МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Николенко Петр Владимирович

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

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

Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Научный консультант:

Доктор технических наук

Шкуратник Владимир Лазаревич Доктор физико-математических наук Винников Владимир Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной горнодобывающей индустрии и строительстве безопасность и эффективность играют решающую роль. Одним из ключевых аспектов обеспечения безопасности и эффективности является получение надежной и оперативной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива горных пород вблизи горных выработок. Особенно это актуально на фоне тенденции к увеличению глубинны ведения горных работ и усложнения горно-геологических условий. При этом инструментальные методы контроля НДС массива должны отвечать не только требованиям надежности и точности, но и быть пригодными для массового использования. Одним из перспективных направлений современной горной геофизики можно считать совершенствование акустических (в частности, ультразвуковых) методов контроля горного давления, направленное как на увеличение чувствительности и точности методов ультразвукового прозвучивания, так и на создание новых подходов к контролю параметров НДС на основе акустико-эмиссионных эффектов в специально синтезированных искусственных материалах, размещаемых в качестве чувствительных элементов в измерительных скважинах.

В связи с этим представляется актуальным изучение проявления различных акустических эффектов в горных породах и композиционных материалах в ультразвуковом диапазоне частот и создание на этой основе новых методов контроля напряженно-деформированного состояния породного массива, а также методического и аппаратурного обеспечения их реализации.

Настоящая работа выполнялась в рамках ряда научных проектов, среди которых гранты Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31201 «Закономерности акустикоэмиссионных эффектов в композитах с естественной и наведенной дефектностью и их использование для контроля напряжений в массиве горных пород», №19-05-00152 «Закономерности влияния напряжений на температурные зависимости скорости распространения ультразвука в горных породах», №18-05-70002 «Изучение влияния криогенного выветривания на качество углей при их добыче, транспортировке и хранении в условиях Крайнего Севера», а также Российского научного фонда № 16-17-00029 «Диагностика состояния и прогноз катастрофических событий в углепородном массиве при ведении горных работ на основе натурных наблюдений, лабораторных экспериментов, геомеханического моделирования и ретроспективного анализа», No 17-77-10009 «Разработка метода контроля критических изменений напряженнодеформированного состояния горных выработок и тоннелей на основе акустических эффектов в композитах с целью предотвращения возникновения катастроф техногенного характера», № 21-77-00046 «Разработка метода контроля строения и состояния приконтурного массива горных пород на основе совместных акустических и оптических измерений в скважинах для предотвращения катастроф техногенного характера при подземной добыче полезных ископаемых».

Цель работы состоит в установлении влияния условий нагружения образцов, изготовленных из природных и искусственных материалов, на параметры активных и пассивных акустических сигналов ультразвукового диапазона частот и разработке на этой основе методов диагностики напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок.

Идея работы заключается в использовании акустических эффектов, проявляющихся в ультразвуковом диапазоне частот в ряде композиционных материалов и горных пород, для качественной и количественной оценки параметров напряженно-деформированного состояния породного массива.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что для определения направления действия главного напряжения в окрестностях горных выработок, а также для мониторинга динамики смещения зоны опорного давления возможно использовать закономерности изменения акустико-эмиссионной тензочувствительности и характера проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти анизотропных композиционных материалов, являющихся чувствительными элементами системы измерений НДС, от угла между их слоями и направлением приложения механической нагрузки, причем наибольшая тензочувствительность, а также наилучшее проявление эффекта памяти наблюдается при угле 45°.

2. Отчетливо проявляющийся в условиях трехосного осесимметричного нагружения акустико-эмиссионный эффект памяти чувствительных элементов системы измерений НДС, синтезированных на основе эпоксидной смолы и дисперсно-распределенных углеродных волокон длиной 3 мм в соотношении 1/1000 по массе, позволяет осуществлять мониторинг изменения девиаторов напряжений приконтурного массива.

3. Отчетливо проявляющийся в условиях циклического растягивающего нагружения акустико-эмиссионный эффект памяти в чувствительных элементах системы измерений НДС, синтезированных на основе эпоксидной смолы и дисперсных углеродных волокон или алюминиевой пудры с размером частиц 60 мкм, позволяет определять величину растягивающих напряжений пород кровли горных выработок.

4. Для повышения надежности контроля НДС массива необходимо применять дополнительную полосовую фильтрацию сигналов, полученных от чувствительных элементов системы измерений, изготовленных из синтезированных на основе эпоксидной смолы и дисперснораспределенных углеродных волокон композиционных материалов, для которых впервые установлено устойчивое проявление акустико-эмиссионного эффекта памяти не только в виде скачка активности акустической эмиссии, но и в виде резкого изменения спектрального состава зарегистрированных импульсов.

5. Разработан новый алгоритм корреляционной фильтрации акустико-эмиссионных сигналов, полученных от композиционных чувствительных элементов системы контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, позволяющий минимизировать помеховое влияние акустических шумов и надежно выявлять момент проявления акустикоэмиссионного эффекта памяти при соотношении сигнал/шум, равном 1:1.

6. Установлено, что в горных породах, содержащих сомкнутые трещины, для контроля малых приращений напряжений, изменение которых растянуто во времени, наиболее эффективным является метод обработки сигналов «coda wave interferometry» (CWI).

7. При реализации скважинных ультразвуковых измерений для повышения надежности контроля параметров НДС приконтурного массива следует использовать явление повышения приращений скоростей продольных и поперечных волн в ультразвуковом диапазоне частот при увеличении механического давления за счет локального нагрева участка породы до температур 70 - 100°С.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается достаточным объемом экспериментальных исследований проявления акустических эффектов в ультразвуковом диапазоне частот на образцах горных пород и композиционных материалов, выполненных в лабораторных условиях; удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных результатов; применением современных вычислительных методов; использованием при проведении лабораторных исследований технических средств с высокими метрологическими характеристиками.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе:

- анализ и обобщение существующих методов контроля напряженно-деформированного состояния породного массива, основанных, в частности, на применении ультразвукового прозвучивания и акустико-эмиссионных эффектов памяти (АЭЭП);

- экспериментальные исследования закономерностей проявления АЭЭП в композиционных материалах и горных породах;

- экспериментальные исследования влияния напряженно-деформированного состояния пород на параметры активных ультразвуковых сигналов;

- компьютерное моделирование отдельных технологических параметров контроля напряжений на основе акустических эффектов в горных породах и искусственных материалах;

- аналитические исследования интерпретации акустико-эмиссионных данных, получаемых в результате контроля с использованием АЭЭП.

Научная новизна работы заключается в:

- установлении закономерностей формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в анизотропных композиционных материалах;

 установлении влияния параметров напряженно-деформированного состояния на формирование и проявление акустико-эмиссионной «памяти» в композиционных материалах в условиях всестороннего неравнокомпонентного нагружения;

- установлении закономерностей проявления акустико-эмиссионных эффектов при растяжении дисперсно-наполненных композитов;

- установлении закономерностей изменения спектрального состава сигналов при формировании и проявлении акустико-эмиссионного эффекта памяти в композитах, синтезированных на основе эпоксидной смолы и углеродных волокон;

 обосновании нового метода фильтрации результатов акустико-эмиссионных измерений, основанного на корреляционной обработке сигналов, значительно повышающего надежность контроля;

- установлении влияния магистральных трещин на изменение скоростей многократно отражённых волн в образцах пород, находящихся в условиях одноосного нагружения, с использованием алгоритмов обработки сигналов, основанных на принципах интерферометрии;

- разработке принципов лабораторного определения зависимостей скоростей продольных и поперечных волн от изменяющихся температуры и давления;

- установлении влияния температуры на кинематические и спектральные параметры ультразвуковых сигналов в процессе одноосного нагружения образцов горных пород.

Практическая значимость и реализация результатов. В рамках диссертации разработаны «Методические рекомендации по мониторингу динамики изменения напряженнодеформированного состояния приконтурного массива с использованием ультразвуковой интерферометрии», использованные ИБРАЭ РАН при разработке проектной документации «Разведка участка захоронения радиоактивных отходов (Енисейский участок Нижне-Канского массива)», получившей положительное заключение ФГКУ «Росгеолэкспертиза» № 154-02-06/2023 от 31.07.2023, а также «Методические рекомендации по контролю параметров напряженнодеформированного состояния приконтурного массива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах», принятые к использованию на Таштагольской и Шерегешской шахтах АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также Сибирским филиалом АО «ВНИМИ».

