из полипропилена толщиной 0,5мм внутри заготовки на этапе застывания гипса и последующего их извлечения после завершения процесса отверждения.

В рамках первой серии экспериментов в модели массива создавались последовательно четыре трещины под углами к оси скважины, равными 90° , 60° , 45° и 30° . Каротажный «зонд» перемещался вверх по скважине с постоянным шагом Δl . Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунке 3.12 б, а физического - на рисунке 3.12 в.

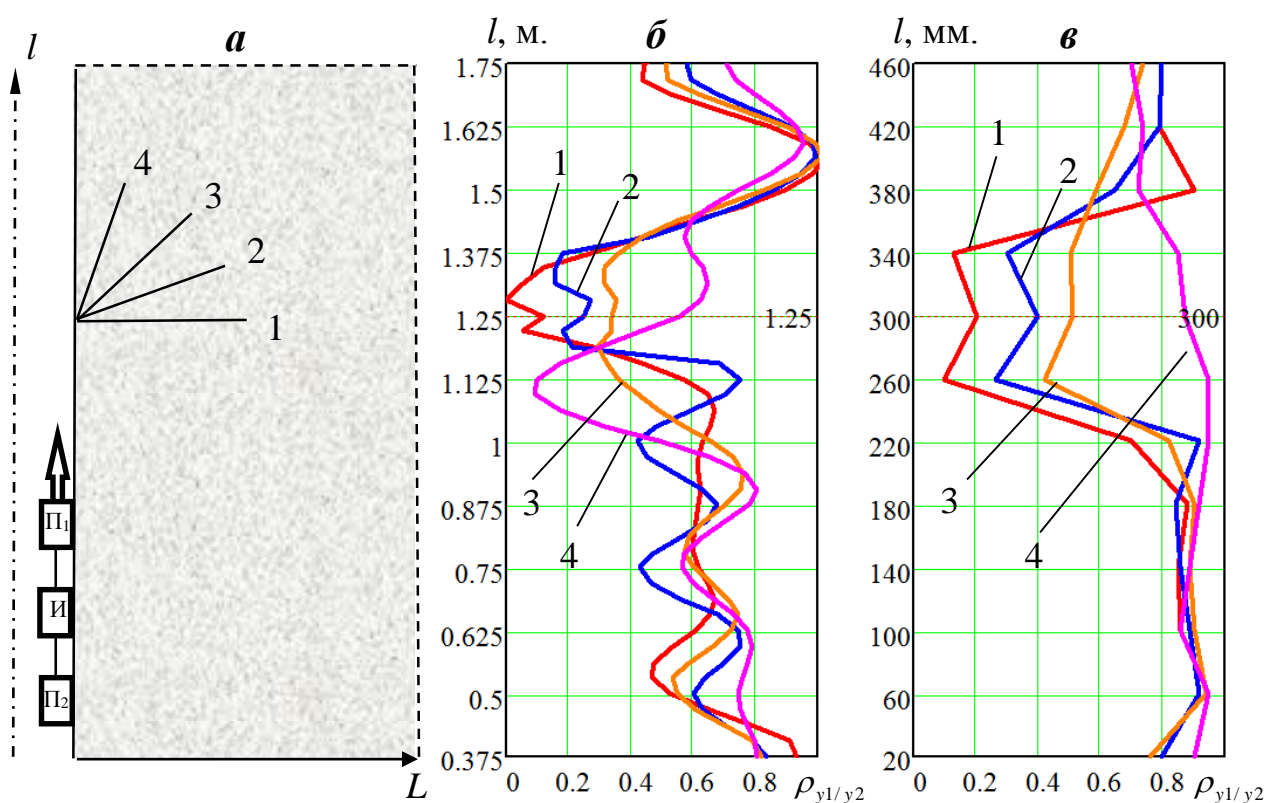


Рисунок 3.12 – Схема проведения УЗ измерений (а) и их результаты при компьютерном (б) и физическом (в) моделировании

Как следует из рисунка 3.12 наиболее отчетливо на графиках зависимости $\rho_{y1/y2}(l)$ видно расположение горизонтальной трещины, для которой характерно наиболее резкое снижение коэффициента корреляции $\rho_{y1/y2}$. Для трещин, расположенных под углами 60° и 45° подобное снижение менее отчетливо, а местоположение трещины под углом 30° по представленным зависимостям определить

невозможно. Таким образом, рассматриваемый метод каротажа можно считать эффективным для поиска ортогональных и наклонных трещин и непригодным для выявления трещин, находящихся под острым углом к оси измерительной скважины.

Во второй серии компьютерных и физических экспериментов решалась задача определения чувствительности метода к удалению трещины от контура скважины на расстояние L . Результаты получены с использованием процедур компьютерного моделирования, использованных для решения предыдущей задачи, а также на аналогичных гипсовых образцах. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.13.

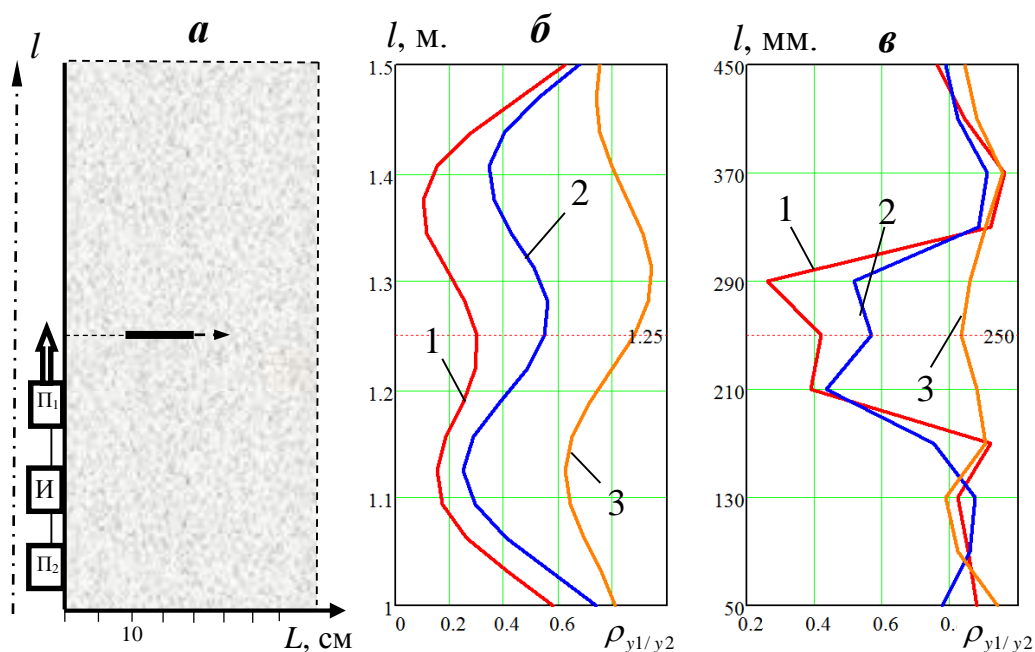


Рисунок 3.13 – Схема измерений (а) и результаты компьютерного (б) и физического (в) моделирования для трещин, ортогональных контуру скважины и находящихся от нее на расстоянии $L = 0$ см (1), $L = 5$ см (2) и $L = 10$ см (3) соответственно

Из результатов, приведенных на рисунке 3.13 видно, что при длине волны $\lambda = C_p / f_{рез} \approx 4,5$ см (для данного комплекта ПЭП) возможно выявление трещин,

расстояние которых от контура скважины удовлетворяет условию $L \leq 2\lambda$. Снижение резонансной частоты преобразователей, очевидно, приведет к увеличению глубины каротажа.

Последняя серия экспериментов производилась с целью выявления минимальной длины трещины, при которой еще возможно ее выявление рассматриваемым методом. С этой целью в компьютерной и физической моделях последовательно создавались трещины протяженностью 1 см, 0.5 см, и 0.1 см, выходящие на поверхность «скважины» и ортогональные ее оси. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.14.

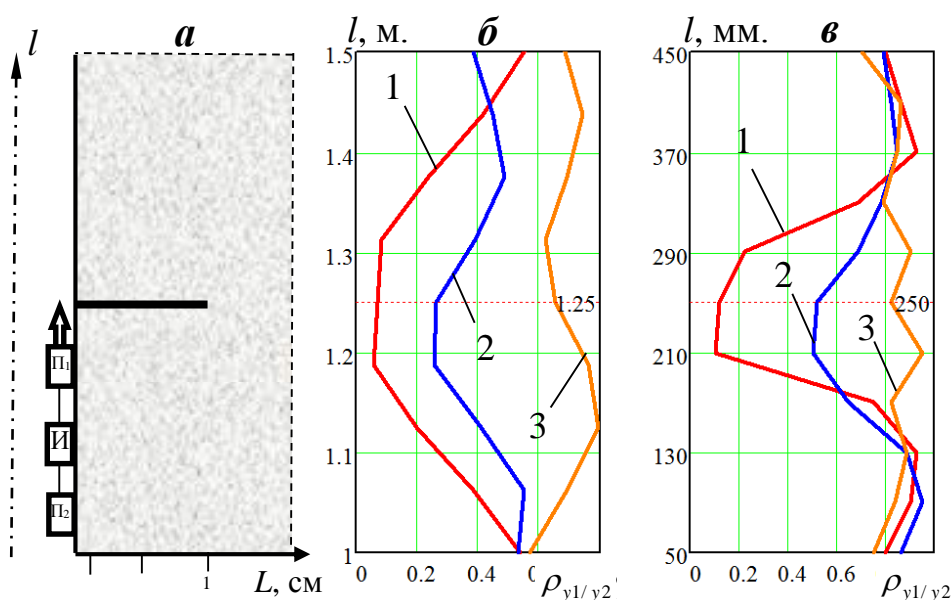


Рисунок 3.14 – Схема модели (а) и результаты компьютерного (б) и физического (в) моделирования для трещины протяженностью 1 см (1), 0,5 см (2) и 0,1 см (3)

Зависимости, представленные на рисунке 3.14, подтверждают возможность выявления трещин, протяженностью $\approx (1/4) \lambda$. Возможность выявления трещин меньшей протяженности в реальных условиях маловероятна из-за значительной помеховой составляющей, связанной с непостоянством контактных условий «преобразователь-массив». Следует также отметить, что использование

понятия «длина волны» для шумового сигнала весьма условно и в настоящей работе применяется исключительно для обозначения длин волн, определяемых резонансной частотой ПЭП и преимущественно присутствующих в волновом пакете в силу конструкции излучающего преобразователя.

Представленные результаты компьютерного и физического моделирования свидетельствуют о том, что ультразвуковой каротаж с использованием шумовых зондирующих сигналов и их последующей корреляционной обработки является эффективным инструментом выявления трещин в кровле горных выработок. В то же время соответствующий метод геоконтроля имеет свои ограничения, связанные с зависимостью его чувствительности от ориентации трещин, их протяжённости и степени удаления от контура контрольной скважины. Указанные ограничения могут быть минимизированы за счет оптимизации рабочих частот ультразвукового каротажа и сочетания последнего с межскважинным прозвучиванием.

3.3 Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании образцов горных пород в условиях их одноосного механического нагружения

Как было показано выше на основе компьютерного и физического моделирования, корреляционные характеристики УЗ шумового сигнала чувствительны даже к незначительным структурным изменениям геосреды. Это создаёт предпосылки использования УЗ корреляционного метода для оценки напряжений в приконтурном массиве, т.к. механическое нагружение горной породы в зависимости от стадии деформирования всегда сопровождается структурными изменениями, связанными с процессами либо уплотнения, либо дезинтеграции. Наличие взаимосвязи между корреляционными характеристиками шумового сигнала и напряжениями, действующими в геосреде, где этот сигнал распространяется, следует также из приведённого выше соотношения (2.9).

Ниже приведены результаты экспериментального изучения динамики корреляционных характеристик шумового УЗ сигнала при его распространении в образцах горных пород в условиях изменяющихся напряжений. Подробно эти результаты отражены в [132].

Для проведения лабораторных исследований была использована выборка из 11 образцов каменной соли Верхнекамского месторождения высотой 70 мм и диаметром 35 мм. Все образцы, имеющие однородную мелкозернистую структуру, прошли предварительное цензурирование на близость упругих и прочностных свойств с использованием импульсного УЗ прозвучивания на частоте 1 МГц. При этом относительное отклонение скорости распространения продольных упругих волн в каждом из образцов от среднего значения по выборке $C_p = 4800$ м/с не превышало 2%.

Пять образцов из выборки были использованы для определения среднего значения предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, которое составило 27,1 МПа, а также границ стадий деформирования. Оценка последних осуществлялась с использованием метода термостимулированной акустической эмиссии [133]. Указанные границы составили: $(0 \div 0,18)\sigma_{сж}$ – для начальной стадии (I); $(0,18 \div 0,46)\sigma_{сж}$ – для линейно-упругой стадии (II); $(0,46 \div 0,76)\sigma_{сж}$ – для упруго-пластической стадии (III); $(0,76 \div 1,00)\sigma_{сж}$ – для пластической предельной стадии (IV).

Оставшиеся образцы, разделенные на 2 равные группы, подвергались одноосному механическому нагружению и прозвучиванию шумовым УЗ сигналом с рабочей частотой $f_p = 400$ кГц и полосой частот $\Delta f = 50$ кГц. При этом, как это показано на рисунке 3.15а, образцы первой группы прозвучивались в направлении, совпадающем с направлением механического нагружения, а УЗ сигнал с выхода приемного ПЭП подвергался оцифровке, а затем автокорреляционной обработке (АКО).

Образцы второй группы прозвучивались в направлении перпендикулярном направлению механического нагружения. Причем, как это показано на рисунке 3.16 б, излучающий акустический ПЭП размещался в центре образца (по

его высоте), а два приемных ПЭП размещались на диаметрально противоположной его стороне симметрично относительно оси излучения на расстоянии 2 см друг от друга. Сигналы с выхода приемных ПЭП после оцифровки с помощью АЦП подвергались взаимной корреляционной обработке (ВКО). Алгоритмы АКО и ВКО шумовых сигналов отражают приведённые во второй главе выражения (2.6) и (2.7).

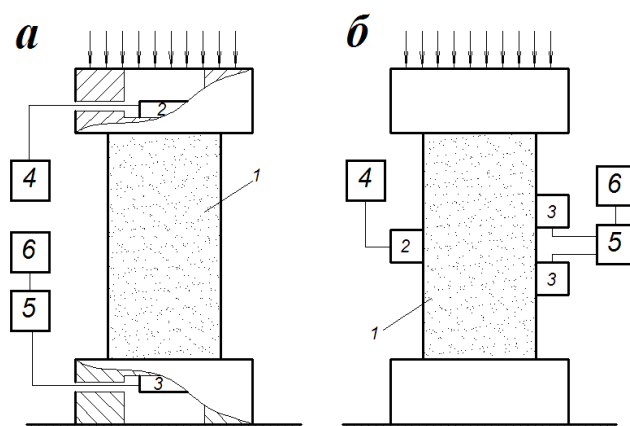


Рисунок 3.15 – Схема испытаний образцов при использовании АКО (а) и ВКО (б): 1 – образец; 2 – излучающий ПЭП; 3 – приемный ПЭП; 4 – генератор шума; 5 – АЦП; 6 – персональный компьютер

УЗ измерения проводились с помощью аппаратного и программного обеспечения, которое подробно будет описано в главе 4, при уровнях напряжений $\bar{\sigma}_i$, соответствующих средним значениям каждой из четырех стадий деформирования: $\bar{\sigma}_i=0,09\sigma_{сж}$, $\bar{\sigma}_i=0,32\sigma_{сж}$, $\bar{\sigma}_i=0,61\sigma_{сж}$, $\bar{\sigma}_i=0,88\sigma_{сж}$. В результате этих измерений были получены для образцов первой группы автокорреляционные функции (АКФ) $B_{x|x}(\tau)$, а для образцов второй группы - взаимные корреляционные функции (ВКФ) $B_{x|y}(\tau)$ принятых УЗ сигналов. Сглаженные графики этих функций предоставлены на рисунке 3.16.

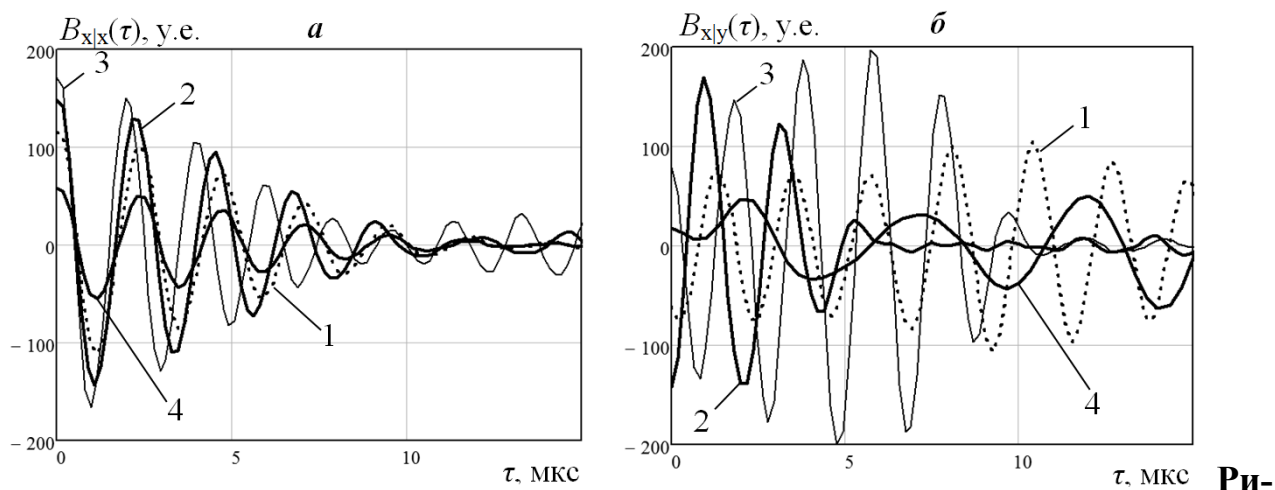


Рисунок 3.16 – Характерные формы сглаженных АКФ (а) и ВКФ (б) на начальной (1), линейно-упругой (2), упруго-пластичной (3) и пластической предельной (4) стадиях

Качественный анализ указанных графиков свидетельствует о значительном влиянии напряжений на АКФ и ВКФ принятых УЗ сигналов. Причем, соответствующие различным стадиям деформирования ВКФ отличаются друг от друга в большей степени, чем АКФ.

Важно также отметить, что, как известно, скорость распространения продольных упругих волн C_p при деформировании образца горной породы существенно изменяется только при совпадении направлений деформирования и УЗ прозвучивания [134]. В тоже время изменения ВКФ оказываются значительными и в случае, когда оказанные направления ортогональны.