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на следующих Всероссийских и Международных конференциях: VII Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (ИГД ДВО РАН, 2018); Неделе Горняка (НИТУ «МИСиС» 2015-2023 годы); Х Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (КНЦ РАН, г. Аппатиты, 2016); Интерэкспо Гео-Сибирь (СГУГиТ, Новосибирск, 2016, 2017 и 2018 годы); ISRM AfriRock - Rock Mechanics for Africa 2017; E3S Web of Conferences (2018); Всероссийской научно-технической конференции «Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ» (ГИ КНЦ РАН, Апатиты, Санкт-Петербург, 2013); 15 международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (ИПКОН РАН, Москва, 2021); XI всероссийской школе-семинаре с международным участием «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (ГИ УрО РАН, г. Пермь, 2019); XVI всероссийской молодежной научно-практическая конференции «Проблемы недропользования» (ИГД УРО РАН, ГИ КНЦ РАН, ИГД ДВО РАН, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 37 научных работ, в том числе 29 – в журналах, рекомендуемых ВАК по специальности защищаемой диссертации, 24 - в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus, и 3 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 386 источников и 3 приложений, содержит 111 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется современное состояние проблемы инструментального контроля параметров НДС массива в окрестностях горных выработок, а также вопросов контроля устойчивости выработок с учетом натурных геомеханических и геофизических измерений. В нашей стране отмечена роль в развитии этих методов таких учёных, как Аксенов В.К., Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Борщ-Компаниец В.И., Вознесенский А.С., Влох Н.П., Гужова С.В., Грицко Г.И, Катков Г.А., Курленя М.В, Лавров А.В., Леонтьев А.В., Морозов К.В., Козырев А.А., Опарин В.Н., Панин В.И., Панов С.И., Токсаров В.Н., Турчанинов И.А., Шемякин Е.И., Шкуратник В.Л., Юшкин В.Ф., Ямщиков В.С. и др. Большой вклад также внесен зарубежными учеными, в том числе Amadei B., Hardy H.R.Jr., Hast N., Holcomb D., Kaiser J., Kanagawa T., Leeman E., Mogi K. и др. Показано, что используемые на сегодняшний день методы определения параметров НДС массива вблизи выработок характеризуются высокой стоимостью, трудоемкостью, а также относительно высокими погрешностями определения абсолютных значений напряжений. Реализация большинства рассмотренных методов направлена на получение максимально полной информации о тензоре действующих в массиве напряжений. При этом для решения ряда горнотехнологических задач, связанных, в первую очередь, с обеспечением безопасности и контролем устойчивости, необходимость в сложном и дорогостоящем определении всех компонент НДС отсутствует. Зачастую для обеспечения необходимого уровня безопасности ведения горных работ достаточно определять или наблюдать за изменением одного-двух

важных параметров, таких, как координата максимума опорного давления, значение максимального действующего напряжения в конструктивном элементе или его приращение в результате ведения горных работ.

Наибольшим потенциалом для решения такого рода задач обладают скважинные акустические методы с использованием активных и пассивных ультразвуковых сигналов. Указанные методы характеризуются физически обоснованной связью между параметрами упругих колебаний и напряженным состоянием пород, а также значительным накопленным опытом их применения. При этом показано, что активные ультразвуковые методы в классическом исполнении теряют свою эффективность при контроле малых по амплитуде и протяженных во времени изменений параметров НДС в приконтурном массиве. Потенциально расширить возможности методов возможно с использованием специфических схем измерений и обработки сигналов, а также за счет внешней интенсификации с применением полей другой физической природы (в т.ч. наложением температурного поля на изначальные поля напряженно-деформированного состояния и исходную поврежденность). Развитие пассивных УЗ методов на данный момент принципиально ограничено значительным разбросом свойств пород, в которых изучается проявление так называемого акустико-эмиссионного эффекта памяти. Преодоление указанного недостатка возможно путем замены образцов горных пород на упругие элементы, изготовленные из искусственных материалов с заранее заложенными акустическими свойствами. В качестве подобных материалов могут выступать слоистые и дисперсно-наполненные композиционные материалы, для которых потребуется провести всестороннее изучение условий формирования и проявления акустико-эмиссионной «памяти».

На основе анализа материалов первой главы были сформулированы приведённая выше цель и следующие задачи диссертационного исследования:

- 1. Создание специализированного лабораторного оборудования для исследования влияния напряженно-деформированного состояния композитов и модельных материалов на параметры активных и пассивных ультразвуковых сигналов.
- 2. Экспериментальное исследование проявлений акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах, подвергаемых различным режимам механического нагружения.
- 3. Разработка способов и алгоритмов помехозащиты методов контроля НДС массива на основе проявлений акустико-эмиссионных эффектов.
- Экспериментальное исследование влияния различных схем механического нагружения на параметры активных ультразвуковых сигналов в горных породах, композитах и модельных материалах.
- Экспериментальное исследование влияния термобарического нагружения образцов горных пород на динамические и кинематические информативные параметры ультразвуковых зондирующих сигналов.
- 6. Обоснование и разработка аппаратурного и методического обеспечения способов контроля напряженно-деформированного состояния приконтурной области массива горных пород на основе активных и пассивных ультразвуковых измерений.

Вторая глава посвящена комплексному экспериментальному исследованию проявлений акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах, подвергаемых различным режимам механического нагружения, и разработке на их основе способов контроля параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных пород.

Одним из перспективных направлений геофизического контроля параметров НДС массива можно считать недавно получившие развитие методы контроля на основе акустикоэмиссионных (АЭ) эффектов в горных породах. Базовым подходом к оценке НДС на основе анализа акустической эмиссии можно считать использование открытого в 50-х годах Й. Кайзером акустико-эмиссионного эффекта памяти. Суть эффекта сводится к невоспроизводимости параметров акустической эмиссии в процессе нагружения при напряжениях, меньших максимально достигнутого ранее значения напряжения. В целом, методы, основанные на АЭЭП, сводятся либо к изучению АЭ эффектов при нагружении отобранных образцов горных пород в лабораторных условиях, либо регистрации и анализу параметров акустической эмиссии при локальном нагружении околоскважиного пространства.

Такие достоинства указанных методов, как широкий круг решаемых задач контроля НДС, относительная простота реализации, потенциальная точность получаемых оценок и ряд других, сегодня уже не вызывают сомнений. В то же время, имеющаяся практика их использования свидетельствует о том, что результаты определения параметров напряжений на основе анализа акустико-эмиссионных методов критичны к естественной для горных пород неоднородности различной физической природы, что неизбежно приводит к потере точности и надежности соответствующего контроля.

Указанный недостаток может быть преодолен, если использовать для целей геоконтроля акустико-эмиссионные эффекты не в самих горных породах, а в помещаемых в исследуемую область массива композиционных материалах, которые при этом становятся своеобразными первичными преобразователями напряжений. При этом на первый план выходит необходимость всестороннего изучения условий формирования и проявления АЭЭП в указанных материалах.

Одной из особенностей большинства используемых в промышленности композиционных материалов является их анизотропная структура, обусловленная как технологическими процессами их изготовления, так и требованиями к их механическим свойствам. Структурная анизотропия, очевидно, оказывает существенное влияние на анизотропию акустических свойств таких материалов. Для установления влияния структурных особенностей анизотропных композитов исследовались образцы промышленного гетинакса (марка V), текстолита (марка ПТК) и стеклотекстолита (марка СТЭФ).

Образцы кубической формы подвергались двухцикловому одноосному нагружению до уровня 20 МПа (в первом цикле) и 30 МПа (во втором цикле). Для разных серий образцов нагружение проводилось под углами $\theta = 0^\circ$, 45° и 90° к направлению слоев композитов. Одновременно с нагружением велась регистрация комплекса акустико-эмиссионных параметров.

В рамках первого цикла нагружения в образцах формировался АЭЭП при максимальных установочных напряжениях σ_{ycr} . Наряду с этим оценивалась так называемая акустико-эмиссионная тензочувствительность $S_{AЭ}$ – влияние продольной относительной деформации на уровень активности акустической эмиссии в образце. Численно значение АЭ-тензочувствительности можно определить из выражения

$$S_{\rm A\Im} = \frac{\Delta N_{\Sigma}}{\Delta \varepsilon},\tag{1}$$

где $\Delta \dot{N}_{\Sigma}$ – приращение активности АЭ на участке нагружения; $\Delta \varepsilon$ – приращение относительных деформаций на участке нагружения. На рис. 1 представлены примеры зависимостей $\dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$, полученные для образцов текстолита при различных значениях θ .



Рис. 1. Пример зависимостей $\Delta N_{\Sigma}(\varepsilon)$, характеризующих акустико-эмиссионную тензочувствительность текстолита, при направлении одноосного нагружения, составляющем с направлением слоев угол $\theta = 0^{\circ}(a), \theta = 45^{\circ}(\delta)$ и $\theta = 90^{\circ}(\varepsilon)$

По результатам первого цикла нагружения был установлен различный характер изменения S_{A3} при различных значениях θ . Существенные различия в значениях S_{A3} продиктованы различными механизмами разрушения межслоевых связей в анизотропных композитах. Так, при совпадении направления слоистости и осевого давления деламинация (процесс разделения композита на отдельные слои вдоль армирования) происходит под действием растягивающих горизонтальных напряжений. В этом случае усредненные значения S_{A3} для стеклотекстолита составили 1959 соб./с, для текстолита – 2148 соб./с, для гетинакса – 2341 соб./с. Более высокие значения S_{A3} наблюдаются при $\theta = 45^{\circ}$ ($S_{A3} = 2741$ соб./с, 2654 соб./с и 3049 соб./с для текстолита, стеклотекстолита и гетинакса соответственно). В этом случае преобладают сдвиговые деформации вдоль слоистости. В случае горизонтального расположения слоев S_{A3} принимает отрицательные значения ($S_{A3} = -1415$ соб./с, -1027 соб./с и -427 соб./с для текстолита, стеклотекстолита и гетинакса соответственно). Такая закономерность связана с тем, что на начальных уровнях нагружения происходит закрытие существующих пор и трещин. Дальнейшее нагружение не приводит к значительному росту дефектов из-за высокой поперечной прочности материала, обусловленной горизонтальным расположением армирующих слоев композита.

Результаты повторного нагружения образцов указывают на существенные различия в характере проявления АЭЭП для разных значений θ . На рис. 2 представлены примеры зависимостей $\Delta \dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$ во втором цикле нагружения при $\theta = 0^{\circ}$, 45° и 90°.