Под влиянием напряжений происходит изменение всех рассмотренных в главе 2 информативных параметров корреляционного метода контроля. Однако, наибольший интерес (с учетом степени чувствительности к НДС и простоты измерения) представляют такие параметры, как дисперсия $B_{x|x}(0)$ и период τ_0 АКФ принятого УЗ сигнала, а также коэффициент взаимной корреляции ρ двух принятых УЗ сигналов и интервал корреляции $\tau_{ик}$ их ВКФ.

Экспериментально полученные значения указанных параметров при напряжениях $\bar{\sigma}_i$, соответствующих средним значениям каждой из стадий деформирования, приведены в таблице 3.2. Их анализ позволяет говорить о потенциальной возможности не только качественного, но и количественного контроля НДС на основе корреляционных измерений. Важно также отметить, что при переходе от I стадии деформирования к III происходит хотя и нелинейное, но относительно плавное с постоянным знаком изменение информативных параметров. В тоже время переход от III к IV стадии сопровождается резким возрастанием и инверсией знака указанного значения. Последнее объясняется тем, что именно на четвертой стадии начинаются процессы структурной дезинтеграции геоматериала, который по мере развития указанных процессов оказывает все более сильное декоррелирующее влияние на шумовой УЗ сигнал.

Очевидно, что отмеченные особенности изменения информативных параметров при переходе к четвертой стадии деформирования могут быть использованы для прогнозирования близкого начала разрушения геоматериала.

Таблица 3.2 - Результаты лабораторных испытаний образцов

Стадии деформирования		Информативные параметры при АКО		Информативные параметры при ВКО	
		$B_{x/x}(0)$, у.е.	τ_0 , мкс.	$\rho_{y1/y2}$	$\tau_{ик}$, мкс.
I	Начальная	114	2,54	0,65	195
II	Линейно-упругая	147	2,36	0,85	240
III	Упруго-пластичная	171	1,97	0,96	281
IV	Пластическая предельная	57	2,50	0,51	174

3.4 Компьютерное и физическое моделирование влияния контактных условий акустических преобразователей с геосредой на информативные параметры ультразвукового корреляционного метода геоконтроля

Повышение надежности ультразвуковых методов геоконтроля за счёт использования зондирующего ультразвукового сигнала в виде случайного шума в

сочетании с его последующей корреляционной обработкой выдвигает на первый план задачу обеспечения близости контактных условий (КУ) двух приемных преобразователей. Это обусловлено тем, что различие КУ будет влиять на ВКФ, то есть выступать в качестве своеобразного помехового фактора. Ниже на основе математического моделирования и физического эксперимента предлагается критерий, выполнение условий которого означает минимизацию зависимости корреляционных характеристик сигнала от контактных условий [135]. Такая минимизация особенно важна при реализации взаимных корреляционных измерений при симметричном расположении приёмных ПЭП относительно излучающего (см. рис. 3.17), поскольку при этом (как уже отмечалось в главе 1) будет исключено влияние на ВКФ баз контроля.

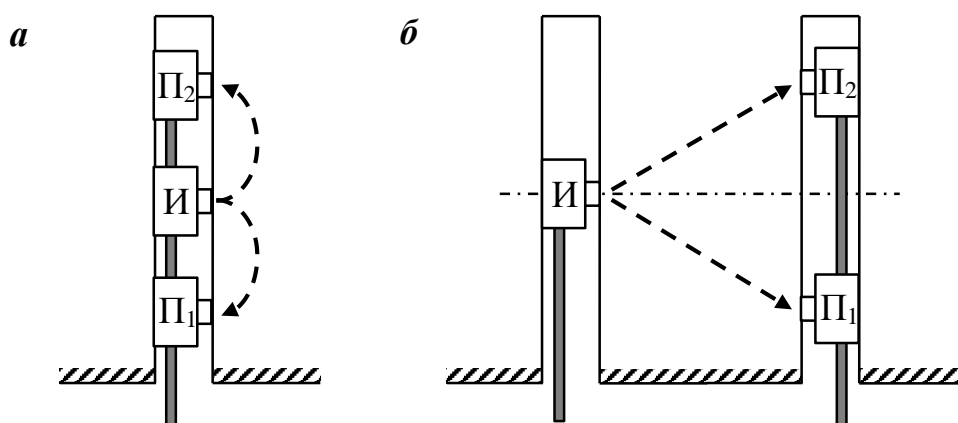


Рисунок 3.17 - Схемы ультразвукового корреляционного каротажа (а) и прозвучивания (б) при симметричном расположении двух приемных преобразователей Π_1 и Π_2 относительно излучателя И

Известно, что изменение КУ на границе «преобразователь - массив» приводит к изменению основных характеристик принимаемого УЗ сигнала – амплитудных, фазовых, а также частоты резонанса и ширины спектрального пика [72], что не может не сказываться на соответствующих корреляционных характеристиках.

Для выявления влияния КУ на основной информативный параметр взаимного корреляционного контроля (коэффициент взаимной корреляции ρ) было проведено соответствующее математическое моделирование.

С помощью оператора случайных чисел задавался широкополосный шумовой сигнал длительностью 5мс с шириной полосы $\Delta f^{баз} = 50\text{кГц}$ и резонансной частотой $f_{рез}^{баз} = 100\text{кГц}$. Сгенерированный сигнал разделялся на два потока, имитирующих два симметричных акустических тракта. Один из потоков принимался за базовый и не изменялся. Другой поток (контрольный) подвергался полосовой фильтрации с использованием фильтра Баттерворта [136] с управляемыми нижней и верхней границами фильтрации. Также в этом потоке изменялась амплитуда и фаза сигнала. По завершению всех преобразований оба потока поступали на коррелятор, где производилось вычисление коэффициента ρ в соответствии с формулой (2.8).

На рис. 3.18 показана зависимость коэффициента ρ от относительного изменения амплитудных, частотных и фазовых характеристик контрольного сигнала относительно базового. Резонансная частота $f_{рез}^{конт}$ (при постоянной ширине спектрального пика) изменялась от 0,1 до 1 в долях от $f_{рез}^{баз}$, ширина полосы $\Delta f^{конт}$ изменялась в диапазоне $(10\div 100\%) \Delta f^{баз}$. Фазовый сдвиг φ изменялся от 100% совпадения по фазе до 10% перекрытия сигналов, а амплитуда A изменялась от 0,1 до 1 A базового значения.

Из рисунка 3.18 видно, что наибольшее влияние на коэффициент корреляции оказывает изменение ширины полосы частот сигнала, а также разность фаз прихода сигналов на коррелятор. С точки зрения контактных условий, очевидно, что плохой прижим преобразователя к горной породе обуславливает возникновение на границе «преобразователь-массив» воздушной прослойки, скорость в которой, как минимум на порядок, меньше, чем в массиве. Это определяет отставание одного сигнала от другого и, как следствие, приводит к фазовому сдвигу в процессе корреляционной обработки.

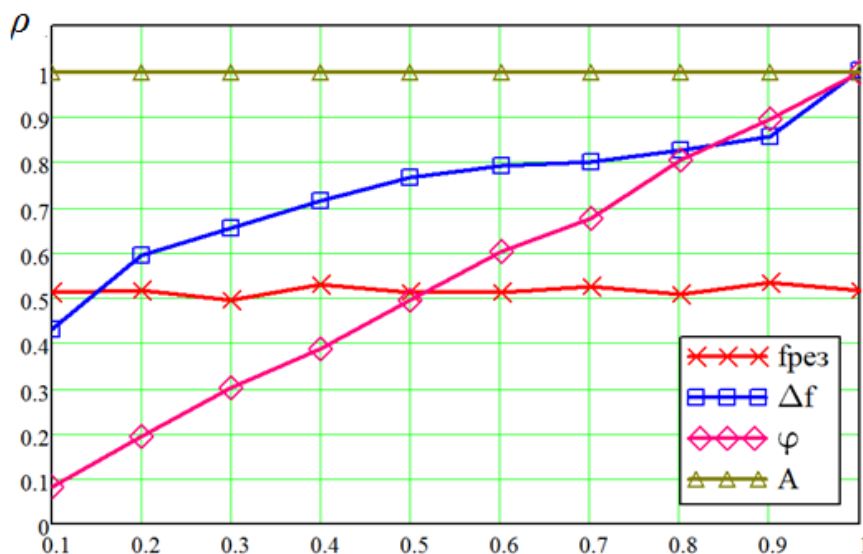


Рисунок 3.18 - Зависимость коэффициента ρ от изменения характеристик контрольного сигнала по отношению к их характеристикам базового сигнала

Наряду с отмеченным, неплотный контакт будет работать и как фильтр низких частот, существенно сокращая рабочую полосу, что также снизит коэффициент ρ . В тоже время отметим, что как следует из приведённых экспериментальных данных, влияние амплитуды на коэффициент ρ отсутствует. Указанное отсутствие становится вполне понятным, если проанализировать выражение (2.8).

Известно, что основным способом улучшения КУ акустических преобразователей с массивом является увеличение давления их прижима к стенкам скважины [27, 72, 76]. В тоже время, очевидно, что минимизировать указанным способом влияние КУ на частотные и фазовые характеристики принимаемого сигнала, возможно лишь до определенного предела, после которого существенного изменения этих характеристик не будет. Таким образом, проблема минимизации влияния КУ на измеряемый коэффициент взаимной корреляции сводится к задаче поиска критерия того, что достигнуто оптимальное прижимное давление, начиная с которого прекращается изменение влияния КУ на характеристики двух принятых сигналов.

Для обоснования указанного критерия был поставлен эксперимент, суть которого сводилась к следующему. К торцевым поверхностям образца известняка сечением 40×40 мм и высотой 80 мм прижимались широкополосные пьезоэлектрические преобразователи с резонансной частотой 200 кГц. Один из указанных преобразователей подключался к шумовому генератору, а другой к входу четырёхканального АЦП с частотой дискретизации 10 МГц. Прижим преобразователей осуществлялся с использованием компактного пресса, описанного в [137]. Практика проведения натурных УЗ измерений в скважинах показывает, что чаще всего прижим преобразователей к стенкам скважины обеспечивается пневматическим способом, при этом давление в системе редко превышает 2-3 атмосферы. Измеренная в рамках эксперимента сила прижима преобразователей была пересчитана с учетом площади контакта в давление P , атм. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.19.

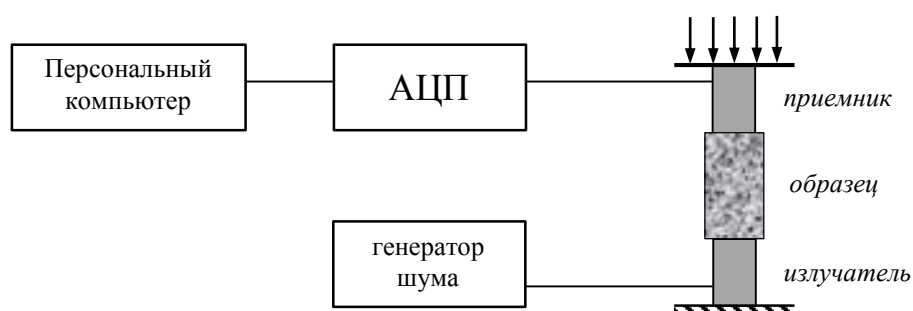


Рисунок 3.19 - Схема проведения эксперимента

В процессе ступенчатого нагружения от 0 до 3,2 атм. производилось излучение шумового УЗ сигнала в образец. Прошедший образец УЗ сигнал после акустоэлектрического преобразования приемным ПЭП подвергался аналого-цифровому преобразованию и дальнейшей обработке с помощью ПК. В качестве информативных параметров контроля были выбраны ширина полосы нормированного спектра сигнала на уровне $0,7 \Delta f$, резонансная частота $f_{рез}$ спектра акустического сигнала $f_{рез}$, его добротность $Q = f_{рез} / \Delta f$, а также интервал автокорреляции $\tau_{ик}$. Интервал корреляции рассчитывался по формуле

$$\tau_{ук} = \frac{1}{B_{y/y}(0)} \sum_1^n B_{y/y}(\tau) d\tau, \quad (3.3)$$

где $B_{y/y}$ – автокорреляционная функция зарегистрированного шумового сигнала, n – количество точек в оцифрованном сигнале, τ – период дискретизации АЦП.

С целью повышения надежности измеренных величин в процессе проведения эксперимента производилась запись и последующая статистическая обработка 100 реализаций шумового сигнала для каждой ступени нагружения. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.20.

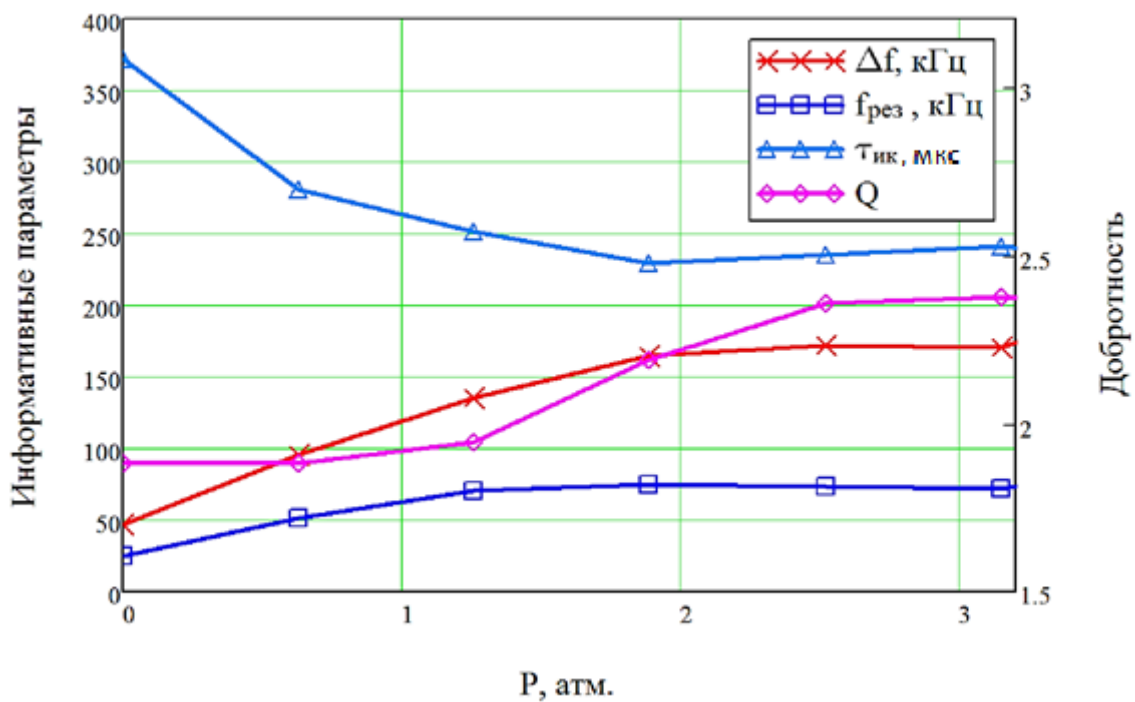


Рисунок 3.20 – Изменение информативных параметров контроля в функции от давления прижима акустических преобразователей к образцу

Из рис. 3.20 видно, что все информативные параметры изменяются в диапазоне давлений от 0 до 2÷2,5 атм. При бóльших нагрузках существенного изменения измеренных величин не происходит, что свидетельствует о потере корреляции между силой прижима преобразователя и характеристиками УЗ шумового

сигнала. Таким образом, учитывая, что аппаратура ультразвукового шумового каротажа и прозвучивания в любом случае предполагает корреляционную обработку сигналов, в качестве основного информативного параметра качества прижима преобразователей следует использовать интервал корреляции $\tau_{ик}$. При этом в качестве критерия достижения оптимальных контактных условий ПЭП с массивом будет выступать момент достижения давлением прижима значения, при котором уже не происходит изменение параметра $\tau_{ик}$.

Выводы к главе 3:

1. Проведённое компьютерное и физическое моделирование свидетельствует о том, что переход при УЗ каротаже от традиционных времяимпульсных к шумовым корреляционным измерениям обеспечивает существенное повышение чувствительности и информативности контроля структурной неоднородности приконтурного массива.

2. Получаемые при УЗ каротажных измерениях аномальные значения интервалов корреляции и коэффициентов взаимной корреляции шумовых сигналов в точках приёма, расположенных симметрично относительно точки излучения, приурочены к акустическим границам в прискважинном массиве, что может быть использовано для оценки его структурной неоднородности и повреждённости.

3. При использовании УЗ корреляционных каротажных измерений для выявления трещиновидных дефектов в приконтурном массиве необходимо учитывать установленные на основе моделирования ограничения соответствующего метода контроля, связанные с зависимостью его чувствительности от ориентации трещин, их протяжённости и степени удаления от контрольной скважины.

4. Экспериментальные исследования влияния механического нагружения образцов горных пород на корреляционные характеристики распростра-

ющего в них УЗ шумового сигнала свидетельствуют о потенциальной возможности использования рассматриваемого метода контроля для оценки пространственного распределения напряжений в окрестностях горных выработок.

5. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что при реализации взаимного корреляционного метода контроля, помеховое влияние несовершенства контактных условий ПЭП с массивом на его информативные параметры проявляется в изменении полосы частот принимаемых сигналов и их фазовых искажениях. Показано, что минимизация указанного влияния, достигается при достижении давлением в прижимной системе ПЭП значения, при котором прекращается изменение интервалов корреляции каждого из принятых сигналов.

Глава 4. Аппаратурное и методическое обеспечение ультразвукового корреляционного метода оценки структурных неоднородностей и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок. Натурные испытания метода.

4.1. Принципы и реализация аппаратурного обеспечения скважинного ультразвукового корреляционного метода геоконтроля с использованием шумовых зондирующих сигналов

Основные вопросы, рассмотренные в настоящем параграфе, отражены в работе [138].

Обобщенную схему УЗ корреляционного метода можно представить следующим образом. На противоположных сторонах объекта контроля (или на его поверхности на некотором расстоянии друг от друга) размещаются излучатель (И) и приемник (П) УЗ сигналов. Излучатель, подключенный к генератору (ГШ), используют для излучения в массив шумового сигнала в определенном частотном диапазоне. В зависимости от варианта применения метода могут использоваться как один приемный преобразователь, так и два. Сигналы с преобразователей поступают в блок регистрации и анализа информации (БРА). Блок-схемы реализации метода представлены на рисунке 4.1.

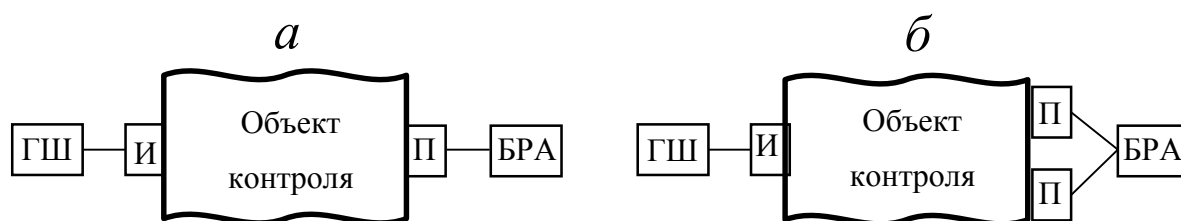


Рисунок 4.1 – Блок-схемы реализации автокорреляционного (*а*) и взаимного корреляционного (*б*) методов геоконтроля

В случае использования одиночного приемника (рис. 4.1*а*) в блоке анализа вычисляется автокорреляционная функция $B_{11}(\tau)$ и её соответствующие инфор-

мативные параметры контроля. При реализации взаимного корреляционного метода (рис. 4.1б) используются два приёмных преобразователя и в блоке анализа вычисляется функция взаимной корреляции $B_{12}(\tau)$ и её соответствующие информативные параметры.

Ниже приводится описание аппаратного комплекса, разработанного с учетом опыта, накопленного во время проведения представленных в главе 3 лабораторных исследований. Указанный комплекс состоит из шумового генератора, скважинного зонда, аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера с программным обеспечением для обработки принимаемого сигнала.

4.1.1 Генератор шума для ультразвуковых корреляционных измерений в массиве горных пород

Источником электрического сигнала, возбуждающего излучающий преобразователь при реализации корреляционного метода является шумовой генератор.

На сегодняшний день существует широкий спектр шумовых генераторов, выпускаемых промышленностью серийно. Они предназначены для: определения чувствительности радиоприемных устройств; оценки помехоустойчивости радиотехнических систем и систем телеуправления; измерения звукопоглощения различных материалов; параметров случайных процессов и решения ряда других задач.

Выпускаемые промышленностью электрические генераторы шума не могут быть использованы для возбуждения акустических пьезоэлектрических преобразователей, не отвечают необходимым для геоконтроля требованиям по мощности, частотному диапазону, а также таким не метрологическим характеристикам, как масса, габаритные размеры, автономность электропитания и другим.

Принципиально можно выделить два подхода к созданию шумового генератора. Первый из них является чисто аппаратным. Он реализуется на основе

блок-схемы, представленной на рисунке 4.2. Эта схема включает первичный источник 1 шумового сигнала, многокаскадный усилитель 2, усилитель мощности 3, согласующий трансформатор 4, аттенюатор 5 и источник питания 6.

На рисунке 4.3 представлена принципиальная схема источника шумового сигнала и пятикаскадного предусилителя.

В качестве источника шумового сигнала используется стабилитрон VD2, на который подается регулируемое напряжение питания с переменного резистора R7. Указанное напряжение близко к напряжению отсечки. Благодаря резкому перепаду вольтамперной характеристики стабилитрона, последний открывается по случайному закону, по которому изменяется и протекающий через него ток.

Шумовой сигнал с выхода стабилитрона VD2 через конденсатор C12, отделяющий шумовую и постоянную составляющие напряжения, поступает на вход сдвоенного операционного усилителя (ОУ) DA3.

Первый ОУ DA3.1 включен по схеме повторителя напряжения со 100% обратной связью и имеет коэффициент усиления по напряжению равный 1. Он обеспечивает усиление сигнала по току и согласует источник шума с последующими усилительными каскадами. Входное сопротивление усилителя DA3.2 практически полностью определяется сопротивлением резистора R14 и равно 100 кОм.

Далее шумовой сигнал поступает на последовательную цепочку усилительных каскадов: на элементах ОУ DA3.2 (коэффициент усиления по напряжению $K_u = 3,3$), DA4.1 ($K_u = 3,3$), DA7.1 ($K_u = 10$), DA8.2 (K_u около 6,5). Суммарный K_u этих каскадов около 700 (с учетом переходных потерь на разделительных конденсаторах).

Затем шумовой сигнал поступает на усилитель мощности U1, выполненный на мощном операционном усилителе ОУ OP2544 (рис. 4.4), нагрузкой которого является согласующий трансформатор T1 (рис. 4.5). Ко вторичной (выходной) обмотке трансформатора T1 нагрузка подключается либо напрямую, либо через аттенюаторы (рис.4.5) с ослаблением соответственно 6 дБ или 12 дБ.

Питание генератора осуществляется от аккумулятора В1 напряжением 12В, которое поступает на преобразователь DA1 (T20-1223), обеспечивающий двухполярное напряжение питания ОУ +15 В/-15 В.

Контроль наличия напряжения питания осуществляется с помощью светодиода VD4. Устройство содержит плату зарядки и снабжено разъемом J1 для подключения внешнего блока зарядки мощностью 60 ВА, обеспечивающего напряжение зарядки 15В.

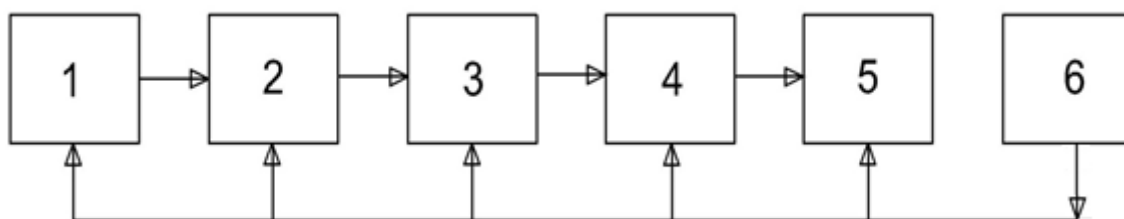


Рисунок 4.2 – Блок-схема генератора шума: 1 - источник шумового сигнала; 2 - усилитель; 3 - усилитель мощности; 4 - согласующий трансформатор; 5 - аттенюатор; 6 - источник питания.

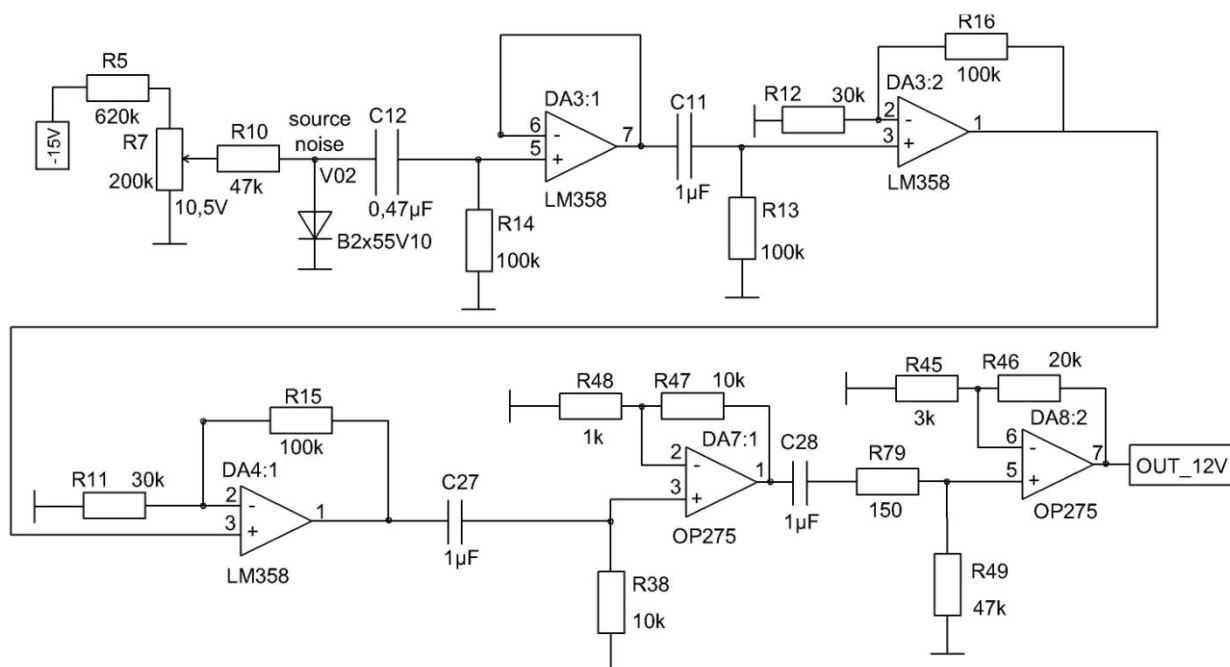


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема источника шумового сигнала и пятикаскадного предусилителя.

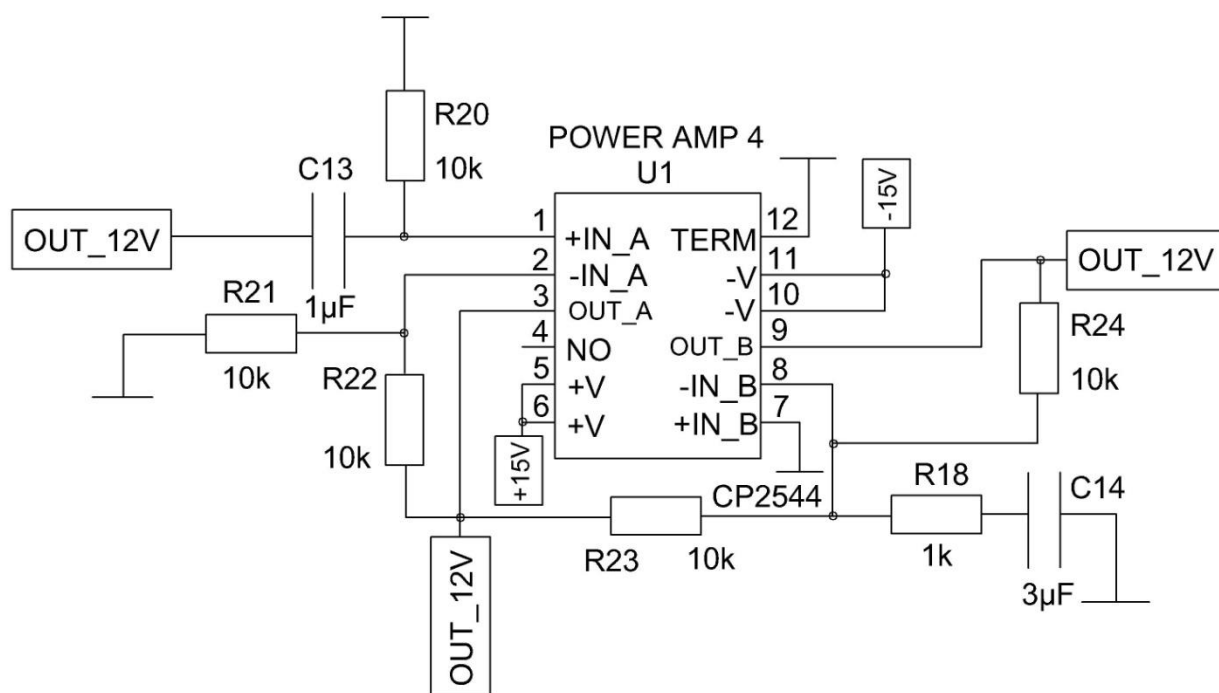


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема усилителя мощности шумового генератора.

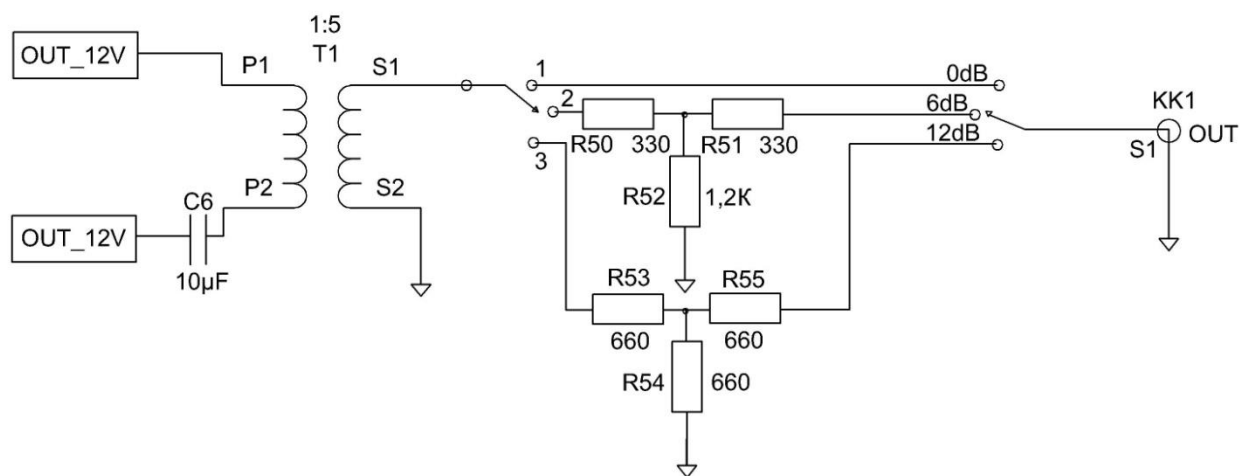


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема согласующего трансформатора и аттенюатора.

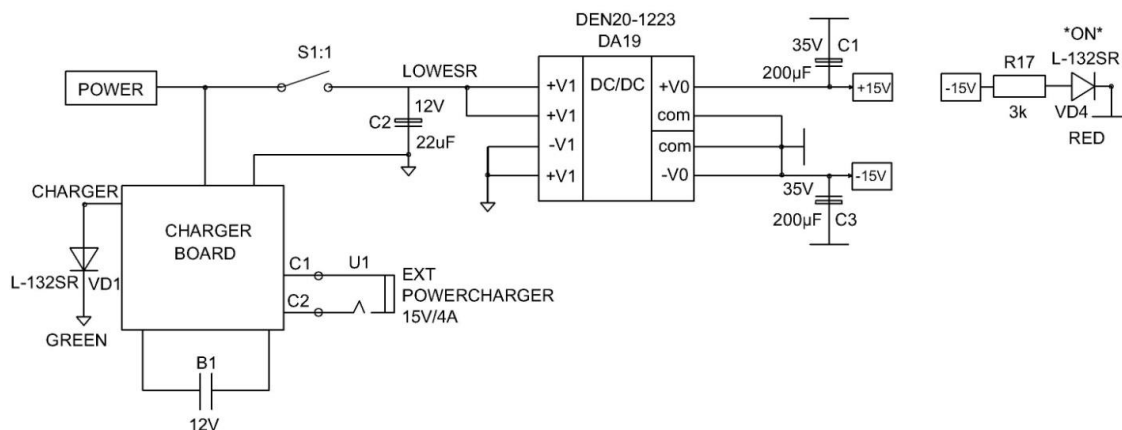


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема источника питания

На основе описанных выше принципиальных схемных решений с использованием современной элементной базы был создан портативный шумовой генератор ГШ-1, технические характеристики которого представлены в таблице 4.1. Основными достоинствами такого генератора являются: высокое выходное напряжение, стабильность работы во всем частотном диапазоне и значительную продолжительность автономной работы.

Таблица 4.1 - Технические характеристики генератора шума

Техническая характеристика	Значение
Рабочая полоса частот, кГц	10-500
Максимальная амплитуда шумового сигнала, В	100 (на нагрузке 1 кОм)
Трёхпозиционный аттенюатор, дБ	0 – 6 – 12
Питание (автономное), В/ А-час	15 / 4
Время автономной работы, час.	7

Второй подход к созданию шумового генератора является программно-аппаратным. В этом случае форма сигнала задается программно путем математического моделирования в любом подходящем для этих целей программном пакете. Далее записанный в память сигнал ограниченной продолжительности подается на выход звуковой карты устройства, подключенный к предварительному усилителю мощности. С выхода предусилителя сигнал поступает на излучающий пьезоэлектрический преобразователь.

Наряду с очевидными достоинствами, связанными, в первую очередь, с широкими возможностями компьютерного моделирования различных типов шумов (например, цветные и тональные шумы), существует и ряд недостатков. Одним из них можно считать ограниченную продолжительность записи сигнала, которая может негативно сказаться при длительных непрерывных испытаниях. Другой недостаток такого рода шумового генератора заключается в относительно низких частотах дискретизации большинства звуковых карт, редко превышающих значение 192 кГц. При этом, в соответствии с [139], рабочая частота такого генератора составит порядка 100 кГц, что вполне достаточно для работы в массиве на больших базах, но явно недостаточно для лабораторных исследований на относительно небольших образцах, где частоты прозвучивания должны достигать ~ 400 кГц.

На рисунке 4.7 представлены сигналы и их спектры, полученные с помощью генератора ГШ-1 и компьютерного моделирования соответственно.

Как видно из рисунка 4.7, компьютерное моделирование позволяет добиться более ровного спектрального состава, что делает перспективным программно-аппаратный подход создания шумового генератора при решении определенного круга исследовательских задач.

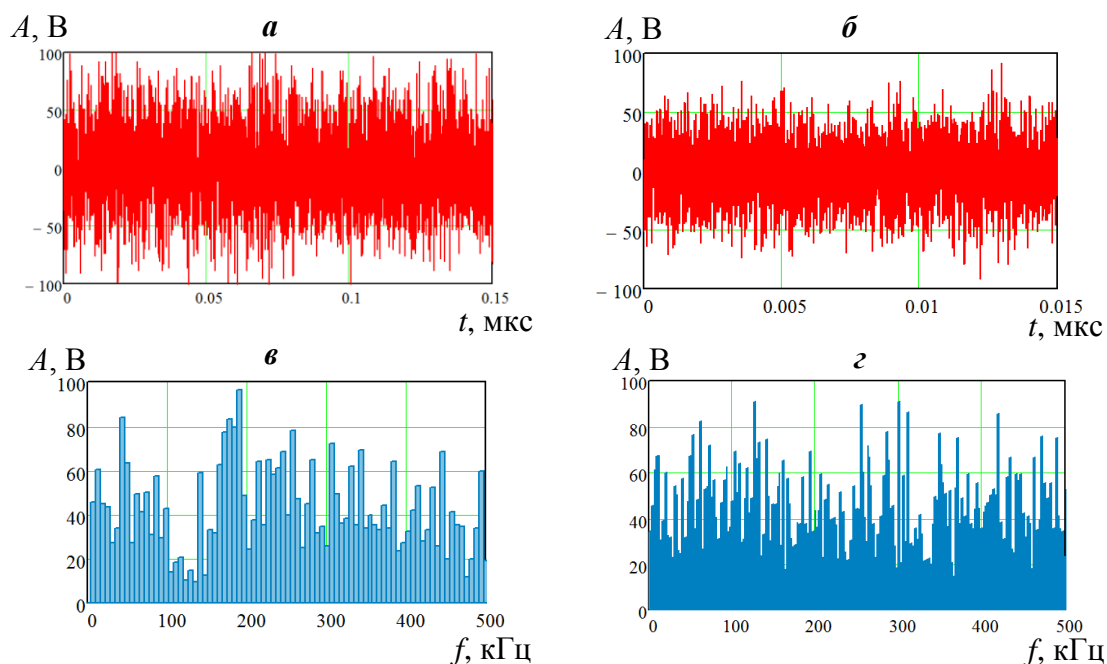


Рисунок 4.7 – Шумовые сигналы, полученные с помощью генератора ГШ-1 (а) и компьютерного моделирования (б), а также соответствующие им спектры (в) и (г)

4.1.2 Скважинный зонд для излучения и приёма ультразвуковых шумовых сигналов

Скважинный зонд предназначен для излучения и приема ультразвукового шумового сигнала в исследуемую область массива горных пород. Он имеет модульную структуру, позволяющую (в зависимости от выбранной схемы измерений, используемых информативных параметров АКФ или ВКФ и решаемых задач), изменять взаимное расположение излучающего и приёмного (приёмных) ПЭП..