Рис. 2. Пример зависимостей $\Delta \dot{N}_{\Sigma}(\sigma)$ для стеклотекстолита во втором цикле одноосного нагружения при $\theta = 0^{\circ}$ (а), 45° (б) и 90° (в)

Отчетливое проявление эффекта памяти наблюдается только для $\theta = 45^{\circ}$. Очевидно, что отсутствие АЭЭП при горизонтальном расположении слоев связано с недостаточным образованием дефектов на стадии формирования эффекта памяти в первом цикле нагружения. Отсутствие явного проявления АЭЭП в случае вертикального расположения слоев связано с тем, что при таком нагружении происходит процесс активного трещинообразования, связанного с низкой прочностью межслоевого сцепления в композите. Во втором цикле нагружения при $\theta = 90^{\circ}$ момент проявления эффекта памяти оказывается "зашумленным" акустической эмиссией, вызванной продолжающимся разрушением межслоевых связей в композите.

Опыт применения АЭЭП для оценки сложного НДС указывает на то, что уровень напряжений в первом (установочном) цикле нагружения σ_1^I и уровень напряжений, при котором проявлялся АЭЭП σ_{1*}^{II} , практически никогда не совпадают. Такая особенность, в частности, проявляется при нагружении образцов горных пород в установочном цикле по схеме Кармана $(\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3)$, а в тестовом — при одноосном нагружении). Установлено, что величина σ_{1*}^{II} оказывается в той или иной степени близкой к девиатору напряжений первого цикла $D^{I} = \sigma_{1}^{I} \sigma_{2,3}^{l}$, а различие σ_{1*}^{ll} и D^{l} меньше в тех породах, у которых меньше угол внутреннего трения. В общем случае при осесимметричном нагружении значение σ_{1*}^{II} будет определяться соотношением $\sigma_{1*}^{II} = \sigma_1^I - \sigma_2^I - k\sigma_2^I$ (k — безразмерный коэффициент, индивидуальный для каждой горной породы и зависящий от коэффициента трения между берегами трещин). Процедура определения коэффициента k трудоемка и требует изготовления и испытания серии образцов в условиях осесимметричного неравнокомпонентного сжатия. Кроме того, даже для одного типа пород значение k может изменяться в широких пределах. Например, для гранита Куру k = 2.8, а для гранита Уэстерли k = 3.4. Разброс значений коэффициента k для каменных солей лежит в интервале 0.40-0.75. Сведение k к нулю позволило бы значительно снизить трудоемкость применения метода АЭЭП для оценки НДС массива, но только за счет потери точности такой оценки, поскольку в реальных горных породах всегда выполняется условие k > 0. С другой стороны, можно предположить, что в искусственно синтезированных материалах за счет контроля над их свойствами в процессе изготовления окажется возможным снизить k ниже определенного порога, после которого подобным коэффициентом можно будет пренебречь.

Для подтверждения сформулированной выше гипотезы были проведены лабораторные исследования трех типов синтезированных композиционных материалов. Матрицей для всех

образцов выступала эпоксидная смола. В качестве наполнителя использовались: алюминиевая пудра, имеющая размер частиц ≈ 60 мкм и весовое соотношение с матрицей, равное 1/500 (серия образцов «А»); дисперсно-распределенные нити углеволокна, имеющие длину 3 мм, толщину 15 мкм и весовое соотношение с матрицей 1/1000 (серия образцов «В»); листы углеткани, расположенные параллельно оси цилиндров (серия образцов «С»).

Все образцы исследовались на установке всестороннего сжатия УДС 65/80 по схеме Кармана. Образцы подвергались двухцикловому нагружению, при этом в первом цикле нагружение проводилось по схеме Кармана, включающей первичное обжатие образца гидростатическим давлением ($\sigma_1^I = \sigma_2^I = \sigma_3^I$), а затем увеличение осевого давления до определенного уровня. Тем самым в образце формировалась разница (девиатор) напряжений $D^I = \sigma_1^I - \sigma_{2,3}^I$. Во втором цикле образец нагружался в условиях одноосного сжатия до уровня $\sigma_1^{II} > D^I$. Образцы всех серий подвергались установочным нагружениям при $\sigma_{2,3}^I = 2$, 4, 10 МПа и $\sigma_1^I = 5$, 8, 20 МПа соответственно. По результатам испытаний для всех образцов рассчитаны усредненные коэффициенты k: композиты серии А — k = 0.06; композиты серии В — k = 0.03; композиты серии С k = 0.1.

На рис. З представлена зависимость относительной погрешности $\Delta \Im \Pi$ воспроизведения эмиссионной памяти от различных значений девиатора напряжений D^I . Погрешность рассчитана по формуле $\Delta \Im \Pi = [(D^I - \sigma_{1*}^{II})/D^I] \cdot 100\%$, (σ_{1*}^{II} — осевое давление во втором цикле, при котором проявляется АЭЭП).



Рис. 3. Зависимость относительной погрешности воспроизведения эмиссионной памяти ∆ЭП от девиатора напряжений *D*^I при различных значениях коэффициента *k* (штриховой линией отмечен уровень погрешности 5 %)

При значениях $D^{I} > 3 - 10$ МПа для всех композитов уровень погрешности не превышает 5%, что позволяет пренебречь коэффициентом *k* для определения напряжений in-situ. С другой стороны, очевидно, что для горных пород влияние коэффициента *k* необходимо учитывать при любых значениях D^{I} .

Более детально различие механизмов проявления АЭЭП в исследованных композитах и некоторых горных породах можно продемонстрировать с применением модернизированного

AF-RA анализа. AF-RA анализ широко используется для изучения механизма образования AЭ событий. Изучение средней частоты импульсов (AF) и скорости их нарастания (RA) позволяет условно разделять источники AЭ на трещины растяжения и сдвига. Модернизация алгоритма заключается в разработке способа автоматизированного определения длительности AЭ импульсов (необходимого для расчета AF) при низком соотношении сигнал-шум. В дополнение к AF-RA анализу был применен алгоритм ядерной оценки плотности распределения (*kernel density estimation*, KDE). KDE является алгоритмом, позволяющим производить непараметрическую оценку плотности распределения случайной величины. Причем в отличие от построения 2D гистограмм, алгоритм позволяет вычислять функцию распределения случайной величины, не привязанную к субъективному выбору ширины интервалов гистограммы. На рис. 4 и 5 представлены результаты совместного AF-RA и KDE анализа для композитов серий «A», «B», «C» и некоторых горных пород.



Рис. 4. Результаты применения AF-RA и KDE анализа для цилиндрических образцов композитов серий «В», «А» и «С», подвергаемых одноосному механическому нагружению



Рис. 5. Результаты применения AF-RA и KDE анализа для образцов угля пласта "Болдыревский" шахты им. С.М. Кирова и известняка Касимовского месторождения, подвергаемых одноосному механическому нагружению

Из рис. 4 и 5 видно, что функция \hat{f} , полученная в результате применения алгоритма КDE, имеет ярко выраженный несимметричный характер, обусловленный наличием набора точек с высокими значениями RA (режим «сдвиговых» трещин). Оценить степень такой асимметрии возможно с применением коэффициента асимметрии $A_s = \mu_3/\sigma^3$ (μ_3 – третий центральный момент случайной величины, σ – среднеквадратическое отклонение). На рис. 6 представлены результаты расчета коэффициентов A_s вдоль осей AF и RA для всех исследованных композитов и горных пород.



Рис. 6. Значения коэффициента асимметрии A_s , рассчитанные для проекций функций \hat{f} на оси RA и AF для всех исследованных типов материалов и горных пород

Из рис. 6 видно, что горные породы обличаются гораздо большей степенью асимметрии плотности распределения вдоль оси RA из-за значительной части АЭ событий, вызванных сдвиговыми нарушениями, утяжеляющих правый «хвост» указанного распределения. В свою очередь, для композитов характерны относительно небольшие значения A_s(RA), абсолютное

большинство точек скапливается около оси AF, что свидетельствует о доминировании растягивающего механизма трещинообразования. Указанная особенность сказывается на постоянстве и повторяемости акустико-механических свойств образцов, изготовленных из исследованных композиционных материалов, и может являться причиной низких значений коэффициентов k, подробно описанных ранее.

Отдельного рассмотрения требует вопрос изучения параметров формирования и проявления акустико-эмиссионной памяти в условиях растягивающих напряжений. Экспериментальное изучение последних было предпринято при испытании гантелеобразных образцов композитов на «чистый» разрыв. На рис. 7 представлен пример проявления АЭЭП при циклическом растягивающем нагружении образца композита, армированного углеволокном (серия «В»). Регистрация АЭ производилась двумя преобразователями, расположенными на противоположных торцах образца.



Рис. 7. Активность АЭ при циклическом растягивающем нагружении образца, армированного углеродными волокнами

Процесс циклического нагружения образцов сопровождается скачкообразным ростом активности АЭ в момент достижения растягивающей нагрузкой σ уровня максимума предшествующего цикла σ^* , что свидетельствует о достаточно чётком проявлении в обоих композиционных материалах АЭЭП. В то же время, проведённый анализ показал, что качество указанного проявления, которое обычно характеризуется показателем FR (Felicity Ratio), в образцах групп «А» и «В» различно. Этот показатель отражает свойство «сохранности памяти» и представляет собой отношение значения нагрузки, при котором регистрируется всплеск эмиссии, к максимальному уровню нагрузки, испытанному образцом в предшествующем цикле нагружения. Для образцов обеих групп показатель FR возможно рассчитать для нагрузок σ выше 4 МПа (при более низком значении σ АЭЭП не проявляется). Для образцов группы «В» FR = 0.91, а для группы «А» FR колеблется вблизи значения 1.0 вплоть до разрушения образца. Более высокое качество сохранности памяти для образцов группы «А» можно объяснить наличием в матрице волоконных армирующих компонентов, работающих «на разрыв».