В максимальной комплектации зонд состоит из трех модулей, каждый из которых содержит: акустический преобразователь в специальном корпусе; резиновую мембрану для прижима преобразователя к стенке скважины; разъем для коммутации модулей с АЦП кабелем типа РК 50-2-11; штуцер для подключения пневматического шланга; втулки для крепления акустических

развязок; стальные направляющие. Общий вид зонда в сборе представлен на рисунке 4.8.

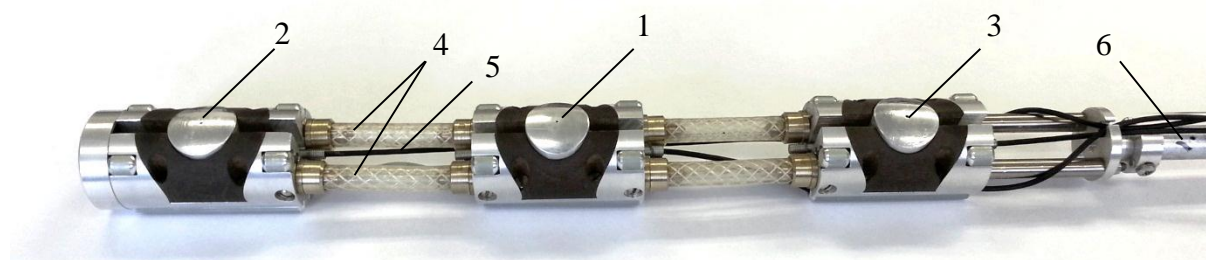


Рисунок 4.8 – Общий вид скважинного ультразвукового зонда: 1 – корпус излучающего акустического преобразователя; 2, 3 – корпуса приемных преобразователей; 4 – акустическая развязка; 5 – электрические выводы преобразователей; 6 – досылочная штанга

Акустические развязки в данном случае выполняют двойную функцию. Первая из них заключается в предотвращении попадания акустического сигнала от излучающего к приёмному ПЭП через корпус зонда, минуя исследуемую область массива. Вторая функция – конструктивное соединение модулей зонда на фиксированном расстоянии друг от друга, которое определяет базу прозвучивания. В комплект зонда входит набор сменных акустических развязок длиной 100 мм, 150 мм, 200 мм.

Отдельного внимания требует вопрос выбора УЗ ПЭП для комплектования скважинных зондов. Большинство выпускаемых на сегодняшний день промышленностью ПЭП являются резонансными и имеют относительно узкую полосу частот. Применительно к корреляционному методу контроля это приводит к тому, что из всей ширины спектра белого шума вырезается узкая область с явно преобладающей гармоникой на резонансной частоте. В результате случайный шумовой сигнал превращается в практически синусоидальный. При этом значительно снижается потенциальная информативность контроля и возрастает риск

появления резонансных явлений в исследуемом объекте, делая корреляционные измерения бессмысленными. Исходя из этого, следует использовать хотя и резонансные, но относительно низкодобротные ПЭП, что гарантирует сохранение случайной природы излучаемого и принимаемого шумового сигнала.

Акустические преобразователи изготавливались специально для зонда. Основу преобразователя формирует пакет пластин пьезокерамики марки ЦТС-19 толщиной 1 мм, собранных на центральном армирующем стержне. При этом резонансная частота составила 90 кГц, полоса частот – 20 кГц. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя представлена на рисунке 4.9.

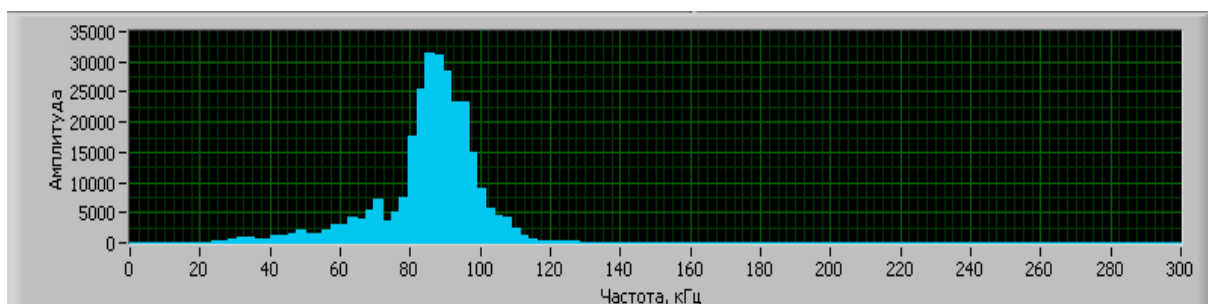


Рисунок 4.9– Амплитудно-частотная характеристика акустического преобразователя

Традиционно в скважинных зондах используются корпуса преобразователей, с контактной поверхностью в виде сегмента цилиндра такого же диаметра, как и у зонда (см. рис.4.10 а). При этом обеспечивается относительно плотный контакт ПЭП со стенками скважины правильной цилиндрической формы. Однако опыт натурных измерений показывает, что зачастую измерительные скважины имеют неправильную форму как в сечении, так и вдоль оси. Поэтому более надёжные контактные условия реализуются при контактной поверхности корпуса с радиальной кривизной в двух ортогональных направлениях (см. рис. 4.10 б).

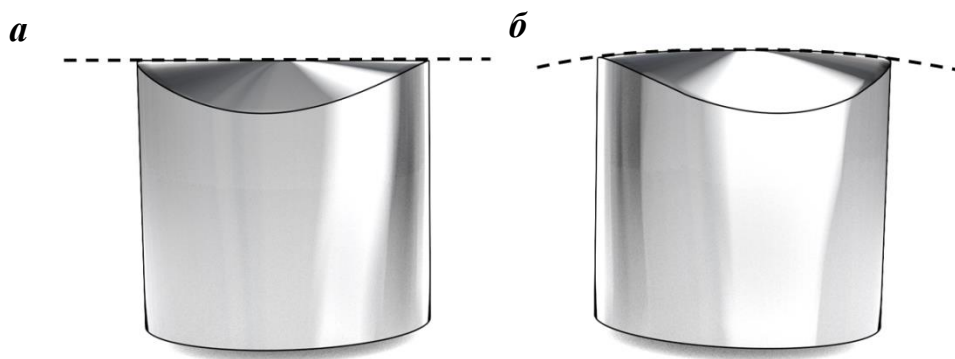


Рисунок 4.10 – Формы контактных поверхностей в традиционных (а) и используемых в разработанном зонде (б) корпусах ПЭП

Использование выпуклых протекторов позволяет обеспечить максимальное и главное стабильное по площади пятно контакта ПЭП со стенкой скважины неправильной формы и, следовательно, создать условия для эффективного преодоления ультразвуковым сигналом границы «преобразователь-массив».

Прижим преобразователя осуществляется с помощью пневматической системы, принцип работы которой иллюстрируется рисунком 4.11.

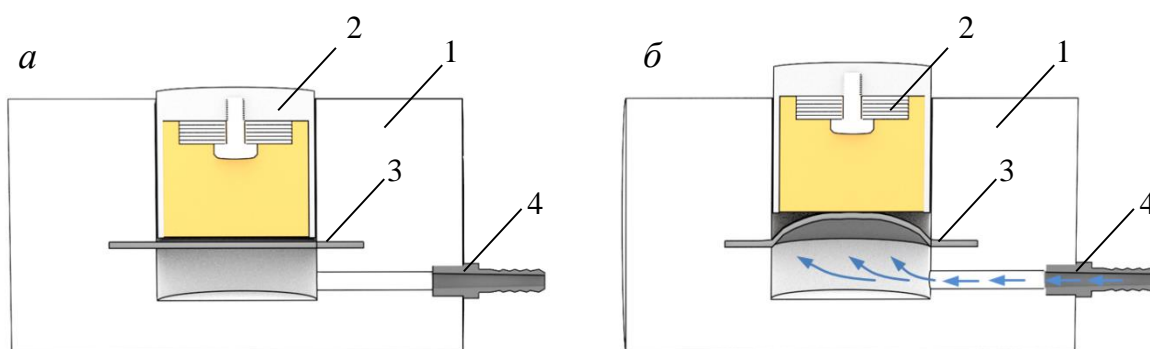


Рисунок 4.11- Схема работы пневмоприжима УЗ ПЭП в режиме перемещения по скважине (а) и в рабочем режиме (б): 1 – корпус модуля; 2 – преобразователь, 3 – резиновая мембрана; 4 – штуцер подачи воздуха

4.1.3 Аналого-цифровое преобразование и корреляционная обработка принятого шумового сигнала

Важнейшим элементом аппаратного обеспечения рассматриваемого метода геоконтроля является блок регистрации и корреляционной обработки принятого УЗ шумового сигнала. Этот блок обеспечивает регистрацию указанного сигнала, его преобразование в цифровую форму с помощью АЦП и дальнейшую программную обработку с целью получения АКФ или ВКФ и определения по ним соответствующих информативных параметров контроля. При этом минимальную частоту дискретизации АЦП в соответствии с теоремой Котельникова [139], следует выбирать с учётом максимальной частоты принимаемого УЗ сигнала.

При проведении лабораторных исследований ультразвуковым корреляционным методом для регистрации принятых шумовых сигналов может использоваться цифровой осциллограф, поддерживающий функцию записи сигналов в память и их экспорт. Получение готовых коррелограмм практически моментально в процессе проведения лабораторного эксперимента позволяет значительно снизить погрешности, связанные с контактными условиями «преобразователь-массив», путем статистической обработки большого количества измерений.

На рисунке 4.12 представлена схема измерительного тракта аппаратуры для корреляционного метода контроля.

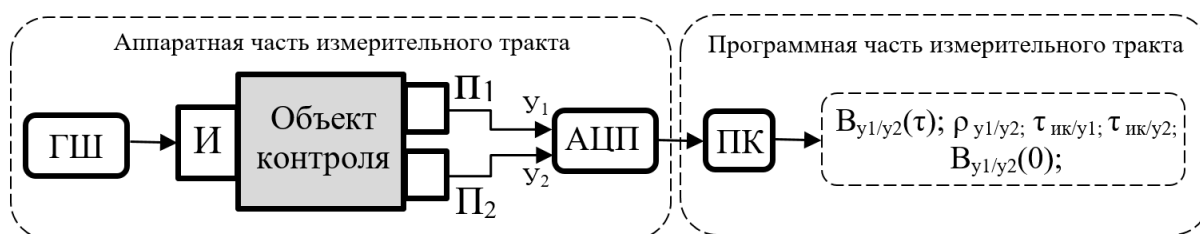


Рисунок 4.12 - Измерительный тракт аппаратуры для реализации корреляционного метода контроля

Электрические разъемы излучающего и приемных преобразователей подключаются к четырехканальному аналого-цифровому преобразователю E20-10 производства ООО «Л Кард». Основные технические характеристики АЦП приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики АЦП E20-10

Количество каналов	4
Разрядность АЦП, бит	14
Поддиапазоны измерения входного сигнала, В	$\pm 3,0$; $\pm 1,0$; $\pm 0,3$ (настройка каждого канала независимая)
Тип аналоговых входов АЦП	«с общей землёй», «экранированный»
Входное сопротивление аналогового входа АЦП, МОм	10
Максимальная частота преобразования, МГц	10
Полоса частот пропускания сигнала каждого канала, МГц	0...1,2 - (для варианта исполнения E20-10-1) 0... 5 - (для каждого канала варианта исполнения E20-10-2)
Типичное отношение сигнал-шум канала АЦП, дБ.	73
Межканальное прохождение, дБ (не более)	-70 (при постоянном напряжении) -75 (на частоте 1 кГц)
FIFO буфер данных, Мбайт	8 Мбайт
Режимы синхронизации	Частоты преобразования АЦП, старта сбора данных (по цифровому и аналоговому сигналам)
Цифровые входы, выходы и линии синхронизации	
Количество входов	16 (параллельных, асинхронных, один из них может быть сконфигурирован под двунаправленную линию "синхронизации старта АЦП")
Количество выходов	16 (параллельных, асинхронных, с общим разрешением выходов)
Двунаправленная линия "Синхронизация частоты АЦП"	1
Режимы синхронизации старта сбора данных или запуска АЦП	По каждой из 2-х двунаправленных линий "Синхронизации старта АЦП" и "Синхронизация частоты АЦП" может быть настроен режим синхронизации "внутренний", "внутренний с трансляцией на выход" или "внешний"

Продолжение таблицы 4.2

Питание	
Внешний источник, В	+8,0... +40
Потребляемая мощность, Вт	4,5
Питание внешних устройств, В	±12 (до 35 мА) – выведено на разъем аналоговых сигналов, +5 В (до 35 мА) – выведено на разъем цифровых сигналов
Габариты, мм	140x110x35 (без разъёмов)

После аналогово-цифрового преобразования сигналы длительностью 2048 отсчетов (≈ 400 мкс) через интерфейс USB 2.0 поступают на персональный компьютер, где происходит их корреляционная обработка. Суть такой обработки сводится к следующему.

Сигналы с первого приемного (S_1) и второго приемного (S_2) преобразователей поступают в корреляционный анализатор, где происходит построение их ВКФ и соответствующих АКФ по формулам

$$B_{S_1, S_2}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_1(i) \cdot S_2(i + \tau), \quad (4.1)$$

$$B_{S_1}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_1(i) \cdot S_1(i + \tau), \quad (4.2)$$

$$B_{S_2}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_2(i) \cdot S_2(i + \tau), \quad (4.3)$$

где τ – сдвиг сигналов относительно друг друга на интервал дискретизации АЦП, N – общее количество зарегистрированных точек в сигнале ($N = 2048$).

Характерный вид получаемой ВКФ представлен на рисунке 4.13.

Далее по формуле (2.8) определяется коэффициент корреляции ρ .

Полученное значение ρ записывается в память компьютера. Процедура получения сигналов, их корреляционной обработки и вычисления коэффициента корреляции повторяется 50 раз, после чего накопленный массив значений ρ усредняется и выводится на экран компьютера.

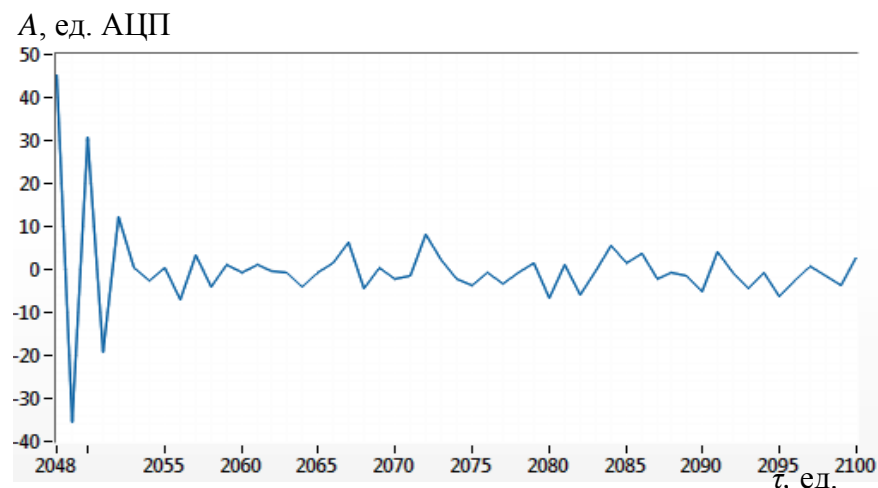


Рисунок 4.13 – Общий вид ВКФ сигналов S_1 и S_2

Использование быстродействующего АЦП E20-10 позволяет производить все измерения в реальном времени и выводить на экран результат в течение 30 с после запуска измерения.

На рисунке 4.14 представлена блок-схема алгоритма корреляционной обработки принятых шумовых сигналов.

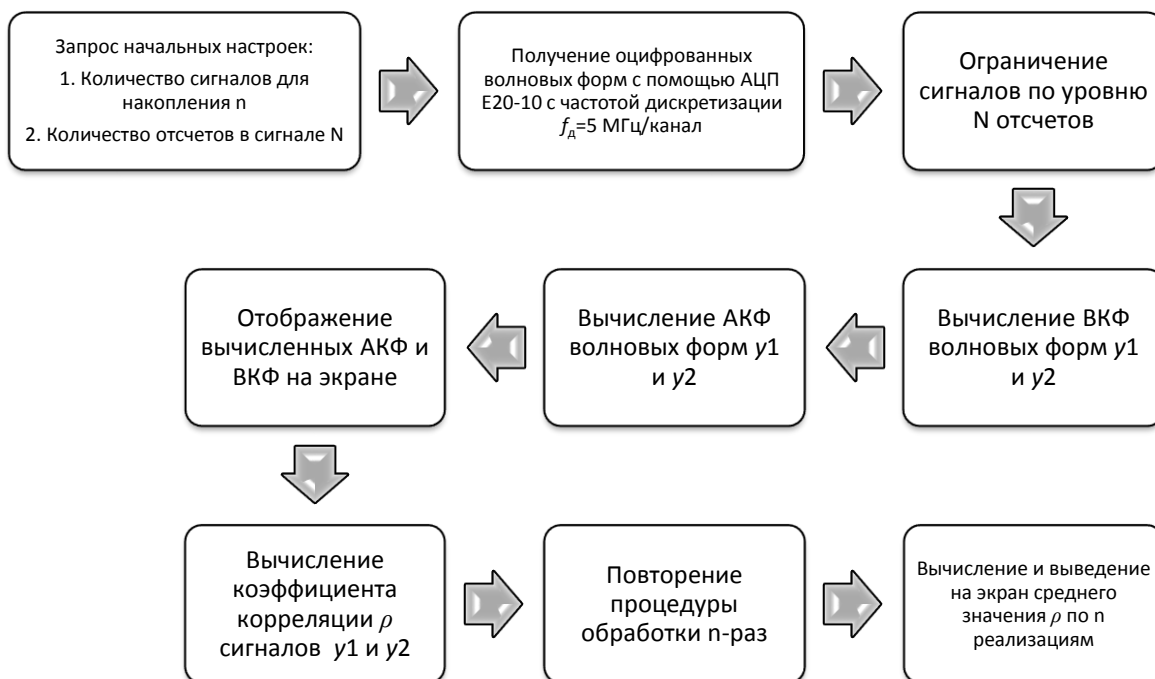


Рисунок 4.14 – блок схема корреляционной обработки шумовых сигналов

4.2 Обоснование скважинных ультразвуковых способов контроля состояния массива в окрестностях горных выработок на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки

4.2.1 Способ ультразвукового каротажа пород кровли горных выработок на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки

Рассматриваемый ниже способ [140] основан на установленных выше (в главе 3) закономерностях влияния структурных неоднородностей на корреляционные характеристики излучаемого в массив шумового акустического сигнала,

Рассмотрим суть указанных закономерностей для случая, когда два приёмных преобразователя расположены симметрично относительно излучающего преобразователя.