Анализ параметров АЭ сигналов, зарегистрированных в момент хрупкого разрушения образца, позволяет оценивать координату разрыва с относительной погрешностью менее 3%. Выделение АЭ сигналов, соответствующих образованию магистральной трещины, возможно на основании не только амплитудных, но и спектральных критериев, т.к. момент разрыва сопровождается АЭ событиями с существенным смещением спектрального максимума в область нижних частот.

На основе выявленных закономерностей был разработан и запатентован ряд способов контроля различных параметров НДС массива. Так для определения ориентации вектора максимального главного напряжения, действующего в окрестностях выработки, предлагается размещать в измерительной скважине диски из слоистых композитов, снабженные акустическими преобразователями. При этом каждый последующий диск ориентируют так, чтобы направление слоев отличалось от предыдущего на определенный угол (15–30°). Количество дисков и угол между направлением слоев в композите в конечном итоге задают угловую разрешающую способность определения направления максимального напряжения. С помощью коммутирующего устройства преобразователи подключаются к портативному устройству регистрации АЭ, размещенному в районе устья скважины. Под действием напряжений в массиве размещенные в скважине диски начинают деформироваться, что приводит к росту активности и скорости счета акустической эмиссии. При этом характер эмиссии будет изменяться в зависимости от расположения диска. Из всех дисков выбирают тот, которому соответствует скорость счета АЭ, характеризующаяся максимальным отрицательным коэффициентом линейной аппроксимации $a_1 = tg\alpha$ (см. рис. 1), и по углу между наклоном слоев в этом диске и горизонталью судят о направлении действия максимального напряжения в целике.

Другой способ предназначен для реализации мониторинга смещения зоны опорного давления. В этом случае ряд композиционных цилиндров размещают и жестко закрепляют в одной скважине на разных глубинах по отношению к устью скважины. По мере увеличения нарушенности пород приконтурного массива под влиянием природных и техногенных факторов (например, выветривания) зона опорного давления будет смещаться вглубь массива. В этом случае максимальная нагрузка будет смещаться от дисков, находящихся вблизи устья к дискам, расположенным в глубине скважины. Пропорционально изменению нагрузки будет изменяться и уровень скорости счета АЭ в дисках, максимальное значение которого будет наблюдаться в диске, находящемся в зоне опорного давления.

Еще один способ контроля основан на описанных выше особенностях проявления АЭЭП в анизотропных композитах и предназначен для мониторинга приращений напряжений вдоль заданного направления. В этом случае композиционные цилиндры, размещаемые в скважине на заданной глубине, выступают в качестве «носителей памяти». При этом формирование АЭ «памяти» происходит в первом (установочном) цикле нагружения, производимом в лабораторных условиях. Таким образом формируется ряд чувствительных композиционных элементов с различными уровнями «запомненных» установочных уровней напряжений. Указанные элементы закрепляются на общем стальном волноводе, к которому прикреплен акустический преобразователь, и размещаются в измерительной скважине. Рост напряжений вдоль заданного направления, вызванный перераспределением напряжений при ведении горных работ или из-за частичного разрушения конструктивных элементов систем разработки, приводит к последовательному проявлению АЭЭП в чувствительных композиционных элементах. Проявление АЭЭП будет наблюдаться в виде резкого всплеска счета АЭ при достижении в массиве напряжений, равных уровню установочных напряжений *n*-ого композиционного элемента. Количество чувствительных элементов и шаг их нагружения определяют разрешающую способность способа.

Результаты экспериментального изучения особенностей формирования и проявления акустико-эмиссионных эффектов в композитах серий «А», «В» и «С» легли в основу разработки способа контроля приращений девиатора напряжений вблизи горных выработок. Суть способа сводится к следующему. Из композиционного материала изготавливается цилиндрический об-

разец, который нагружается по осесимметричной схеме (схеме Кармана). Компоненты нагружения выбираются так, чтобы в образце сформировался девиатор напряжений *D*, значение которого выбирают исходя из поставленной задачи и глубины измерительной скважины. Подготовленный таким образом образец снабжают акустическим преобразователем и размещают в торцевой части шпура, ориентируя ось цилиндра по предполагаемому направлению максимального главного напряжения. В скважине устанавливают пакер и все пространство за ним заполняют эпоксидной смолой. Электрические выводы с преобразователя подключают к входу электронного блока регистрации АЭ. При превышении в массиве девиатором напряжений значений *D*, установленных на этапе лабораторного нагружения, в образце проявится АЭЭП в виде резкого всплеска активности АЭ. При этом будет произведена сигнализация о превышении порога на дисплее электронного блока. Схема реализации метода представлена на рис. 8



Рис. 8. Схема реализации предлагаемого метода контроля критических напряжений: 1 – композитный цилиндр; 2 – преобразователь; 3 – пакер; 4 – эпоксидная смола; 5 – компрессор для нагнетания смолы; 6 – электронный блок регистрации АЭ

Ряд методических аспектов реализации представленного метода уточнялся на основе результатов компьютерного моделирования. Так, было установлено, что с целью минимизации влияния свободной поверхности затвердевшего в скважине эпоксидного цилиндра на напряженно-деформированное состояние чувствительного композиционного элемента необходимо, чтобы указанный цилиндр имел соотношение длины и диаметра не менее 4:1, при этом композитный элемент необходимо располагать ближе к забою скважины.

Также при реализации контроля НДС важным аспектом является выбор конкретного критического уровня девиатора напряжений, свидетельствующего о начале снижения устойчивости конструктивных элементов систем разработки полезных ископаемых. Очевидно, что в значительной мере подобные критические значения зависят от конкретных горногеологических и горнотехнических условий разработки, а их величины должны быть получены на основе геомеханических расчетов или в результате анализа компьютерных моделей. В качестве примера в работе приведен результат оценки значений D в межкамерном (МКЦ) целике СКРУ-3 ОАО «Уралкалий» при удалении забоя от измерительной скважины с установленным в ней композиционным чувствительным элементом в виде цилиндра. На рис. 9 приведена схема модели и результаты расчета значений D.



Рис. 9. Разрез модели (*a*) и значения девиатора напряжений $D(l_{c\kappa})$ (*б*): 1 - L = 3 м; 2 – L = 10 м, 3 – для случая потери устойчивости МКЦ

Из рис. 96 видно, что наибольших значений D достигает на поверхности обнажения выработки (при $l_{ck} = 0$), при этом перемещение забоя увеличивает девиатор напряжений на 50%. Потеря устойчивости МКЦ приводит к значительному увеличению значений D, при этом в массиве возникают напряжения, превышающие предел прочности рассматриваемой горной породы. Таким образом, при величине вертикальной компоненты напряжений $\sigma_z = 8$ МПа и ширине камеры 8 м критические значения D должны быть установлены на уровне ≈ 15 МПа для композиционного цилиндра, установленного на глубине 1 м в измерительной скважине.

На основе выявленных закономерностей формирования и проявления АЭЭП в композитах серии «А» и «В» в условиях растягивающих напряжений были разработаны два способа геоконтроля. Первый из них предназначен для установления факта возникновения в кровле горной выработки растягивающих напряжений критического уровня, т. е. напряжений, близких к пределу прочности породы при растяжении σ_p. Схема реализации способа представлена на рис. 10*a*.



Рис. 10. Схема контроля напряжений (*a*) и хрупких нарушений в кровле (*б*): 1 – кровля; 2 – измерительная скважина; 3 – приемные преобразователи; 4 – полимерное клеевое соединение; 5 – композитный чувствительный элемент; 6 – стальной анкер; 7 – композиционный волновод; 8 – прибор регистрации акустической эмиссии; 9 – пакер

Из выработки бурят вертикальную измерительную скважину, в которой устанавливают анкер. Между стальным стержнем и шайбой анкера жестко закрепляют чувствительный элемент в виде композиционного цилиндра, снабженного пьезоэлектрическим преобразователем, подключаемым к электронному счетчику АЭ-сигналов. Композиционный цилиндр предварительно в лабораторных условиях нагружают в условиях одноосного растяжения до уровня $\sigma_{крит}$, близкого к значению σ_{p} (например, до 0,85 σ_{p}), формируя, таким образом, АЭ-память.

В случае возникновения расслоений в кровле нагрузка на композитный чувствительный элемент возрастет. При превышении этой нагрузкой значения $\sigma_{\text{крит}}$ в указанном элементе возникнет скачок активности акустической эмиссии, который регистрируется электронным блоком. Таким образом, цилиндрический композиционный чувствительный элемент выполняет функцию датчика-сигнализатора превышения критических напряжений.

Второй метод направлен на выявлении хрупких нарушений в кровле (расслоений) и определении их местоположения. Схема его реализации представлена на рис. 10*6*. Из горной выработки бурят скважину, в торце и устье которого закрепляют акустические преобразователи, подключенные к электронному блоку регистрации. Устье скважины перекрывают пакером, в котором через штуцер нагнетают жидкий композит в свободное пространство. После полимеризации последнего в скважине образуется хрупкий акустический волновод, разрывное разрушение которого можно выявить с использованием описанного выше алгоритма.

Важно отметить, что при применении первого метода критически важным является степень сохранности АЭ-памяти, поэтому для его реализации необходимо использовать композиты на основе эпоксидной смолы с наполнителем в виде дисперсных нитей углеволокна. Для второго метода принципиальной является необходимость снижения затухания акустического сигнала в волноводе, поэтому наиболее подходящим материалом для его формирования будет являться композит с наполнителем в виде алюминиевой пудры .