Во-первых, очевидно, что наличие структурной неоднородности горных пород (например, в виде трещин) между точками приема УЗ сигналов должно влиять на коэффициент ρ взаимной корреляции между зарегистрированными в этих точках сигналами. Если при отсутствии неоднородности $\rho \rightarrow 1$, то с ее увеличением взаимосвязь сигналов, зарегистрированных в точках приема уменьшается. Физически это влияние вполне понятно, если учесть, что неоднородность приводит к различным изменениям амплитудных и, прежде всего, частотных и фазовых характеристик сигналов, регистрируемых в двух точках приема.

Во-вторых, интервалы $\tau_{ик}$ автокорреляции сигналов в точках приема тем меньше, чем больше нарушен участок массива между точкой излучения и соответствующей точкой приема, а значит соотношение между указанными интервалами несет информацию о том, к какой из точек приема находится ближе нарушенная зона.

В-третьих, при распространении указанных сигналов в каждом конкретном типе горной породы, не содержащей значимых структурных неоднородностей (зон аномальной повреждённости), существует свой характерный радиус пространственной корреляции r . Последний, как известно [121], представляет собой расстояние l , в пределах которого зарегистрированные акустические сигналы от одного источника коррелированы между собой (т.е. их коэффициент взаимной корреляции $\rho > 0,1$). При $l > r$ указанные сигналы независимы друг от друга и для них $\rho < 0,1$.

Учитывая природную неоднородность свойств однотипных горных пород даже при отсутствии в них зон повышенной повреждённости, два сигнала могут быть независимы друг от друга уже на расстоянии $0,6 r$. Таким образом, взаимные корреляционные измерения сигналов в двух точках приема (симметричных относительно точки излучения) имеют смысл только при условии, что они лежат от точки излучения на расстоянии $l \leq 0,3 r$.

Алгоритм реализации способа предполагает: возбуждение в скважине УЗ сигнала в виде стационарного случайного шума со средним равным нулю; прием сигналов, прошедших исследуемую область в двух точках, расположенных симметрично выше и ниже точки излучения на расстоянии, не превышающем $0,3$ радиуса корреляции излученного сигнала в ненарушенной горной породе; измерение коэффициента взаимной корреляции сигналов в точках приема и интервалов автокорреляции этих сигналов.

Предполагается, что коэффициент взаимной корреляции несёт информацию о наличии и степени трещиноватости околоскважинного массива между точками приема, а соотношение измеренных интервалов корреляции - о расположении трещиноватой зоны относительно точки приема.

Предлагаемый способ иллюстрируется схемами на рис. 4.15, где показано расположение УЗ зонда на различных глубинах H_i контрольной скважины.

Глубина размещения ультразвукового зонда H_1 (рис. 4.15а) соответствует однородному массиву, не содержащему зону трещиноватости, пересекаемую

контрольной скважиной. Глубина размещения зонда H_2 (рис. 4.15б) соответствует участку массива, содержащему трещиноватую зону между точкой излучения и верхней точкой приема шумового акустического сигнала. Глубина размещения зонда H_3 (рис. 4.15в) соответствует участку массива, содержащему трещиноватую зону, расположенную на одинаковом расстоянии от точек приема шумового акустического сигнала. Глубина размещения зонда H_4 (рис. 4.15г) соответствует участку массива, содержащему трещиноватую зону между точкой излучения и нижней точкой приема шумового акустического сигнала.

На рис. 4.16 представлены ожидаемые значения коэффициентов взаимной корреляции $\rho_{в/н}$ шумовых сигналов на верхнем и нижнем приёмных преобразователях, а также отношения интервалов автокорреляции этих сигналов $\tau_{ик}^B / \tau_{ик}^H$ при расположении ультразвукового зонда на глубинах H_1, H_2, H_3 и H_4 соответственно.

Предполагается, что совместный анализ совокупности измеренных значений $\rho_{в/н}$ и $\tau_{ик}^B / \tau_{ик}^H$ на каждой конкретной глубине должен позволить не только установить факт наличия неоднородности на участке контроля, но и (например, в случае трещины) достаточно точно определить её местоположение.

Для реализации способа в кровле горной выработки бурят измерительную скважину, в которую помещают УЗ зонд, содержащий излучающий ПЭП и симметричные ему верхний и нижний приемные ПЭП. При этом расстояние l между излучающим и каждым из приёмных ПЭП устанавливают таким, чтобы выполнялось условие $l \leq 0,3 r$. Значение r получают на основе предварительных измерений на соответствующих не нарушенных горных породах. Излучающий ПЭП подключают к выходу генератора стационарного электрического шумового сигнала со средним равным нулю, а приемные ПЭП - к соответствующим входам корреляционного анализатора.

УЗ зонд дискретно перемещают вглубь скважины с шагом ΔH и на каждом шаге обеспечивают надежные контактные условия ПЭП с поверхностью контрольной скважины.

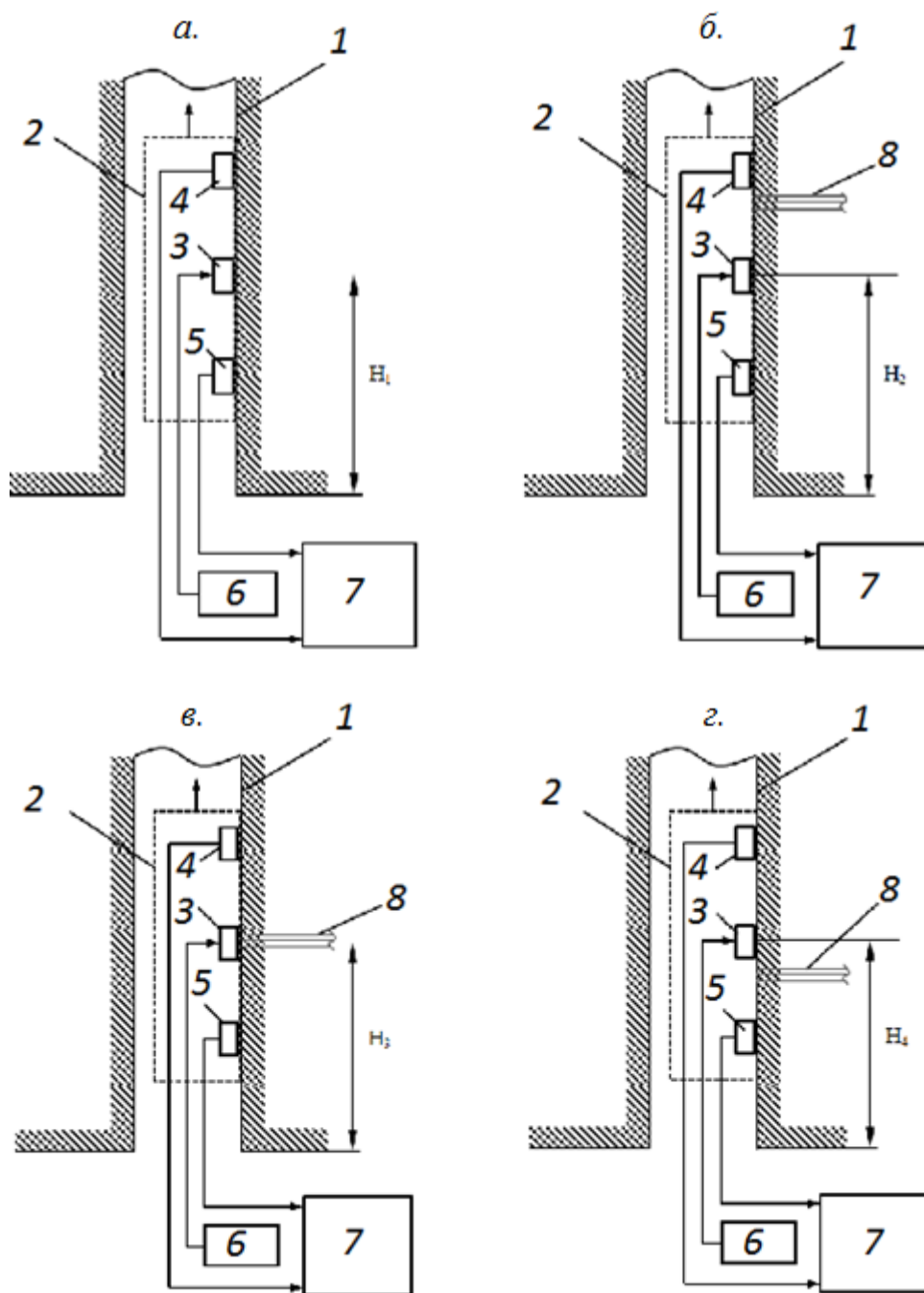


Рисунок 4.15 - Схема измерений с пошаговым перемещением скважинного зонда: 1 – измерительная скважина; 2 – скважинный зонд; 3 – излучающий преобразователь; 4, 5 – приемные преобразователи; 6 – генератор шума; 7 – корреляционный анализатор; 8 – зона структурной нарушенности (трещиноватости)

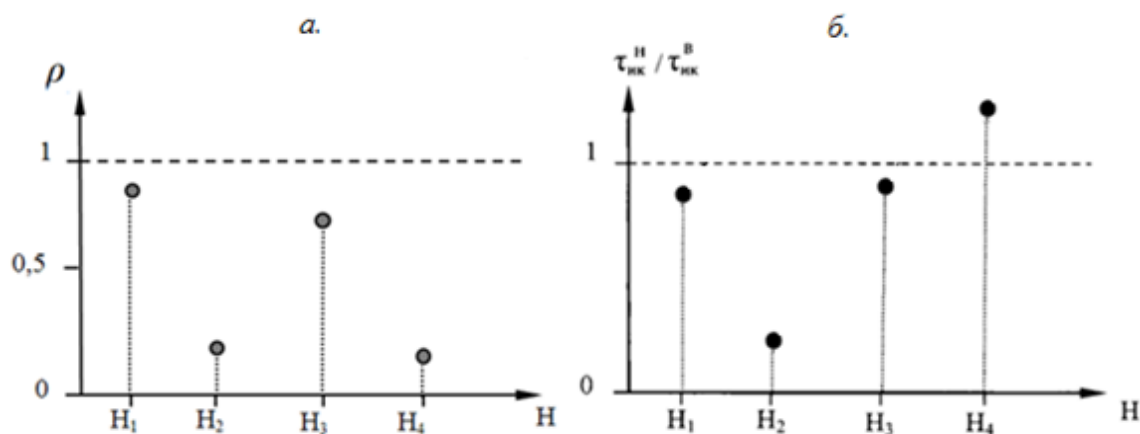


Рисунок 4.16 - Ожидаемые значения коэффициентов взаимной корреляции $\rho_{в/н}$ (а) и отношения $\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B$ (б) УЗ шумовых сигналов принимаемых верхним и нижним ПЭП при положениях зонда на глубинах $H_1 - H_4$ измерительной скважины

На каждой дискретной глубине H_i измерительной скважины, на которой ПЭП контактируют с ее стенкой, измеряют (с помощью корреляционного анализатора) коэффициент $\rho_{в/н}$ взаимной корреляции УЗ сигналов в точках приема и интервалы автокорреляции $\tau_{ик}^B$ и $\tau_{ик}^H$ указанных сигналов в этих точках. Затем определяют их отношение $\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B$.

В случае, если на базе $2l$ между верхней и нижней точкой приема массив горных пород не содержит трещиноватой зоны, пересекающей измерительную скважину (см. 4.15а), изменения характеристик сигналов в точках приема будут примерно одинаковы и незначительны. Как следствие, коэффициент взаимной корреляции $\rho_{в/н}$ этих сигналов будет стремиться к 1. По тем же причинам в точках приема будут близки также и интервалы автокорреляции УЗ сигналов, а значит отношение $\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B$ также будет стремиться к 1.

При наличии трещиноватой зоны между точкой излучения и верхней точкой приема (рис. 4.15б) декорреляция УЗ сигнала, принимаемого в этой точке,

будет существенно больше, чем акустического сигнала, регистрируемого в нижней точке приема. В результате измеренные на глубине H_2 значения величин $\rho_{в/н}$ и $(\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B)$ будут много меньше 1.

При наличии и симметричном расположении трещиноватой зоны относительно точек приема (рис. 4.15в) изменения характеристик шумовых акустических сигналов, регистрируемых в этих точках, будут примерно одинаковы. Как следствие этого, измеренные на глубине H_3 значения $\rho_{в/н}$ и $(\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B)$ будут близки к 1. Однако, поскольку абсолютная симметрия трещиноватой зоны относительно точек приема на практике маловероятна, значения $\rho_{в/н}$ и $(\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B)$ будут все же несколько меньше, чем в случае полного отсутствия трещиноватой зоны.

Для случая, представленного на рис.4.15г, когда трещиноватая зона находится между излучающим ПЭП и нижней точке приёма, декорреляция акустического сигнала в этой точке будет существенно больше, чем в верхней точке приема. В результате, измеренное на глубине H_4 значение $\rho_{в/н} \ll 1$, а значение $(\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B) > 1$.

Описанный способ испытывался в лабораторных условиях. Для этого использовался кубический блок известняка со стороной 400 мм, на трёх боковых гранях которого на расстоянии 230 мм от поверхности прослеживалась трещина. С поверхности блока пробуривалось ортогональное указанной трещине сквозное отверстие диаметром 42 мм. Далее в скважину помещался каротажный зонд, содержащий излучающий ПЭП и два размещенных на равном расстоянии по разные стороны от него приемных ПЭП. Резонансная частота всех преобразователей составляла 150 кГц, добротность - 10. На вход излучающего ПЭП подавался шумовой сигнал в полосе частот 10-500 кГц со средним равным нулю. Электрические сигналы с приемных ПЭП поступали на двухканальный АЦП с частотой дискретизации 1 МГц, подключенный к персональному компьютеру, на котором программным путем вычислялись значения $\rho_{в/н}$ и $(\tau_{ик}^H / \tau_{ик}^B)$.

Для предварительного определения радиуса корреляции r на плите того же известняка проводилось поверхностное УЗ прозвучивание с пошаговым увеличением расстояния l между излучающим и приемными ПЭП. Экспериментально установлено, что при $l=180$ мм коэффициент корреляции падает ниже значения 0,1. Таким образом, для дальнейших исследований расстояние l было принято равным 50 мм.

Каротажный зонд перемещался вглубь скважины так, чтобы при первом измерении трещина оказалась вне каротажного зонда, при втором - между верхним приемным ПЭП и излучателем, при третьем - трещина оказалась совмещенной по координате с излучателем, при четвертом - трещина оказалась между излучателем и нижним ПЭП. При каждом из описанных вариантов нахождения трещины определялись коэффициент корреляции $\rho_{в/н}$ и отношение интервалов корреляции $(\tau_{ик}^н / \tau_{ик}^в)$. По результатам измерений было установлено, что для случая первого измерения $\rho_{в/н} = 0,86$ и $(\tau_{ик}^н / \tau_{ик}^в) = 0,90$, для второго случая $\rho_{в/н} = 0,23$ и $(\tau_{ик}^н / \tau_{ик}^в) = 0,31$, для третьего случая $\rho_{в/н} = 0,71$ и $(\tau_{ик}^н / \tau_{ик}^в) = 0,84$, для последнего случая $\rho_{в/н} = 0,21$ и $(\tau_{ик}^н / \tau_{ик}^в) = 1,48$.

Таким образом, лабораторный эксперимент качественно подтверждает работоспособность предлагаемого способа.

4.2.2 Способ определения пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки

Рассматриваемый ниже способ основан на установленных выше (в главах 2 и 3) закономерностях влияния механических напряжений в геосреде на корреляционные характеристики прошедшего через неё шумового акустического сигнала, а также влияния на эти характеристики контактных условий ПЭП с объектом УЗ контроля.

Изменение НДС геосреды приводит (в зависимости от стадии деформирования) к той или иной степени её уплотнения или дезинтеграции, Возникающие

при этом структурные изменения сказываются на частотных и фазовых характеристиках канала распространения УЗ сигнала, приводя к декорреляции последнего, а значит изменению соответствующих корреляционных информативных параметров контроля.

При реализации взаимно-корреляционных УЗ измерений основными помеховыми факторами, влияющими на относительную информативность этих параметров, являются различие в базах контроля и контактных условиях ПЭП с массивом каждого из каналов. Минимизировать влияние этих факторов возможно за счёт симметричного расположения приёмных ПЭП относительно излучающего, а также увеличения силы прижима ПЭП к стенке скважины до момента, когда прекращается изменение интервалов корреляции сигналов на их выходе.

В рамках способа решается задача повышения информативности УЗ корреляционных измерений при определении положения максимума зоны опорного давления и границ отдельных зон, характеризующих пространственное распределение напряжений в окрестности выработки.

Алгоритм реализации предлагаемого способа включает [141] прозвучивание УЗ сигналом в виде стационарного шума с нулевым средним значением участков массива, расположенных последовательно между параллельными скважинами по их глубине, и измерение корреляционных характеристик принятых сигналов. По изменению указанных характеристик с глубиной судят о напряженном состоянии массива. При этом прием УЗ сигналов осуществляют двумя ПЭП, расположенными симметрично относительно оси основного лепестка диаграммы направленности (ДН) излучающего ПЭП.

На каждом из контролируемых участков измеряют интервалы корреляции $\tau_{ик}^1$ и $\tau_{ик}^2$ и коэффициент ρ взаимной корреляции сигналов на выходе первого и второго приёмных ПЭП, одновременно увеличивая силу их прижима к стенке скважины до момента, когда падение $\tau_{ик}^1$ и $\tau_{ик}^2$ прекращается. После достижения этого момента измеряют значение ρ и строят график его зависимости от глубины

участка. Анализ этого графика позволяет определить границы зон пространственного распределения напряжений в окрестности выработки.