Реализация предлагаемых способов контроля возможна только при достаточном уровне аппаратурного обеспечения. Современные серийно выпускаемые акустико-эмиссионные измерительные комплексы обладают внушительным функционалом (регистрация всех информативных параметров АЭ, запись полных волновых форм АЭ событий, линейная, плоскостная и 3D локаций источников и т.п.). Однако для фиксации момента проявления АЭЭП этот функционал представляется излишним, а стоимость такого оборудования - неоправданно высокой. Для реализации предлагаемых способов контроля напряжений был разработан портативный регистратор АЭ, позволяющий регистрировать скорость счета \dot{N} и производить сигнализацию при превышении этим параметром заранее заданного порогового значения. Внешний вид электронного блока представлены на рис. 11. В основные функции устройства входят настраиваемые пороги регистрации АЭ, регулируемые критические значения \dot{N} для осуществления сигнализации, настройка периода опроса, а также возможность сохранения результатов измерений на SD карту памяти для последующей обработки.



Рис. 11. Внешний вид и внутреннее устройство электронного блока регистрации АЭ

Для размещения цилиндрического композиционного чувствительного элемента в скважине и обеспечения неразрывности его деформаций со стенками скважины используется специально разработанная одноразовая система клеевой фиксации, основные элементы которой имеют исключительно низкую себестоимость из-за применения 3D печати. Устройство системы фиксации иллюстрируется рис. 12.



Рис. 12. Одноразовая система клеевой фиксации в положении «подготовка» (*a*) и в положении «фиксация» (*б*), а также подготовленный к размещению в скважину образец (*в*): 1 – композиционный цилиндр, 2 – пьезокерамический элемент, 3 – плунжер, 4 – стакан, 5 – уплотнительные кольца, 6 – резиновая манжета, 7 – эпоксидный клей

В третьей главе обсуждаются вопросы обеспечения помехозащиты акустикоэмиссионных измерений при проведении контроля параметров НДС массива с использованием АЭЭП в композиционных чувствительных элементах систем измерений.

Использование АЭЭП в композиционных материалах, применяемых в качестве чувствительных элементов систем контроля НДС, подробно описанных во второй главе, тесно связано с необходимостью учитывать весь спектр возможных помеховых факторов. На эффективность контроля НДС описанным выше методом существенное влияние могут оказать такие факторы, как влага, а также акустические помехи природного и техногенного характера, сопровождающие горные работы.

Негативное влияние влаги на качество проявления АЭЭП установлено для серийно выпускаемого текстолита ПТК, обладающего открытой пористостью и способностью к водопоглощению до уровня 3,7% по массе. При этом экспериментально показано, что 90% массовой доли водопоглащения происходит в течение первых 5 минут контакта с водой, а погрешность воспроизведения АЭЭП в этом случае достигает 41%. Полностью устранить помеховое влияние влаги можно применением гидрофобных покрытий или использованием для изготовления чувствительных элементов систем контроля НДС композитов с практически отсутствующей пористостью (стеклотекстолита, композитов на основе эпоксидной смолы и углеродных волокон).

Другим важным помеховым фактором при акустико-эмиссионных измерениях являются шумы техногенной и естественной природы. В этом случае для устранения влияния последних на результаты контроля параметров НДС должны использоваться два подхода. Первый подход предполагает отсечение помех на этапе регистрации АЭ с помощью установки специально спроектированных узкополосных фильтров. Второй подход заключается в апостериорной фильтрации уже зарегистрированных данных на основе применения специального корреляционного алгоритма. Ниже описаны оба предлагаемых подхода.

Дефектообразование в горных породах, подвергаемых различным режимам механического нагружения, характеризуется чрезвычайно разнообразным спектральным составом излучаемых АЭ импульсов, связанным с естественной и наведенной разномасштабной нарушенностью. С другой стороны, при синтезе композитов разномасштабная дефектность как правило отсутствует из-за постоянного состава и равномерного распределения армирующего компонента. Это дает основание предположить, что для подобных материалов проявления АЭ эффектов может характеризоваться не только изменением энергии и активности АЭ импульсов, но их спектрального состава в относительно узкой полосе частот. Такая особенность может быть использована для повышения помехозащищенности методов контроля путем установки на регистрирующую аппаратуру узкополосных фильтров.

На рис. 13 показан пример проявления АЭЭП в образце композита серии «В», испытанного в условиях циклического одноосного сжатия. Из рис. 13*а* видно отчетливое проявление АЭЭП во временной области в виде резких всплесков активности акустической эмиссии при достижение нагрузкой максимума предыдущего цикла.



Рис. 13. Активность АЭ при нагружении образца из первой группы серии «А» (*a*) и пример полученной спектрограммы с наложением зависимости σ(*N*) (*б*)

На представленной спектрограмме можно выделить ряд закономерностей. Во-первых, в диапазоне до 50 кГц наблюдается снижение роли низких частот при увеличении нагрузки (рис. 136). При этом амплитуды низких частот возвращаются к исходным уровням при снятии нагрузки. Подобное изменение может быть связано с закрытием части образовавшихся трещин. В этом случае с изменением размеров дефектов происходит и изменение спектрального состава соответствующих им акустических импульсов.

Одновременно с низкочастотными составляющими значительные изменения наблюдаются и в диапазоне средних частот (130÷150 кГц). В этом диапазоне изменение амплитуд происходит скачкообразно в момент достижения величиной σ уровня максимума предыдущего цикла. Причем наиболее отчетливо такое изменение начинается с IV цикла нагружения. Таким образом, АЭЭП в исследуемом материале проявляется не только в виде скачка активности акустической эмиссии, но и в виде резкого изменения спектральных характеристик АЭ сигналов. Подобное спектральное проявление эффекта памяти обычно не наблюдается при циклическом нагружении образцов горных пород и позволяет значительно повысить надежность выявления АЭЭП путем установки узкополосных фильтров на регистрирующую аппаратуру и последующую спектральную обработку АЭ сигналов . На рис. 14 представлен результат полосовой фильтрации, а также зависимость счета АЭ с учетом примененного фильтра. Из рис. 14 δ видно, что применение полосовых фильтров значительно увеличило соотношение полезный сигнал – шум по сравнению с исходными данными (рис. 13*a*).



Рис. 14. Результат полосовой фильтрации в частотной (а) и временной (б) областях

Другим подходом к повышению помехозащищенности методов контроля НДС массива на основе АЭЭП является апостериорная корреляционная фильтрация зарегистрированных сигналов АЭ в соответствие со специально разработанным алгоритмом. Алгоритм может быть реализован при использовании композиционных чувствительных элементов в качестве датчиков критических уровней напряжений. В этом случае первый (установочный) цикл нагружения таких композиционных элементов производится в лабораторных условиях до заранее заданного порогового значения. В последующем подготовленные таким способом «датчики» размещаются в измерительных скважинах, а по резкому всплеску активности АЭ судят о достижении в массиве заранее заданных пороговых значений компонент НДС.

Цель предлагаемого алгоритма фильтрации – выявить присутствие АЭ событий на фоне стационарного акустического шума и по характеру изменения \dot{N}_{Σ} определить момент проявления АЭЭП в исследуемом образце. Суть алгоритма сводится к следующему.

Из всего набора зарегистрированных в процессе установочного нагружения осциллограмм АЭ событий выбирается одно, которое принимается за эталон x(t). Далее производится последовательное вычисление взаимных корреляционных функций $B(\tau)$ между эталоном и всеми зарегистрированными событиями y_i в соответствии с выражением

$$B(T) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) y_i(t-\tau) dt,$$
(2)

где T – длительность сигнала, τ – лаг вычисления взаимной корреляционной функции.

Абсолютные значения полученной таким образом функции нормируют по максимальному значению и подвергают сглаживанию методом скользящего среднего с окном шириной 0,1 от общей длины зарегистрированного сигнала. Далее производится оценка ширины пика сглаженной функции $B(\tau)$. Выбирается базисная точка $P_{\delta a3}$, соответствующая максимальному значение функции $B(\tau)$, от которой в положительную и отрицательную сторону откладываются равные отрезки +n и -n, формируя тем самым окно расчета величиной 2n. Значения B_1 и B_2 функции взаимной корреляции, вычисляемые в точках $P_{\delta a3}$ -n и $P_{\delta a3}$ +n соответственно, суммируются, образуя параметр S, который характеризует ширину пика $B(\tau)$. Малое значение параметра Sсвидетельствует о быстром спадании функции $B(\tau)$ и, соответственно, о высокой степени корреляции между сигналом-эталоном и текущим рассматриваемым сигналом АЭ. Метод оценки ширины пика взаимной корреляционной функции иллюстрируется рис. 15.



Рис. 15. Графическая иллюстрация оценки ширины пика функции B(τ) (a) и примеры реальных функций B(τ) (δ): 1 – сигнал содержит АЭ событие, 2 – сигнал не содержит АЭ событие

Как показывают результаты анализа проведенных измерений, определённое подобие волновых форм между всеми АЭ сигналами в какой-то мере сохраняется несмотря на сложность процесса образования акустической эмиссии. Когда на определённом лаге τ эталонный сигнал совпадает по фазе с АЭ сигналом подавленным шумом $B(\tau)$ достигает максимума. Однако типичное АЭ событие развивается во времени сложным образом и даже небольшое дальнейшее увеличение или уменьшение τ приводит к резкому спаданию значений $B(\tau)$ (в $B(\tau)$ наблюдается «острый» пик). Сигнал, в котором содержится только шум, не имеет настолько выраженных пиков.

Операция оценки ширины пика функции $B(\tau)$ производится для всех зарегистрированных в процессе эксперимента АЭ событий, после чего строится диаграмма рассеяния значений *S* в функции от времени и нагрузки (рис. 16).



Рис. 16. Примеры диаграмм рассеяния параметра S в функции от времени *t* и нагрузки σ для эталона в виде АЭ сигнала (*a*) и виде шумовго сигнала (*б*)

Из рис. 16*а* видно, что на отрезке 0 ÷ 600 с, где в записанных реализациях присутствуют только АЭ-события, величины *S* имеют малые значения. Источник акустического шума с амплитудой равной амплитуде АЭ событий, включается на 790-й секунде, при этом значения *S* заметно возрастают. При приближении к моменту времени, когда нагрузка тестового цикла начинает достигать порога σ_{ycr} , значения *S* начинают снижаться. Наконец в тот момент, когда $\sigma_{tect} \ge \sigma_{yct}$, низкие значения *S* начинают преобладать, индицируя возросшую активность АЭ и, следовательно, проявление АЭЭП в исследуемом образце.

Для сравнения на рис. 166 приведен результат подобных вычислений с использованием тех же данных, но для случая, когда в качестве эталонного сигнала брался шум. Хорошо видно, что во втором цикле после превышения нагрузкой величины σ_{ycr} значения *S* не снижаются и, как следствие, не указывают на возросшую активность АЭ.

С целью нахождения конкретного момента времени проявления АЭЭП полная выборка значений параметра S цензурируется таким образом, чтобы значения S, связанные с АЭ, остались в новой выборке, а S, связанные с шумом, были отброшены. Для назначения верхнего и нижнего пределов цензурирования исследовались S-значения, полученные в начале эксперимента, когда на источник еще не подавался шум. Эта выборка исследуется на тип распределения, а пороги устанавливаются таким образом, чтобы они отсекали 90% площади кривой распределения. Другими словами, S-значения, связанные с АЭ событиями, с вероятностью 90% остаются в цензурированной выборке и с 10% вероятностью отбрасываются. Выбранные пороги применяются к временному участку, где присутствует акустический шум. В результате удается отбросить большинство записей, содержащих только шум и оставить те записи, которые содержат АЭ события. Пример результата цензурирования представлен на рис. 17.



Рис. 17. Цензурированная выборка значений S в функции от времени нагружения t и нагрузки σ

Из рис. 17 видно, что после обработки во втором цикле нагружения наблюдается отчетливый всплеск параметра *S*, свидетельствующий о проявлении АЭЭП в исследуемом образце. Повышение эффективности предложенного алгоритма достигается его многократным применением с использованием в качестве эталонов различных АЭ событий и с последующим выбором наиболее четкого проявления АЭЭП в виде всплеска АЭ событий с низким значением *S* во втором цикле нагружения.

Разработанный алгоритм корреляционной фильтрации позволяет выявлять момент проявления АЭЭП в образцах композиционных материалов при условии наложения на них акустических помех с амплитудой, соизмеримой с амплитудами АЭ событий. Применение алгоритма позволит значительно повысить помехозащищенность и достоверность мониторинга НДС в окрестностях горных выработок.

Четвертая глава посвящена изучению акустических эффектов, возникающих при активном ультразвуковом прозвучивании горных пород в процессе их механического нагружения.

Акустические методы получили широкое применение при решении задач контроля различных параметров НДС массива, в том числе для мониторинга за его изменением. В основе подобных методов лежат элементы теории акустоупругости, описывающие взаимосвязь между величинами и направлениями механических напряжений и параметрами акустических сигналов, распространяющихся в изучаемой области массива. При этом изменение параметров акустических сигналов происходит под влиянием либо уплотнения пород (смыкания пор и микротрещин), либо под влиянием образования новых дефектов, снижающих амплитуду и скорость упругих колебаний. Это обуславливает низкую чувствительность акустических и, в частности, ультразвуковых методов к определению небольших приращений напряжений, вызванную недостаточным уплотнением пород для заметного изменения основных информативных параметров акустических сигналов. Более того, в большинстве случаев реализация акустических методов контроля НДС массива предполагает выбор участка ненарушенных пород, а наличие макротрещин воспринимается как существенный помеховый фактор. Учет влияния макротрещин, а также небольших изменений величин механических напряжений возможен на основе использования специального комплекса методов обработки данных ультразвукового прозвучивания под общим названием Соda wave interferometry (CWI). CWI основан на анализе параметров упругих волн многократно отраженных от возникающих в среде неоднородностей. В практике УЗ контроля принято считать, что основная информация о строении и состоянии геосреды содержится в «головной» части сигнала. По ней обычно определяют времена первого вступления продольных и поперечных волн, а также их амплитуды. В «хвосте» сигнала обычно содержится информация о колебаниях, прошедших значительно больший путь, чем кратчайшее расстояние от излучателя к приемнику. Такая часть волнового пакета называется кодой волны. Увеличение длительности пути связано с явлениями Рэлеевского рассеяния и дифракции ультразвука на неоднородностях, при этом энергия таких колебаний, как правило, меньше энергии прямой волны.

Суть подхода заключается в следующем. На фиксированной базе производится прозвучивание участка объекта исследования, при этом записанная волновая форма несет информацию об исходном состоянии среды. Повторное прозвучивание производят после механического или температурного воздействия. Суть применения CWI сводится к совместной обработке сигналов, полученных до и после воздействия. На рис. 18 представлен пример волновых форм сигналов, зарегистрированных в образце железистого кварцита, подвергаемого одноосному нагружению.



Рис. 18. Волновые формы импульсов, зарегистрированных в образце железистого кварцита при уровнях осевой нагрузки 0 и 5 МПа

Из рис. 18 видно, что в «головной» части сигнала не наблюдается существенных различий между волновыми формами – время и амплитуда первого вступления практически идентичны. В коде волны, напротив, наблюдается смещение сигналов на некоторый временной лаг. Алгоритм CWI предназначен для определения истинного значения временного смещения в коде волны *dt*. Для этого обычно рассчитывают коэффициент корреляции

$$CC_{k}(\tau) = \frac{\int_{t_{k}-\frac{T}{2}}^{t_{k}+\frac{T}{2}} A'(t-\tau)A(t)dt}{\sqrt{\int_{t_{k}-\frac{T}{2}}^{t_{k}+\frac{T}{2}} A'^{2}(t-\tau)dt \int_{t_{k}-\frac{T}{2}}^{t_{k}+\frac{T}{2}} A^{2}(t)dt}},$$
(3)

где A и A' – амплитуды волновых форм до и после воздействия, T – общая длительность сигнала, t_k – центр волнового окна (обычно подбирается экспериментально). Для определения dt обычно производят расчет серии CC при различных значениях τ и выбирают значение τ при максимальном коэффициенте корреляции. Однако традиционная корреляционная обработка, предполагающая смещение одной волновой формы относительно другой до достижения максимума коэффициента корреляции, не подходит для поиска значений dt. Как уже было отмечено

ранее, смещения в коде волны вызваны увеличением пути прохождения волны из-за многочисленных переотражений. При этом более поздние времена волновых форм соответствуют волнам, прошедшим больший путь. Поэтому смещения сигналов не являются постоянной величиной, а практически линейно возрастают от «головы» до «хвоста» сигнала с ростом количества рассеивающих дефектов.

Исследование особенностей применения CWI в породах различных генотипов под действием одноосного нагружения, а также оценка влияния наличия магистральных трещин в образцах на результаты ультразвукового прозвучивания производилось в формате лабораторного эксперимента на образцах железистого кварцита КМА (группа «ЖК»), доломита Данковского месторождения (группа «Д») и гранита Мансуровского месторождения (группа «Г»).

Породы испытывались по трехэтапной схеме. На первом этапе образец подвергался одноосному нагружению с линейной скоростью 0,1 МПа/с до 20 МПа. Одновременно с нагрузкой регистрировались волновые формы сигналов на боковой грани образцов длительностью 4096 отсчетов с шагом 1с. Таким образом, в результате испытания одного образца формировался массив из 200 волновых форм. После завершения первого этапа образец нагружался по трехточечной схеме до формирования магистральной трещины, параллельной торцам образца. На третьем этапе испытаний половины составлялись и образец с сформированной горизонтальной трещиной повторно испытывался по описанному выше алгоритму.

По результатам первого цикла нагружения были произведены оценки изменения значений скорости продольной волны V_p с ростом σ , представленные на рис. 19



Рис. 19. Значения V_p в образцах при увеличении осевого давления до (*a*) и после образования трещины (δ)

Из рис. 19*а* видно, что существенного изменения значений V_p в ненарушенных образцах не наблюдается. Появление горизонтальной трещины приводит к значительному снижению скорости продольных волн во всех исследованных образцах (рис. 196). Рост осевого давления очевидным образом повышает V_p за счет сближения берегов трещины, при этом приращения скорости оказываются различными для пород разного генезиса. В диапазоне нагрузок 0 ÷ 20 МПа рост V_p для группы «ЖК» составил 24%, для группы «Д» - 2,5%, а для группы «Г» -17,5%. Различия в показателях в данном случае обусловлены исключительно контактными условиями на берегах трещин. Твердость доломита практически в два раза ниже, чем у железистого кварцита и гранита (4 по шкале Мооса для доломита; 7 – для гранита и железистого кварцита). Вероятнее всего, из-за низкой твердости берега магистральной трещины в образцах доломита смыкаются при малых нагрузках за счет частичного смятия выступов. Дальнейшее увеличение нагрузки не приводит к существенному изменению контактных условий. Таким образом, можно утверждать, что твердость породы оказывает существенное влияние на зависимости $V_p(\sigma)$ в случае нахождения на базе прозвучивания магистральной трещины.