Глубину, начиная с которой коэффициент взаимной корреляции ρ приобретает постоянно значение $\rho_{зр}$, принимают за границу зоны первичных естественных напряжений. Глубины, при которых $0 < \rho < \rho_{зр}$, принимают за границы зоны разгрузки напряжений, а глубины при которых $\rho \geq \rho_{зр}$, принимают за границы зоны опорного давления. Максимальное значение напряжений в этой зоне очевидно имеет место на глубине, где значение ρ максимально.

Предлагаемый способ контроля напряженного состояния массива горных пород иллюстрируется схемой на рис. 4.17.

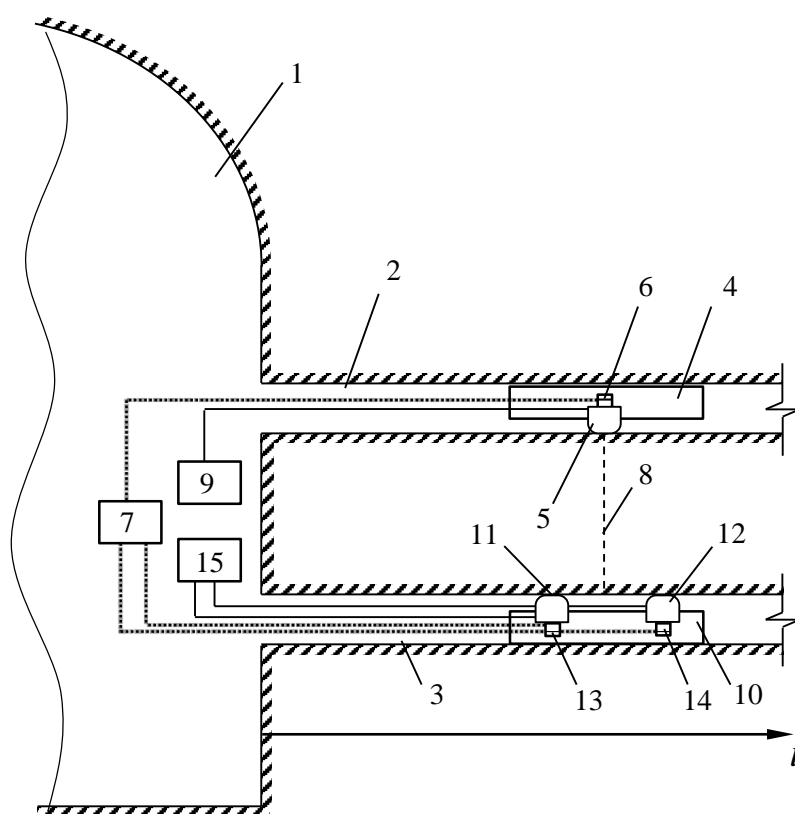


Рисунок 4.17 - Схема реализации способа: 1 – горная выработка; 2, 3 – измерительные скважины; 4 – скважинный зонд; 5 – излучающий ПЭП; 6 – прижимная пневмосистема излучающего ПЭП 6; 7 – компрессор; 8 – ось основного лепестка ДН излучающего ПЭП; 9 – ГШ; 10 – второй скважинный зонд; 11, 12 – приемные ПЭП; 13, 14 – прижимные пневмосистемы приёмных ПЭП; 15 – КА

Для реализации способа в стенке выработки бурят две параллельные измерительные скважины, в одной из которых размещают зонд с излучающим ПЭП, а в другой – зонд с приёмными ПЭП. При этом излучающий ПЭП ориентируют так, чтобы ось основного лепестка его диаграммы направленности была ортогональна оси скважины, а приемные ПЭП располагают симметрично относительно оси основного лепестка ДН излучающего ПЭП.

Прижимные пневмосистемы передают избыточное давление воздуха от компрессора к ПЭП, обеспечивая тем самым их надежные контактные условия со стенкой скважин.

Излучающий ПЭП возбуждают шумовым стационарным электрическим сигналом со средним равным нулю от электрического шумового генератора. УЗ сигналы, прошедшие исследуемые базы контроля, принимают приемными ПЭП с резонансной частотой f_0 и полосой частот $\Delta f \approx 0,1f_0$.

Электрические сигналы с выходов приемных ПЭП подают на соответствующие входы корреляционного анализатора (КА), с помощью которого измеряют интервалы корреляции $\tau_{ик}^1$ и $\tau_{ик}^2$ каждого из указанных сигналов и их коэффициент ρ взаимной корреляции. Одновременно с этими измерениями увеличивают силу прижима приемных ПЭП к стенкам скважины, повышая с помощью компрессора давление воздуха в соответствующих прижимных пневмосистемах.

Как показано на рис.4.18, вследствие изменения контактных условий на границе приёмных ПЭП со стенкой скважины, будут изменяться интервалы корреляции $\tau_{ик}^1$ и $\tau_{ик}^2$ сигналов на выходе указанных ПЭП. В момент достижения давлением P в прижимных системах некоторого уровня P^* (порядка 2,5 атм.) указанные выше контактные условия стабилизируются, о чем будет свидетельствовать прекращение изменения измеряемых значений $\tau_{ик}^1$ и $\tau_{ик}^2$ сигналов с выходов приемных ПЭП.

После достижения момента времени, когда $P = P^*$ и зависимости $\tau_{\text{ИК}}^{1,2} = f(P)$ прекращают изменяться, фиксируют измеренный с помощью КА коэффициент ρ взаимной корреляции на ближайшем к контуру выработки участке.

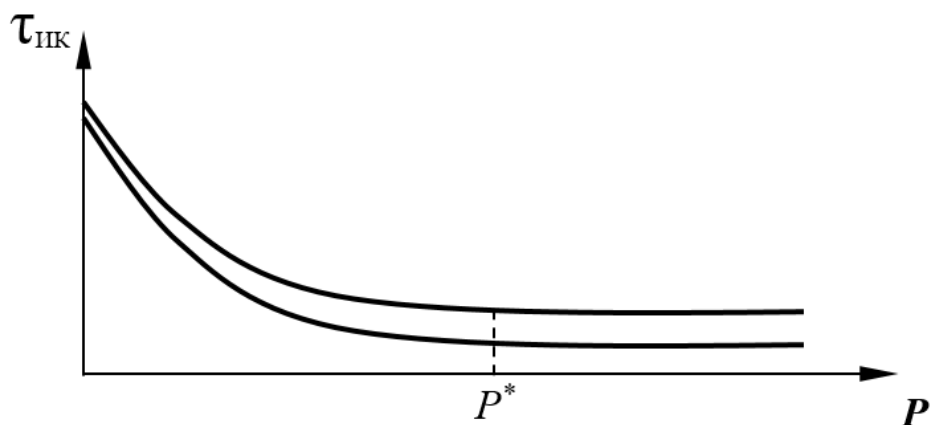


Рисунок 4.18 – Зависимости интервалов корреляции принятых каждым из приёмных ПЭП УЗ сигналов от величин давления P прижима этих ПЭП к стенке скважины

Далее, снижают давление в прижимных пневмосистемах до нуля и с помощью штанг (на рис.4.17 условно не показаны) синхронно перемещают скважинные зонды вглубь массива с шагом Δl , например, на 15см. При этом на каждом шаге l_i проводят все упомянутые выше операции и получают значения $\rho_i = f(l_i)$. По их совокупности строят график $\rho = f(l)$, характерный вид которого представлен на рис. 4.19.

На этом графике выделяют глубину l_3 , начиная с которой $\rho_{zp} \approx const$, и эту глубину принимают за нижнюю границу первичных естественных напряжений.

Глубины l_1 и l_3 (см. рис. 4.19), в пределах которых $\rho > \rho_{zp}$ принимают соответственно за нижнюю и верхнюю границы зоны опорного давления. Максимальное значение напряжений в этой зоне находится на глубине l_2 , на которой имеет место максимум ρ_{max} графика $\rho = f(l)$.

Глубины от 0 до l_1 , для которых $0 < \rho < \rho_{\text{гр}}$, принимают за границы зоны разгрузки напряжений.

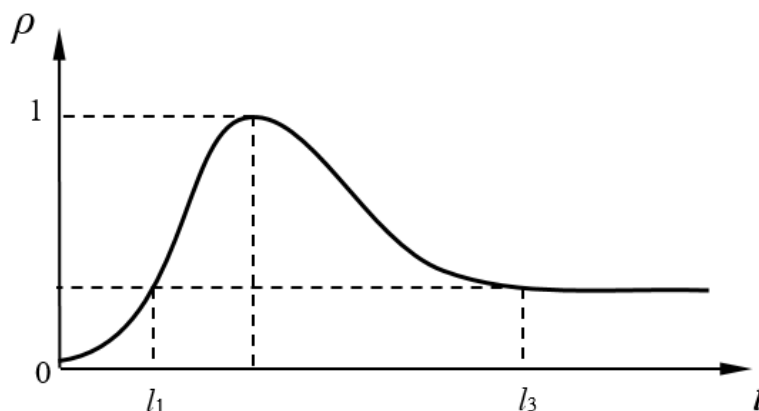


Рисунок 4.19 – Характерная зависимость коэффициента взаимной корреляции принятых УЗ сигналов от расстояния до контура выработки

4.3 Натурные испытания ультразвукового корреляционного метода структурной диагностики приконтурного массива и оценки пространственного распределения напряжений в нём

4.3.1 Структурная диагностика пород кровли горной выработки

Апробация разработанного ультразвукового корреляционного метода геоконтроля в натурных условиях применительно к решению задачи изучения строения кровли выработки осуществлялась на шахте «Первомайская» АО «Угольная компания «Северный Кузбасс» [142].

На рисунке 4.20 приведен геологический разрез вдоль вентиляционного штрека №412, в кровле которого проводились как традиционные времяимпульсные, так и шумовые корреляционные УЗ измерения. Последние осуществлялись в вертикальной скважине диаметром 52 мм глубиной 5,5 м. Для этого использовался скважинный зонд, имеющий следующие основные характеристики: общая длина – 400 мм; диаметр – 46 мм; база между излучающим и приемными ПЭП – 150 мм; резонансная частота ПЭП – 90 кГц; полоса частот

ПЭП – $80 \div 100$ кГц, соответственно его добротность $Q = 4,5$. Схема расположения зонда в скважине представлена на рис. 4.21.

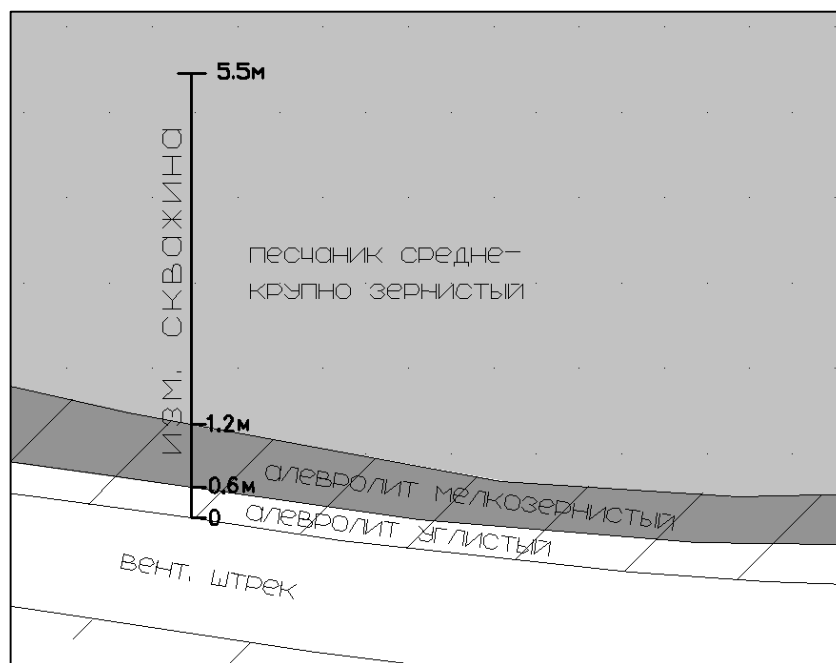


Рисунок 4.20 – Геологический разрез вдоль вентиляционного штреха №412 в районе проведения испытаний и схема расположения измерительной скважины

Перемещение зонда вглубь приконтурного массива осуществлялось с шагом $\Delta h = 75$ мм с помощью наращиваемых досылочных штанг, а обеспечение контактных условий ПЭП со стенками скважины в точках контроля h_i – с помощью прижимной пневмосистемы.

При проведении УЗ контроля излучающий ПЭП подключался с помощью коаксиального кабеля к выходу электрического генератора шума.

Приемные ПЭП подключались к двухканальному измерительному комплексу. Последний обеспечивал усиление и оцифровку принятых шумовых сигналов y_1 и y_2 , а также программное вычисление их коэффициента взаимной корреляции в соответствии с формулой (2.8).

Перемещение зонда вглубь приконтурного массива осуществлялось с шагом $\Delta h = 75$ мм с помощью наращиваемых досылочных штанг, а обеспечение контактных условий ПЭП со стенками скважины в точках контроля h_i – с помощью их прижимных пневмосистем.

Традиционные импульсные УЗ измерения с использованием скорости распространения продольных упругих волн C_p в качестве информативного параметра осуществлялись в тех же точках, что и шумовой корреляционный каротаж, с применением описанного выше измерительного зонда и УЗ прибора УД2Н-ПМ. Однако при этом излучение УЗ сигнала осуществлялось не средним, а крайним ПЭП 3, а прием сигналов – двумя другими ПЭП. По времени прохождения импульсного УЗ сигнала между приёмными ПЭП и известному расстоянию между ними рассчитывалась искомое значение C_p .

По результатам измерений в 66-и точках, расположенных по глубине скважины, были получены два массива значений информативных параметров $\rho_{y1/y2}$ и C_p . Построенные по этим массивам каротажные кривые $\rho_{y1/y2} = f(h)$ и $C_p = f(h)$ представлены на рисунке 4.22.

Анализ представленных на рис. 4.22 зависимостей свидетельствует о том, что изменение $\rho_{y1/y2}$ на границах литологических слоев существенно больше, чем C_p . Так при переходе от «ложной» к непосредственной кровле из алевролита среднее значение $\bar{\rho}$ возрастает от 0,35 до 0,79, то есть на 125%. При этом среднее значение \bar{C}_p возрастает от 3036 м/с до 3211 м/с, то есть всего примерно на 6%.

При переходе от непосредственной кровли к основной значения $\bar{\rho}$ и \bar{C}_p изменяются на 26,6% и $\approx 2\%$ соответственно.

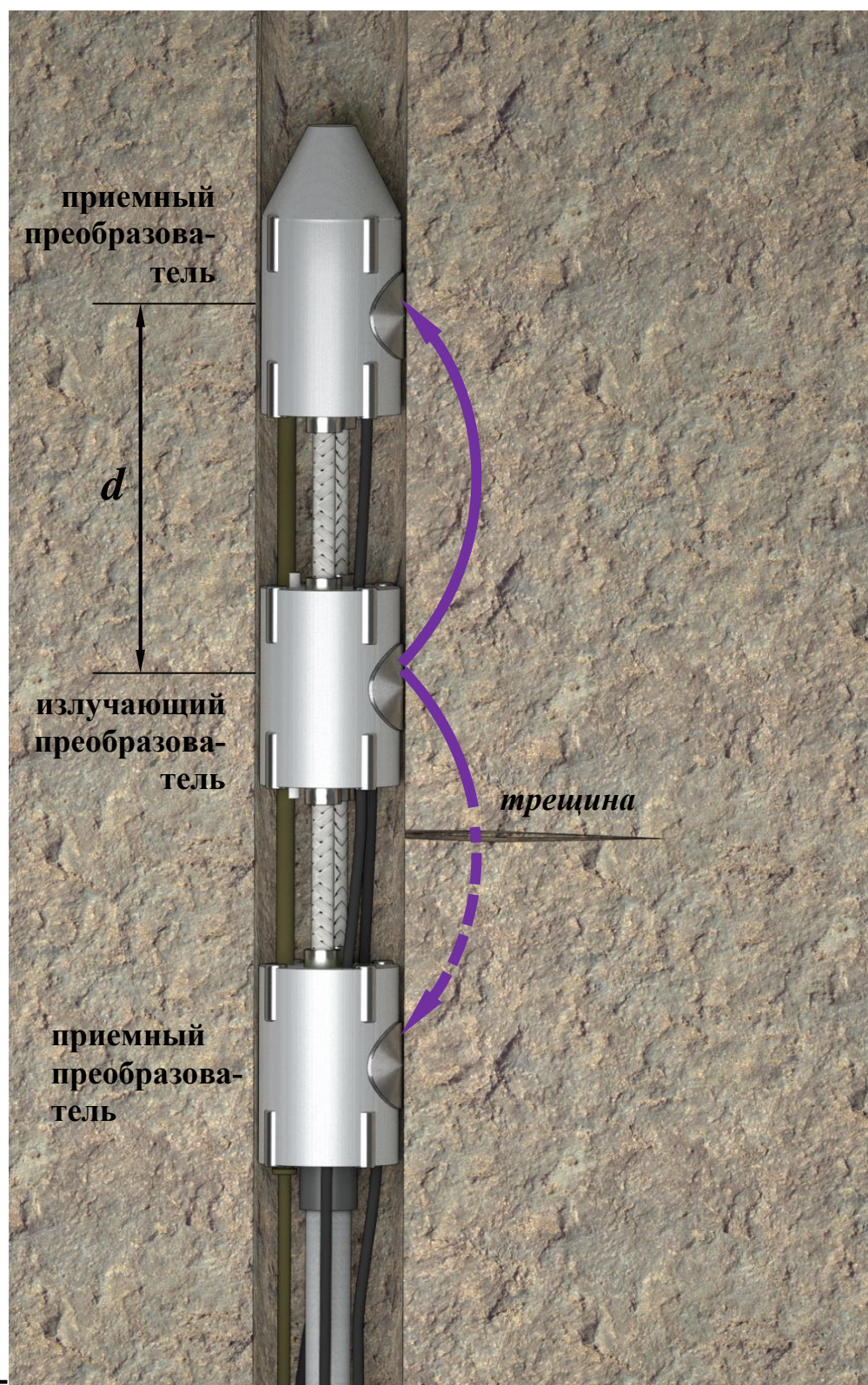


Рисунок 4.21 – Схема расположения УЗ каротажного зонда в скважине

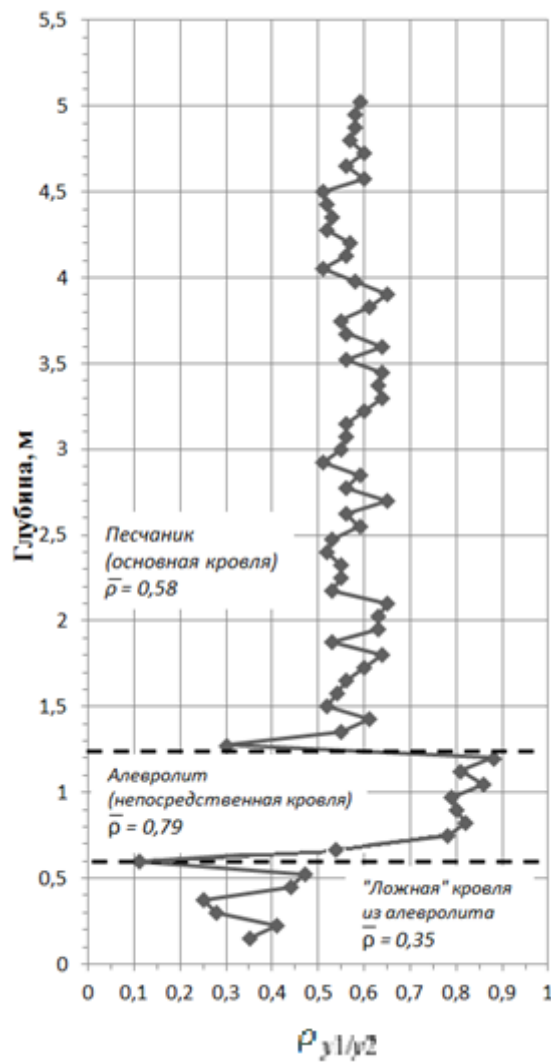
Приведенные данные свидетельствуют о том, что применение информативного параметра C_P при изучении геологического строения кровли с помощью традиционного УЗ импульсного каротажа мало эффективно. В частности, относительное изменение указанного параметра на границе основной и непосредственной кровли соизмеримо с погрешностью современных импульсных УЗ приборов. Это вполне объяснимо, если учесть, что алевролит и песчаник имеют достаточно близкие упругие и плотностные свойства.

Скачкообразное изменение величины $\bar{\rho}$ имеет место и на границе непосредственной и «ложной» кровли, но уже в силу не различия типа слагающих их пород, а степени их поврежденности.

Разброс величины $\bar{\rho}$ в пределах одного слоя обусловлен естественной неоднородностью пород и различием в контактных условиях каждого из приемных ПЭП. Причем важно отметить, что указанные различия принципиально могут быть минимизированы за счет алгоритма регулирования усилий прижима ПЭП к стенкам скважины, физическое обоснование которого приведено в пп. 4.2.1 настоящей работы.

Очевидно, что для уменьшения влияния естественной неоднородности пород и различия в контактных условиях каждого из приемных ПЭП на представленные зависимости, последние целесообразно подвергать процедуре сглаживания.

а.



б.

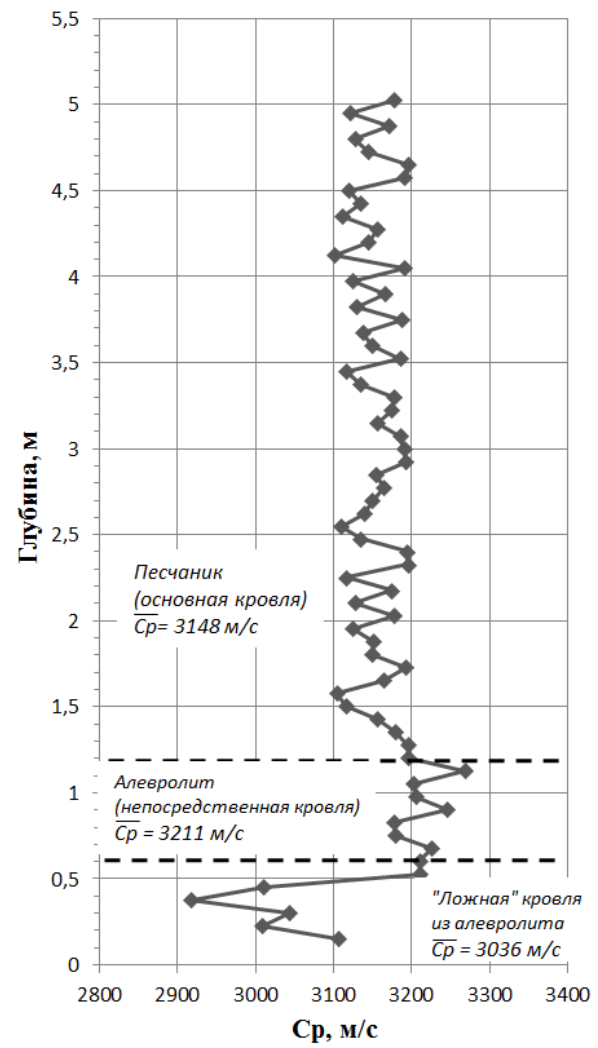


Рисунок 4.22 – Зависимость коэффициента взаимной корреляции $\rho_{y1/y2}$ принятых сигналов (а) и скорости продольной волны C_p (б) от глубины скважины в кровле горной выработки

4.3.2 Применение ультразвуковых межскважинных корреляционных измерений для изучения пространственного распределения напряжений в окрестностях горной выработки.

Приведенные выше в пп. 3.3 результаты лабораторных исследований, а также обоснованный в пп.4.21 способ геоконтроля свидетельствуют, о потенциальной возможности использования УЗ корреляционных измерений для оценки пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве.

Экспериментальная проверка указанной возможности в натурных условиях осуществлялась на Новомосковском гипсовом руднике [132], в одном из целиков которого были пробурены на глубину 3 м два параллельных шпура диаметром 42 мм на расстоянии 0,7 м друг от друга. УЗ прозвучивание массива осуществлялось с использованием скважинных ПЭП, имеющих резонансную частоту 90 кГц и полосу частот $\Delta f \approx 20$ кГц, которые синхронно перемещались вглубь массива с шагом 0,1 м.

Сначала были проведены традиционные УЗ измерения скорости распространения продольных упругих волн C_p в функции от расстояния l до поверхности целика. Затем были проведены измерения с использованием шумового зондирующего сигнала и его последующей взаимной корреляционной обработки. При этом фактически реализовывалась схема измерений, аналогичная представленной на рис. 4.17, а в качестве информативных параметров контроля использовались коэффициент взаимной корреляции ρ принятых УЗ сигналов и интервал корреляции $\tau_{ик}$.

Отметим, что перед измерением величины ρ в каждой точке контроля обеспечивалась минимизация влияния контактных условий приёмных акустических преобразователей со стенками скважины в соответствии с алгоритмом, описание которого приведено в пп. 4.21.

На рисунке 4.23 представлены графики изменения C_p , ρ и $1/\tau_{ик}$ в функции от глубины l измерений.

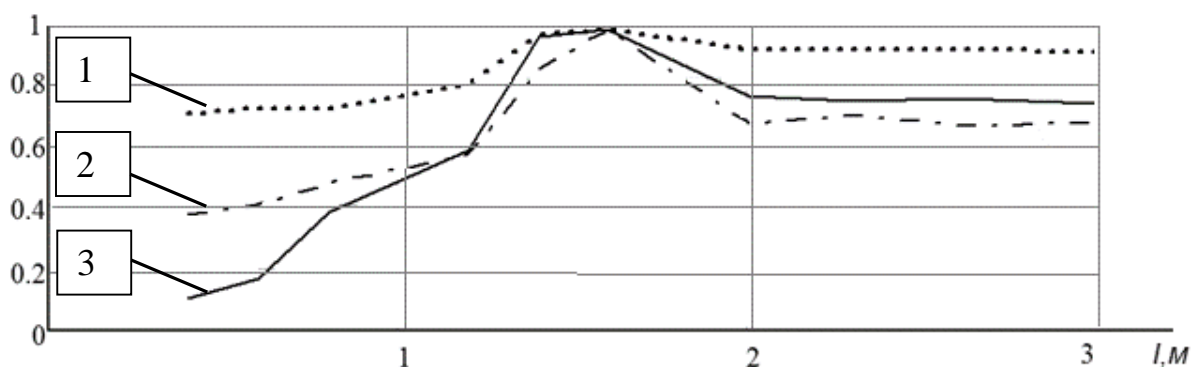


Рисунок 4.22 – Относительное изменение информативных параметров УЗ контроля в функции от глубины l измерений в целике: 1 - C_p ; 2 - ρ ; 3 - $1/\tau_{ик}$.

Анализ этих графиков свидетельствует о том, что установление максимума зоны опорного давления, который находится на глубине $l \sim 1,7$ м, возможно с использованием любого из указанных информативных параметров. В тоже время надежность такого установления выше на основе корреляционных информативных параметров, степень различия которых в зонах разгрузки, естественных напряжений и опорного давления существенно больше, чем традиционно используемой скорости распространения продольных упругих волн. Так, на глубинах 2 м и 1 м C_p уменьшается по сравнению с максимумом на 6,8 % и 21% соответственно. Уменьшение на этих же глубинах величин ρ ; и величины $1/\tau_{ик}$ примерно одинаково и составляет примерно 25% и 50%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований влияния структурных неоднородностей и механического нагружения горных пород на корреляционные характеристики распространяющихся в них ультразвуковых шумовых сигналов, решена актуальная научная задача обоснования и разработки скважинного ультразвукового корреляционного метода диагностики состояния массива в окрестностях горных выработок, что имеет важное значение для обеспечения эффективности и безопасности горных работ при подземной разработке полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Показано, что недостатки традиционных ультразвуковых скважинных методов диагностики состояния массива в окрестностях выработок, обусловлены использованием импульсных акустических сигналов в качестве зондирующих и скорости их распространения в горных породах в качестве информативного параметра контроля.
2. Проанализированы теоретические предпосылки ультразвуковой диагностики состояния приконтурного массива на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки после прохождения исследуемой области геосреды.
3. На основе компьютерного и физического моделирования установлены закономерности влияния структурных неоднородностей геосреды и её напряжённо-деформированного состояния на корреляционные характеристики шумового непрерывного стационарного сигнала.

4. Обоснованы наиболее эффективные схемы, а также информативные параметры скважинных ультразвуковых корреляционных измерений в приконтурном массиве. Проведена оценка чувствительности этих параметров по отношению к дефектам структуры и изменению напряжённого состояния горных пород.

5. Предложено качественное объяснение установленной ранее экспериментально возможности прозвучивания УЗ шумовыми сигналами более значительных баз геоматериала, чем импульсными,

6. Обоснованы принципы аппаратного обеспечения ультразвукового корреляционного метода геоконтроля, с учётом которых реализован аппаратно-программный комплекс такого обеспечения.

7. Обоснованы способы ультразвукового корреляционного каротажа и межскважинного прозвучивания приконтурного массива, обеспечивающие минимизацию помехового влияния на результаты диагностики его состояния различий в базах контроля и контактных условиях преобразователей с геосредой в двух акустических измерительных каналах.

8. Проведены натурные испытания скважинного ультразвукового корреляционного метода геоконтроля в шахтных условиях, подтвердившие его высокую эффективность при оценке структурной неоднородности и пространственного распределения напряжений в приконтурном массиве.

9. В рамках диссертационной работы разработана «Методика структурной диагностики массива в окрестностях горных выработок на основе ультразвуковых каротажных измерений с использованием шумовых сигналов и их корреляционной обработки», которая передана для практического использования ряду научных институтов, занимающихся проблемами геоконтроля.

Список использованной литературы

1. Турчанинов Н. А. Основы механики горных пород / Н. А. Турчанинов, М.С. Иофис, Э.В. Каспарян. – Л.: Недра, 1989. - 488с.
2. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых / В.Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1986. – 272 с.
3. Дрибан В.А. Устойчивость горных выработок в структурно-неоднородных массивах / В.А. Дрибан // ГИАБ. - 2008. - №9. - С. 305 – 312.
4. Курленя М.В. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок / М.В. Курленя, В.Д. Барышников, Л.Н. Гахова // ФТПРПИ. – 2012. - №4. - С. 20 – 29.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. - 384 с.
6. Вознесенский А.С. Обоснование контроля устойчивости целиков и кровли на рудниках с помощью информационного критерия / А.С. Вознесенский, Г.В. Захарченко // ФТПРПИ. – 2001. - №2. - С. 28 -36.
7. Романов В.В. Обзор геофизических методов, применяемых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок / В.В. Романов, А.И. Посернин, А.Н. Дронов, К.С. Мальский // ГИАБ. - 2016. - №1. - С. 243 – 248.
8. Андреев В.П. Геоакустический метод выявления поверхности ослабленного акустического контакта / В.П. Андреев, А.Г. Гликман // Уголь. – 1985. - №12. - С. 19-22.
9. Бауков Ю.Н. Физические основы резонансного метода контроля расслоений кровли горных выработок / Ю.Н. Бауков, В.Н. Данилов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. - №1. - С. 12-16.
10. Молев М.Д. Геофизическое прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угольных пластов / М.Д. Молев. – Новочеркасск: Изд. ЮРГТУ, 2000. - 138с.

11. Загорский Л.С. Разработка бесскважинного сейсмического метода оценки напряженного состояния краевой части тонких пологих пластов угля: автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. / 05.15.11 - ИГД им. А.А. Скочинского. - М., 1987. - 14 с.
12. Вознесенский А.С. Определение мощности защитного целика в кровле выработок гипсового рудника георадами / А.С. Вознесенский, В.В. Набатов, Н.П. Пончуков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. - №2. - С. 10-14.
13. Вознесенский А.С. Оценка устойчивости массивов пород вокруг выработок по результатам контроля электромагнитного излучения в приконтурной области / А.С. Вознесенский, В.Л. Шкуратник, В.В. Набатов, Я.О. Куткин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. - №10. - С. 94-102.
14. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / Г.Е. Яковицкая. - Новосибирск: Параллель, 2008. - 315 с.
15. Яворович Л.В. Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород : Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. / 25.00.20 - ТПУ, Томск, 2005. - 19 с.
16. Простов С.М. Геоэлектрический контроль массива горных пород / С.М. Простов. - Кемерово: КузГТУ, 2007. – 160 с.
17. Комплексные инженерно-геологические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / ред. А.И. Савич, Б.Д. Куюнджич. – М.: Недра, 1990. – 462 с.
18. Кауфман А.А. Принципы методов наземной и скважинной Электроразведки / А.А. Кауфман, Б.И. Андерсон; пер. с англ. Д.А. Алексеева. - Тверь: Изд. «АИС», 2013 - 488 с.

19. Молев М.Д. Прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угля на основе комплексных геофизических исследований: автореферат дис. на соиск. уч. ст. д.т.н. / 25.00.16 - МГГУ. – М., 2001. - 41 с.
20. Шкуратник В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. - М.: МГГУ, 2012. – 113 с.
21. Ямщиков В.С. Принципы оптимизации акустической локации неоднородностей в массиве / В.С. Ямщиков, В.Н. Данилов, В.Л. Шкуратник // Изв. вузов. горный журнал. – 1984. – №5. - С. 4-7.
22. Данилов В.Н. Интроскопия трещиноватого массива методом акустической локации / В.Н. Данилов // Изв. вузов. горный журнал. – 1987. – №1. - С. 1-4.
23. Ямщиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
24. Хмелевской В.К. Геофизика / В.К. Хмелевской. - М.: КДУ, 2009. – 320 с.
25. Хмелевской В.К. Основы геофизических методов / В.К. Хмелевской, В.И. Костицин. – Пермь: Изд-во Пермского университета, 2010. – 400 с.
26. Шейнин В.И. Оценка изменений напряженного состояния грунтов и горных пород по изменению интенсивности потока инфракрасного излучения с их поверхности / В.И. Шейнин, Э.А. Мотовилов, А.К. Филиппова // ФТПРПИ. – 1994. - №3. - С. 14-22.
27. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы / В.Л. Шкуратник. – М.: Изд-во МГИ, 1990. - 103 с.
28. Геофизические исследования скважин / ред. В.М. Запорожец. – М.: Недра, 1983. -591 с.
29. Итенберг С.С. Геофизические исследования в скважинах / С.С. Итенберг, Т.Д. Дахкильговю – М.: Недра, 1982. – 438 с.
30. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / А.И. Савич, Б.Д. Куюнджич, В.И. Коптев и др.; ред. А.И. Савич, Б.Д. Куюнджич. – М.: Недра, 1990. – 462 с.

31. Горбачёв Ю.И. Геофизические исследования скважин / Ю.И. Горбачёв. – М.: Недра, 1990. – 398 с.
32. Шкуратник В.Л. Телевизионный мониторинг скважин на рудниках Кольского полуострова / В.Л. Шкуратник, В.В. Тимофеев, А.А. Ермолин, В.В. Рыбин, К.Н. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №2. – С. 76-84
33. Лавров А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород: обзор / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник // Акустический журнал. – 2005. – Т.51, Приложение. – С. 6-18
34. Вознесенский А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния геосреды по совместным измерениям акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, Д.В. Тамарин, В.В. Набатов // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т.1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 358-361.
35. Вознесенский А.С. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии / А.С. Вознесенский, В.Л. Шкуратник, В.В. Набатов, Я.О. Куткин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №8. – С. 64-70.
36. Лавров А.В. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник, Ю.Л. Филимонов. – М.: Изд. МГГУ, 2004. – 456 с.
37. Шкуратник В.Л. Теоретическая модель электромагнитного эмиссионного эффекта памяти горных пород / В.Л. Шкуратник, А.В. Лавров // ПМТФ. – 1996. – №5. – С. 165 -169.
38. Ямщиков В.С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, К.Г. Лыков // ФТПРПИ. – 1990. – №2. – С. 23-28.
39. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. 1979. – 400 с.

40. Шкуратник В.Л. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко // ФТПРПИ. - 2013. - №4. - с. 32-39
41. Дагаев В.Ю. Обоснование и разработка каротажного электроемкостного метода оценки структуры углепородного массива в окрестностях горных выработок: автореферат дис. на соискание уч. ст. к.т.н. / 25.00.16 - МГГУ. – М.: 2007. - 24 с.
42. Шкуратник В.Л. Электроемкостная структурная диагностика кровли выработок в углепородном массиве / В.Л. Шкуратник, В.Ю. Дагаев // Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли. Труды научной конференции. 6 - 10 июля 2009г. - Новосибирск: ИГД СО РАН. - 2010г. - С.38-44.
43. Светов Б.С. Основы геоэлектрики / Б.С. Светов. - М.: ЛКИ, 2008. - 356 с.
44. Ямщиков В.С. Введение в геоакустику / В.С. Ямщиков. - М.: МГИ, 1968. – 275 с.
45. Савич А.И. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород / А.И. Савич, В.И. Коптев, В.Н. Никитин, З.Г. Ященко. - М.: Недра, 1969. – 239 с.
46. Лифшиц И.М. К теории распространения ультразвуковых волн в поликристаллах / И.М. Лифшиц, Г.Д. Пархомовский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1950. Т.27. - №6. - С. 1386 – 1391
47. Меркулов Л.Г. Применение ультразвука для исследования структуры сталей / Л.Г. Меркулов // Журнал технической физики. Т.20. - 1957. - №2. - С. 175 – 182.
48. Ямщиков В.С. Контроль качества на предприятиях нерудных строительных материалов / В.С. Ямщиков, М.Л. Нисневич. – Л.: Стройиздат, 1981. – 251с.
49. Шкуратник В.Л. Теоретические предпосылки количественной оценки размеров минерального зерна ультразвуковым методом / В.Л. Шкуратник, Н.Д. Ноздрина // ФТПРПИ. - 1998. - №6. - с. 104-111.