Следующим этапом обработки являлась реализация алгоритма CWI. В качестве волновой формы, описывающей начальное состояние образца, брался первый сигнал, зарегистрированный при $\sigma = 0$ МПа. Прямой переход от *dt* к истинным значениям скоростей многократно расселиных волн не имеет под собой физического обоснования, т.к. указанные волны из-за многократных переотражений и рассеяния проходят по более протяженному пути. В практике применения CWI обычно вычисляют отношение приращения скоростей *dV* за счет изменения *dt* к измеренным значениям V_p . Результаты вычисления dV/V_p для всех испытанных образцов представлены на рис. 20



Рис. 20. Результаты расчета значений приращений скоростей к измеренным значениям *dV*/*V*_p методом CWI для образцов до (*a*) и после образования трещины (*б*)

Рост dV/V_p свидетельствуют о снижении времени первых вступлений рассеянных волн, наблюдающихся в коде волны. Это связано в первую очередь с уплотнением образца под действием давления, смыканием микротрещин, пор и, как следствие, сокращению количества переотражений сигнала.

Из рис. 20*а* видно, что в отличие от измеренного ранее V_p для всех образцов характерен рост dV/V_p с увеличением осевого давления в случае отсутствия трещины. Для образцов групп «ЖК» и «Г» зависимость $dV/V_p(\sigma)$ носит линейный характер, что хорошо согласуется с результатами, полученными на бетонах. На образце группы «Д» наблюдается нелинейная зависимость, связанная с наличием пор в образцах доломита. В диапазоне $\sigma = 0 \div 15$ МПа происходит постепенное закрытие пор, что отражается на значениях dV/V_p . После $\sigma = 15$ МПа возможности повышения dV/V_p оказываются исчерпанными. Для образцов с трещинами рост dV/V_p оказывается более заметным (значительно превышающим рост V_p). Очевидно, что происходит одновременное интегральное уплотнение образца, а также смыкание берегов магистральной трещины.

Использование алгоритма CWI не может быть использовано для определения абсолютных значений напряжений в приконтурном массиве, т.к. предполагает сравнение сигналов в породах до и после определенного воздействия. Однако использование указанного алгоритма может значительно повысить чувствительность ультразвукового контроля за изменением НДС. Так, например, предлагается использовать алгоритм CWI для обработки каротажных измерений в вертикальной скважине, проводимых в режиме дискретного мониторинга (регулярных измерений по мере удаления забоя от зоны контроля). В этом случае производится серия первичных регистраций волновых форм в фиксированных точках на разной глубине вертикальной измерительной скважины, пробуренной в кровле выработки. Результаты последующих измерений, проводимых через равные интервалы времени в тех же точках, сравниваются с исходными волновыми формами. Переход от кинематических характеристик к абсолютным значениям приращений напряжений производят по тарировочным кривым, получаемым на образцах в лабораторных условиях. При этом, в случае нахождения трещины на базе прозвучивания пользуются тарировочными зависимостями, полученными на образцах, также содержащих трещину. Для пород с низкой твердостью влиянием трещины можно пренебречь. Наибольшая эффективность указанного способа будет проявляться при определении малых по амплитуде и продолжительных по времени изменений напряженно-деформированного состояния массива.

Для реализации описанного метода может быть использован специально разработанный модульный каротажный зонд, позволяющий производить ультразвуковые измерения в необводненных скважинах с применением сухого акустического контакта. Модульная конструкция зонда позволяет менять количество и расстояние между акустическими преобразователями, а также использовать его для межскважинного прозвучивания. Внешний вид зонда представлен на рис. 21. Высокая повторяемость контактных условий достигается за счет сложной формы протектора преобразователей, а также эффективной системы пневмоприжима.



Рис. 21. Каротажный зонд: 1 – ультразвуковые преобразователи; 2 – акустические развязки; 3 – пневматическая линия системы прижима; 4 – узел крепления досылочных штанг

В пятой главе рассмотрены вопросы влияния термобарического нагружения на динамические и кинематические информативные параметры ультразвуковых зондирующих сигналов, а также предложены способы контроля напряженного состояния породного массива с использованием установленных зависимостей.

Многолетний опыт применения метода ультразвукового прозвучивания в геоконтроле свидетельствует о том, что наряду с его достоинствами (наличие устойчивых корреляционных

связей скорости продольных волн V_p с напряжениями, высокий уровень методического и аппаратурного обеспечения) он во многом не удовлетворяет требованиям практики геоконтроля. Это, прежде всего, выражается в низкой чувствительности V_p по отношению к действующим напряжениям. В то же время, имеются физические предпосылки того, что рост температуры может существенно повлиять на форму зависимости $V(\sigma)$ в сторону повышения чувствительности последней к действующим механическим напряжениям. С целью подтверждения этого предположения была произведена серия экспериментальных исследований на специально разработанной лабораторной установке, состоящей из трех основных блоков: термического блока, предназначенного для термического нагружения и поддержания заданной температуры исследуемого образца, блока одноосного механического нагружения образца и блока ультразвуковых измерений. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис.22.



Рис 22. Лабораторная установка: 1 – управляющий компьютер; 2 – электронный блок управления нагревом; 3 – АЦП; 4 – блок нагрева образца; 5 – устройство одноосного нагружения; 6 – акустические преобразователи

Первый этап исследований заключался в установлении влияния пористости и особенностей термобарических воздействий на различные информативные параметры распространения продольных и поперечных волн ультразвукового диапазона частот. Исследовались образцы известняков Касимовского (группа И1) и Сары-Ташского (группа И2) месторождений. Детальное изучение пористости производилось с помощью электронно-оптической системы «Thixomet Pro», позволяющей на основании анализа цифрового изображения поверхности образца оценить соотношение размеров пор. Аншлифы горных пород, а также усредненные по группам результаты оптического анализа пористости представлены на рис. 23.



Рис. 23. Аншлифы образцов группы И1 (а) и И2 (б) и результаты оптического анализа пористости (в)

Процесс испытаний состоял из ступенчатого увеличения температуры T при фиксированном уровне одноосной нагрузки о. Измерение параметров ультразвуковых сигналов производилось в диапазоне температур от 20°С до 100°С с шагом 10°С на ступенях давления 0, 3, 6 и 9 МПа. Перед повышением давления до следующего уровня образец полностью охлаждался до 20°С. На каждой стадии производилось измерение V_p и V_s .

На рис. 24 представлены примеры зависимостей $V_p(T,\sigma)$ для образцов групп И1 и И2, а также результаты их аппроксимации полиномом второй степени вида $y = a_0 + a_1T + a_2\sigma + a_3T^2 + a_4T\sigma + a_5\sigma^2$. Исходные (T = 20°C; $\sigma = 0$ МПа) значения для скорости продольной волны V_p^{init} образцов группы И1 и И2 составили 3920 м/с и 2960 м/с соответственно. Более низкие значения V_p^{init} для образцов группы И2 обусловлены наличием в них пор, больших по размеру и количеству.



Рис. 24. Изменение скорости продольной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп И1 (а) и И2 (б)

Для обоих типов известняков увеличение температуры приводит к снижению V_p , а увеличение осевой нагрузки — к увеличению V_p . При высоких температурах изменение давления приводит к большему приращению V_p .

Для оценки такого приращения вычислялся показатель

$$\Delta V_p^T = V_{pmax}^T - V_{pmin}^T \tag{4}$$

где V_{pmax}^{T} , V_{pmin}^{T} – максимальная и минимальная зарегистрированные скорости продольной волны в диапазоне исследуемых давлений при заданной температуре *T*. Для образцов группы И1 $\Delta V_{p}^{20°C} = 77$ м/с (1.83%), а $\Delta V_{p}^{100°C} = 177$ м/с (4.72%). Для образцов группы И2 $\Delta V_{p}^{20°C} = 115$ м/с (3.88%), а $\Delta V_{p}^{100°C} = 191$ м/с (6.76%). На скорость продольной волны влияет как общая пористость, так и размер пор. Увеличение этих параметров приводит к снижению значений V_{p} . Следует также отметить нелинейный характер роста V_{p} с увеличением σ в пористом известняке группы И2. Степень нелинейности в данном случае можно оценить по коэффициенту a_{5} аппроксимирующего многочлена. Для породы группы И2 он существенно больше ($a_{5} = 1.083$), чем для породы группы И1 ($a_{5} = 0.4815$).

Результаты измерения скорости поперечных волн V_s показали схожие с V_p особенности. На рис. 25 представлены результаты аппроксимации $V_s(T,\sigma)$ для образцов групп И1 и И2. Исходные (T = 20°C; $\sigma = 0$ МПа) значения скоростей поперечных волн V_s^{init} для образцов группы И1 и И2 составили 2233 м/с и 1587 м/с соответственно. Значения приращений V_s для пород группы И1 составили $\Delta V_s^{20°C} = 25$ м/с (1.11%), а $\Delta V_s^{100°C} = 79$ м/с (4.22%). Для пористого известняка группы И2 приращения V_s более значительны: $\Delta V_s^{20°C} = 69$ м/с (4.35%), а $\Delta V_s^{100°C} = 211$



м/с (16.4%). Также более значительно выражена нелинейность роста V_s при увеличении σ во всем диапазоне температур для пористых известняков группы И2.

Рис. 25. Изменение скорости поперечной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп И1 (а) и И2 (б)

0

100

1

0

Во всех исследованных образцах наблюдается рост чувствительности V_p и V_s к осевой нагрузке с ростом температуры. Для образцов пористого известняка группы И2 увеличение чувствительности V_p проявляется более отчетливо, чем в образцах более однородного известняка группы И1. Еще большая разница наблюдается между группами И1 и И2 при измерении V_s. Увеличение температуры приводит к значительному росту приращения значений V_s , особенно в пористых известняках. Это свидетельствует об образовании под действием температуры множества почти сомкнутых трещин, которые оказывают наибольшее влияние на скорость поперечной волны. Таким образом, рост температуры приводит к увеличению акустической тензочувствительности є_р, породы – показателя, определяющего приращение скорости упругой волны (*P* или *S*) при увеличении осевой нагрузки.