50. Колодина И.В. Обоснование и разработка ультразвуковых способов оценки нарушенности природного камня под влиянием факторов выветривания: автореферат. дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. / 25.00.16 - МГГУ. - М., 2006. - 22 с.
51. Азиев Д.А. Разработка ультразвукового метода контроля структурной поврежденности облицовочного мрамора под влиянием экстремальных термических воздействий: автореферат дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. / 05.15.11 - МГГУ. - М. 1998. - 24 с.
52. Ржевский В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1978. – 389 с.
53. Ржевский В.В. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков. - М.: Наука. 1973. – 224 с.
54. Mackenzie J.K. The elastic constants of a solid containing spherical holes / J.K. Mackenzie // Proc. Phys. Soc. - Vol. 63. – 1950. - №2. - pp. 92-101.
55. Wyllie M.R. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media / M.R. Wyllie // Geophysics. - Vol. 23. – 1958. - №3. - pp. 36-42.
56. Geertsma J. Some aspects of elastic wave propagation in fluid-saturated porous / J. Geertsma, D.S. Smit // Geophysics. - Vol. 26. – 1961. - №2. - pp. 84-92.
57. Емелин В.И. Опыт применения ультразвукового метода для определения динамических упругих параметров горных пород в полевых условиях / В.И. Емелин, К.С. Чупров // Изв. АН СССР, Серия геофизическая. – 1962. - №4. - С.68 – 75.
58. Ржевский В.В. Ультразвуковой контроль и исследования в горном деле / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1968. - 120с.
59. Савич А.И. Применение геофизических методов для изучения свойств и состояния массивов горных пород / А.И. Савич, В.И. Коптев, В.Д. Михалов // сб. «Труды Всесоюзного проектно-изыскательского и научно-исследовательского института «Гидропроект»». – М., 1981. - №76. - с. 91-98.

60. Ватолин Е.С. Некоторые динамические свойства и природа деформирования горных пород / Е.С. Ватолин. – М.: Наука, 1966. – 120 с.
61. Ямщиков В.С. К обоснованию акустического метода изучения некоторых реологических характеристик горных пород / В.С. Ямщиков, Э.А. Лыкова // Изв. вузов. Горный журнал, 1966. - №2. – С. 23-27.
62. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / ред. Н.В. Мельников и В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1975. – 276 с.
63. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах / ред. М.П. Воларович. – М.: Недра, 1978. – 229 с.
64. Гуманюк М.Н. Ультразвук в горной автоматике / М.Н. Гуманюк. – Киев: Техника, 1970. - 192с.
65. Казанцев В.Ф. Измерение твердости ультразвуковыми методами / В.Ф. Казанцев, Л.О. Макаров, В.С. Марголин // сб. «Труды 4-ой научной конференции по информационной акустике». – М., 1978. - С. 118 – 126.
66. Петухов И.М. Горные удары и борьба с ними на шахтах Кизеловского бассейна / И.М. Петухов, В.А. Литвин, Л.В. Кучерский и др. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1969. - 112с.
67. Медведев И.И. Газовыделения на калийных рудниках / И.И. Медведев, Г.Д. Полянина. - М.: Недра, 1974. - 163с.
68. Ямщиков В.С. О количественной оценке микротрещиноватости горных пород ультразвуковым велосиметрическим методом / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, А.В. Бобров // ФТПРПИ. – 1985. - №4. – С. 110-114.
69. Мамбетов Ш.А. Геоакустический контроль состояния массива горных пород вблизи горных выработок / Ш.А. Мамбетов – Фрунзе: Илим, 1978. – 172с.
70. Глушко В.Т. Геофизический контроль в угольных шахтах / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. - Киев: «Наукова думка», 1978. 224 с.

71. Николенко П.В. Физические основы ультразвуковых методов геоконтроля / П.В. Николенко, Е.Л. Коссович, В.Л. Шкуратник. – М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 88 с.
72. Блок А.В. Разработка технологических основ геоакустического контроля состояния массива вблизи горных выработок: дис. на соиск. уч.ст. к.т.н. / МГИ – М. 1974. 165с.
73. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
74. Шкуратник В.Л. Аппаратурное обеспечение ультразвуковых методов геоконтроля / В.Л. Шкуратник // Горный журнал. – 1999. - №1. - С.27 – 30.
75. Шкуратник В.Л. Контактные условия пьезопреобразователей с массивом как помеховый фактор при реализации ультразвуковых методов геоконтроля / В.Л. Шкуратник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. - №8. - С. 33-36.
76. Бочкарева Т.Н. Разработка ультразвукового многочастотного метода и средств контроля состояния приконтурного массива в окрестности выработок: автореферат дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. /05.15.11 - МГГУ. – М. 1997. - 20 с.
77. Негурица В.П. Исследование и разработка многопараметрового ультразвукового метода и аппаратуры контроля состояния горных пород вблизи выработок: дис. на соиск. уч. степени к.т.н. / 05.15.11.- МГИ.- М. 1970, 184 с.
78. Сирота Д.Н. Разработка ультразвуковых способов и средств геоконтроля в условиях помех на горных предприятиях: дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. – МГИ. – М. 1987, 199 с.
79. Зубков, В.А. Дефектоскопия блоков природного камня / В.А. Зубков, Г.Н. Троицкий, В.Л. Шкуратник, В.С. Ямщиков // Строительные материалы. -1975. - №5. - С. 25-27.
80. Hughes D.S. Second-Order Elastik Delormation of Solids / D.S. Hughes, G.S. Kelli. – Phys. Rev. – 1953. - 92. - №3. - P. 1145 – 1149.

81. Бобренко В.М. Ультразвуковые методы и устройства для контроля механических напряжений / В.М. Бобренко // Дефектоскопия. – 1992. - №3. - С. 8-14.
82. Данилов В.Н. Зависимость между акустическими характеристиками и напряжениями в массиве горных пород / В.Н. Данилов, В.Л. Шкуратник, Д.Н. Сирота // Известия вузов. Горный журнал. - 1988. - №2. - С. 1-6.
83. Shea V.R. Elastic wave velocity and attenuation as used to define phases of loading and failure in coal / V.R. Shea, D.R. Hanson // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1988. - Vol.25. - Iss.6. - P. 431 – 437.
84. Шкуратник В.Л. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, А.Е. Кошелев // ФТПРПИ. – 2016. - №5. - С. 48-53.
85. Турчанинов И.А. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве / И.А. Турчанинов, В.И. Панин. - Л.: Наука, 1976. – 163 с.
86. Шкуратник В.Л. Исследование влияния напряжений на скорость упругих волн в окрестностях эллиптической горной выработки / В.Л. Шкуратник, Г.В. Данилов // ФТПРПИ. - №3. - С. 3-10.
87. Данилов В.Н. Особенности измерения скорости распространения упругих волн в массиве горных пород / В.Н. Данилов, В.Л. Шкуратник, Д.Н. Сирота // Горный журнал. Известия вузов. - 1987. - №4. - С. 1-4.
88. Шкуратник В.Л. Некоторые вопросы аппаратного обеспечения ультразвукового контроля проявлений горного давления / В.Л. Шкуратник // Всесоюзная научно-техническая конференция «Исследование, прогноз и контроль проявлений горного давления». - Л.: ЛГИ, 1982.
89. Ямщиков В.С. Об одном способе перестройки частотной характеристики приёмного электроакустического тракта / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, В.Н. Данилов, А.А. Ермолин, А.С. Малышкин // Дефектоскопия. 1985. - №1. - С. 39-44.

90. Шкуратник В.Л. Аппаратурное обеспечение ультразвуковых методов геоконтроля / В.Л. Шкуратник // Горный журнал. - 1999. - №1. - С. 27-30.
91. Шкуратник В.Л. О принципах обеспечения помехозащищённости ультразвуковых приборов геоконтроля / В.Л. Шкуратник // Сб. статей «15 лет РАЕН». - М.: «Интермет инжиниринг», 2005. - С. 380-390.
92. Шкуратник В.Л. Оптимизация методики ультразвуковых время-импульсных измерений при контроле напряжений в приконтурной области массива / В.Л. Шкуратник // Труды конференции Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли. 3-6 октября 2011 г. – Новосибирск. - Т.1. - С. 73 – 77.
93. Рубан А.Д. Геоконтроль как элемент горных технологий и особенности его реализации в условиях помех / А.Д. Рубан, В.Л. Шкуратник // Горный журнал. - 2009. - №12. - С. 14-17.
94. Пасси Г.С. Сравнение способов оценки акустического контакта / Г.С. Пасси // Дефектоскопия. – 1988. - №4. - С.71 -79.
95. Шкуратник В.Л. Об использовании локационного режима при ультразвуковом контроле напряжённо деформированного состояния массива горных пород / В.Л. Шкуратник, В.Н. Данилов // ФТПРПИ. – 1990. - №3. - С. 37-40.
96. Ермолин А.А. Многочастотный ультразвуковой прибор для целей геоконтроля / А.А. Ермолин, Т.Н. Бочкарёва // Проблемы геоакустики: методы и средства. - Сб. трудов V сессии Российского акустического общества. - М.: Изд. МГГУ, 1996. - С. 129 -132.
97. А. с. № 1613607. Способ контроля напряжённого состояния массива горных пород / В.Л. Шкуратник // Бюл. изобрет. 1990. - № 46.
98. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич. - М.: Физматгиз, 1963. - 230 с.
99. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / Ж. Макс; перевод с французского. - М.: Мир, 1983. - Т.1. - 307 с.; Т.2. - 253 с.

100. Анциферов И.И. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений / И.И. Анциферов, Н.Г. Анциферова, Я.Я. Каган. - М.: Наука, 1971. – 136 с.
101. Knill I.L. A study of acoustic emission from stressed rock / I.L. Knill, I.A. Franklin, A.W. Malone // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. – 1968. - v.5. - P. 87 – 121.
102. Королёва Т.Ю. Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли / Т.Ю. Королёва, Т.Б. Яновская, С.С. Патрушева // Физика Земли. 2009. - №5. - С.16 – 25.
103. Zagorskii L.S. Method of Determining the Vertikal Seismik Profile of a rock Massif Using Rayleigh-Type Waves / L.S. Zagorskii, V.L. Shkuratnik // Acoustical Physics. – 2013. - V.59. - №2. - P. 197-206.
104. Рукавицин В.Н. Спектрально корреляционный анализ волнового поля в процессе бурения скважин / В.Н. Рукавицин, А.М. Жуков // Разведочная геофизика. – 1980. - № 90. - С.91-98.
105. Архипов А.Г. Акустический метод исследования геологического разреза в процессе бурения / А.Г. Архипов, Б.Б. Шатров // сб. «Методика и техника разведки» СПб.: ВИТР, 1993. - №5 (143). - С.91 -98.
106. Вепринцев В.И. Определение трещиноватости массива горных пород с помощью шумовых акустических сигналов / В.И. Вепринцев // Технология добычи угля подземным способом. - М.: ЦНИИЭИуголь, 1975. - №6. - С. 32-34.
107. Вепринцев В.И. Акустическая диагностика свойств и трещиноватости массива с помощью шумовых сигналов от рабочих органов машин на карьерах природного камня.- Дис. на соиск. уч. степени к.т.н.- М.:МГИ, 1975, 175 с.
108. Шкуратник В.Л. Дефектоскопия массива горных пород с использованием нестационарных шумовых источников / В.Л. Шкуратник // Технология добычи угля подземным способом. - М.: ЦНИИЭИуголь, 1977. - №3. - С.18-21.
109. Ямщиков В.С. Исследование источников шумовых акустических сигналов для геоконтроля / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, Носов В.Н., Успенская А.Б. // Известия вузов. Геология и разведка. 1980 - №2. - С. 96 -101.

110. Ямщиков, В.С. К обоснованию ультразвукового корреляционного метода дефектоскопии крупноструктурных материалов / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов // Дефектоскопия. – 1972. - №3. - С.39-44.
111. Ямщиков В.С. Выбор информативных параметров при статистических методах дефектоскопии крупноструктурных материалов / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов // Дефектоскопия. – 1974. - №4. – С. 24-29.
112. Ямщиков В.С. Аппаратура для ультразвуковой корреляционной дефектоскопии крупноструктурных материалов / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов // Дефектоскопия. -1975. - №1. - С.79 – 87.
113. Шкуратник В.Л. Об эффективности пьезопреобразователей ультразвуковых приборов геоконтроля / В.Л. Шкуратник, В.Н. Носов // сб. «Интенсификация и контроль горного производства физико-химическими методами. - М.: МГИ, 1986. - С. 164 – 168.
114. Ямщиков В.С., Экспериментальное исследование струйного генератора шумовых упругих волн применительно к контролю крупноструктурных материалов / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов, В.Л. Шкуратник, И.А. Кузьмич, Г.И. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1974. - №5. - С. 71 - 74.
115. Зубков В.А. Дефектоскопия блоков для изготовления облицовочных изделий / В.А. Зубков, Г.Н. Троицкий, В.Н. Носов, В.Л. Шкуратник // Сб. «Промышленность строительных материалов Москвы». – 1973. - №2. - С. 24 – 26.
116. Ямщиков В.С. Эксплуатационный геоконтроль на предприятиях нерудных материалов / В.С. Ямщиков // Строительные материалы. – 1974. - С.21 – 26.
117. Ямщиков В.С. Дефектоскопия блоков природного камня / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов, В.Л. Шкуратник // Строительные материалы. – 1975. - №5. - С. 25 – 27.
118. Ямщиков В.С. Формирование корреляционной диаграммы направленности и её вращение при ультразвуковой дефектоскопии крупноструктурных материалов / В.С. Ямщиков, В.Н. Носов, В.Л. Шкуратник // Дефектоскопия. – 1974. - №5. - С. 45 – 52.

119. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1974. – 403 с.
120. Колесов В.И. Корреляционная функция псевдослучайного сигнала при зондировании неоднородных сред / В.И. Колесов // Дефектоскопия. - 1981. - №2. - С.74 – 77.
121. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные процессы / С.М. Рытов. - М.: Наука, 1978. – 463 с.
122. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1984. - 271 с.
123. Шкуратник В.Л., О принципах ультразвуковой структурной диагностики приконтурного массива с использованием шумовых зондирующих сигналов / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. А.А. Кормнов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2015. - №1. – С. 53 – 62.
124. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации / В.В. Ольшевский. – Л.: Судостроение, 1983. – 280 с.
125. Кажис Р.-Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы / В.В. Кажис. – Вильнюс.: Изд-во «Мокслас», 1986. – 215 с.
126. Радиотехнические системы: учебник для вузов / Ю.М. Казаринов и др. – под ред. Казаринова Ю.М. – М.: Академия, 2008. – 592 с.
127. Королёв М.В Широкополосные ультразвуковые преобразователи / М.В. Королёв, А.Е. Карпельсон. - М.: Машиностроение, 1982. 157 с.
128. Miletenko I. V. Modeling induced dislocation in host rocks around excavations / Miletenko I. V., Miletenko N. A., Odintsev, V. N. // Journal of Mining Science. - 2013.- Vol. 49, Issue 6.- P.18-25.
129. Coggan J., Gao F., Stead D., and Elmo D. Numerical modelling of the effects of weak immediate roof lithology on coal mine roadway stability, International Journal of Coal Geology. - 2012. - Vol. 90. - P.38 - 49.

130. Шкуратник В.Л. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок / В.Л. Шкуратник., П.В. Николенко, А.А. Кормнов // ФТПРПИ. – 2015. - №3. - С.41-47.
131. Шкуратник В.Л. Оценка чувствительности метода ультразвукового корреляционного каротажа при выявлении трещин в кровле горных выработок / В.Л. Шкуратник., П.В. Николенко, А.А. Кормнов // Горный журнал, 2016, №1. С.54-57.
132. Шкуратник В.Л. Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного механического нагружения / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, А.А. Кормнов. // Горный журнал, 2016, №6. С.60-63.
133. Shkuratnik V.L Influence of the mechanical loading of rock salt on the parameters of thermoacoustic emission / V.L. Shkuratnik, E.A. Novikov. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2015. Vol. 56, №3. pp. 486-493
134. Morcot A. Dinamik elastic properties of coal / Morcot A., Mavko G., Prasad M. // Geophysics. – 2010. – Vol.75. Iss.6. pp. 227 – 234.
135. Кормнов А.А. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей с массивом при реализации ультразвукового корреляционного метода контроля / А.А. Кормнов, П.В. Николенко, В.Л. Шкуратник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2016. СВ №1. – С.43 – 52.
136. Вознесенский А.С. Электроника и измерительная техника / А.С. Вознесенский, В.Л. Шкуратник.– М.: Горная книга. - 2008, 476 с.
137. Николенко П.В., Цариков А.Ю. Лабораторный стенд для механических и акустико-эмиссионных испытаний образцов композиционных материалов / П.В. Николенко П.В., А.Ю. Цариков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. -№ 4. С. 273-278.
138. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., Kormnov A.A. Sharakteristics instrumental support of structural heterogenetty control around mining using noise probing signals

/ V.L. Shkuratnik, P.V. Nikolenko, A.A. Kormnov.- Report of the XXIII international scientific symposium «Miner s week – 2015». - Сб. научн. тр. // Издательский дом «МИСиС», - М.: 2015. С. 60 – 65.

139. Вознесенский А.С. Средства передачи и обработки измерительной информации / А.С. Вознесенский // М.: МГГУ. – 1999. - 268 С.

140. Патент 2579820 РФ. Способ акустического каротажа / П.В. Николенко, А.А. Кормнов, В.Л. Шкуратник. - Бюл. изобр. №10. -2016.

141. Патент 2618778 РФ Способ контроля напряжённого состояния массива горных пород в окрестности выработки. / П.В. Николенко, А.А. Кормнов, В.Л. Шкуратник. - Бюл. изобр. №14. -2017.

142. Кормнов А.А. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа / А.А. Кормнов, П.В. Николенко // ГИАБ. – 2016. - №8. – С. 265 – 271.