Дополнительную информацию о степени и характере нарушений в образце, особенно о ее динамике возможно получить при использовании спектрального анализа принятых сигналов. В настоящей работе зарегистрированные волновые формы также подвергались спектральной обработке. Спектральный анализ заключался в построении спектрограмм сигналов, где по горизонтальной оси откладывались значения осевого давления, по вертикальной – частоты акустических сигналов, а цветом кодировались амплитуды. На рис. 26 представлены примеры таких комплексных спектрограмм, полученных для образцов групп И1 и И2.



Рис. 26. Изменение спектрального состава ультразвуковых сигналов при изменении осевой нагрузки и температуры для образцов групп И1 (*a*) и И2 (*б*)

В пористых известняках группы И2 наблюдается значительное снижение амплитуд высокочастотных составляющих спектра во всем диапазоне исследованных давлений и температур. Это связано с наличием и, что более важно, размером пор. С ростом температуры для образцов обеих групп наблюдается смещение спектральных максимумов в высокочастотном и низкочастотном диапазонах (сплошная и пунктирная линии на рис. 26). Подобное смещение наблюдается даже при отсутствии осевой нагрузки и, вероятнее всего, связано со снижением упругих модулей пород с ростом температуры.

Дальнейшее исследование влияния температуры на повышение чувствительности скоростей упругих волн к изменениям напряженно-деформированного состояния производилось на расширенной коллекции образцов осадочных пород. Основные свойства образцов приведены в в нижеприведенной таблице.

Порода	Группа	ρ, кг/м ³	П,%	<i>Е</i> _d , ГПа
Плотные известняки Касимовского место-	И1	2266	17,6	28,3
рождения				
Пористые известняки Сары-Ташского ме-	И2	1847	29,3	15,7
сторождения				
Доломиты нефтегазоконденсатного место-	Д1	1974	22,7	19,15
рождения Жанажол				
Плотные доломиты Новомосковского гип-	Д2	2554	4,0	37,9
сового месторождения				
Мрамор Кибик-Кордонского месторожде-	M1	2695	0,37	35,1
ния				

Таблица. Физико-механические свойства исследованных пород

ρ – плотность; П – пористость; *E*_d – динамический модуль упругости.

Для оценки увеличения такой чувствительности предлагается для каждого типа породы и ступени термического нагружения определить показатель эффективного приращения скорости $\Delta V_{3\phi\phi}$

$$\Delta V_{\nu\phi\phi} = \frac{\Delta V^T}{\Delta V^{20^{\circ}C}}.$$
(5)

Для этого предварительно определены приращения скоростей на каждой из ступеней температур ΔV^T

$$\Delta V^T = \frac{v_{max}^T}{v_{min}^T} \cdot 100\%,\tag{6}$$

где $V_{max}^T V_{min}^T$ — максимальное и минимальное значение скорости продольной или поперечной волны при температуре *T*.

Показатель $\Delta V_{3\phi\phi}$ характеризует степень эффективности нагрева породы в качестве фактора, увеличивающего чувствительность скоростей упругих волн к изменению осевого давления. Значения $\Delta V_{3\phi\phi}$ больше 1 свидетельствуют об эффективности нагрева в качестве фактора повышения чувствительности V_p и V_s к изменениям напряженного состояния образцов. На рис. 27 представлены результаты расчета $\Delta V_{3\phi\phi}$ для продольных и поперечных волн в диапазоне температур от 20 до 100°С.



Рис. 27. Экспериментально определённые значения ΔV_{эфф} для продольных (*a*) и поперечных (*б*) волн

Из рис. 27 видно, что рост температуры приводит к увеличению чувствительности скоростей упругих волн к изменениям осевого давления. Причем наибольшее увеличение чувствительности наблюдается в пористых породах групп И2, Д1 и И1. Рост $\Delta V_{3\phi\phi}$ можно объяснить образованием множества микротрещин в результате температурного воздействия. Различия в значениях $\Delta V_{P_{3\phi\phi}\phi}$ и $\Delta V_{S_{3\phi\phi}\phi}$ объясняется разными механизмами взаимодействия продольных и поперечных волн с трещинами. Снижение V_p , как правило, связано с увеличением раскрытия трещин, ориентированных ортогонально направлению распространения продольной волны (V_p в заполнителе трещин обычно значительно меньше, чем в основной породе). Поперечные волны более чувствительны к наличию трещин, ортогональных плоскости поляризации *S*-волн. При этом величина раскрытия трещин не оказывает существенного влияния на V_{s} , т.к. поперечные волны не распространяются в жидкостях и газах (типичных заполнителях трещин). Учитывая вышесказанное, можно предположить, что рост температуры приводит к образованию множества трещин различной ориентации с малым раскрытием. Также из рис. 27 можно заметить, что для большинства исследованных пород наблюдается постепенное выполаживание графика $\Delta V_{3\phi\phi}(T)$ после температуры 75°С°.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что рост температуры в образцах осадочных пород приводит к увеличению приращения скоростей продольных и поперечных волн при повышении осевого давления. Наиболее отчетливо эффект наблюдается в образцах с высокой пористостью (доломит, известняк) в температурном диапазоне 75-100°C. Таким образом, использование нагрева может повысить чувствительность методов контроля НДС массива, связанных с прозвучиванием участка пород ультразвуковыми сигналами. Одним из примеров реализации такого подхода можно считать метод межскважинного прозвучивания с температурной интенсификацией.

Суть метода заключается в следующем. На выбранном участке массива бурятся измерительные скважины, из которых отбирается керн. В лабораторных условиях керн подвергается ультразвуковому прозвучиванию при различных значениях осевого напряжения и заданной температуре T_* . Таким образом, получают экспериментально установленную зависимость $V_p(\sigma, T_*)$. В натурных условиях производят измерения скорости распространения продольных волн в ультразвуковом диапазоне частот на участке пород между скважинами, при этом массив локально нагревают до температуры T_* специально сконструированными скважинными ультразвуковыми зондами. Как было показано ранее, заметный рост чувствительности V_p к изменениям σ начинается в большинстве пород при температуре 70°С. Истинные значения σ вдоль направления прозвучивания получают по зарегистрированным in-situ значениям V_p и определенной экспериментально зависимости $V_p(\sigma, T_*)$. Схематически реализация метода представлена на рис. 28. Описанный выше принцип контроля возможно также реализовать в виде каротажных измерений. Для реализации метода можно использовать модернизированный модульный каротажный зонд, подробно описанный в четвертой главе.



Рис. 28. Схема реализации метода прозвучивания с локальным нагревом: 1 – акустические преобразователи; 2 – нагревательные элементы; 3 – система пневмоприжима; 4 – досылочные штанги

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, решена проблема разработки научно-методических и экспериментально-теоретических основ, а также технических средств для проведения инструментального контроля параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива и мониторинга за его изменением на основе акустических эффектов в горных породах и композиционных материалах, что имеет важное значение для развития горной геофизики и обеспечения безопасности ведения подземных горных работ и эксплуатации подземных сооружений.

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

- Проведен анализ применения акустических методов контроля параметров НДС приконтурного массива. Показано, что для повышения точности измерений, а также снижения их стоимости и трудоемкости возможно использовать новые подходы, заключающиеся в использовании искусственных материалов в качестве носителей акустико-эмиссионной «памяти», а также применении новых схем активного ультразвукового прозвучивания в сочетании с обработкой сигналов, основанной на принципах интерферометрии.
- Произведено детальное экспериментальное исследование параметров формирования и проявления акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах, показано существенное влияние направления анизотропии на акустико-эмиссионную тензочувствительность, а также на проявление акустико-эмиссионного эффекта памяти.
- 3. Произведено исследование влияния неравнокомпонентного трехосного нагружения на параметры проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в ряде слоистых и дисперснонаполненных композиционных материалах. Показано, что в отличие от большинства горных пород для подобных материалов не требуется экспериментальное определение коэффициентов, характеризующих особенности их строения что существенно снижает трудоемкость реализации методов контроля параметров НДС массива с использованием указанных материалов в качестве первичных преобразователей давления.
- Экспериментально исследовано влияние растягивающих механических напряжений на формирование и проявление акустико-эмиссионных эффектов в ряде лабораторносинтезированных композиционных материалов.
- 5. Сформулированы принципы помехозащиты акустико-эмиссионных измерений на основе полосовой и корреляционной фильтрации зарегистрированных сигналов.
- 6. Экспериментально установлено влияние магистральных трещин на зависимости скоростей упругих волн от величины осевой нагрузки, определяемых методом интерферометрии на кодах волн (Coda Wave Interferometry). Показано, что указанный алгоритм обработки может существенно повысить чувствительность ультразвукового определения приращений компонент НДС в приконтурном массиве. Особенно ярко это проявляется для медленно изменяющихся и малых по амплитуде приращений напряжений.
- 7. Разработан стенд для ультразвуковых испытания горных пород в контролируемых термобарических условиях. Созданное оборудование позволяет получать трехмерные зависимости скоростей продольных V_P и поперечных V_S волн в функции от осевого давления σ и температуры T.

- 8. Экспериментально установлено влияние пористости осадочных пород на зависимости *V_P*(σ,*T*) и *V_S*(σ,*T*). Показано, что увеличение температуры снижает величины скоростей продольных и поперечных волн, однако увеличивает приращения указанных волн, возникающих за счет роста осевого давления. Наибольший эффект проявляется при использовании поперечных волн в пористых породах.
- 9. Произведено определение зависимостей *V*_{*P*}(σ,*T*) и *V*_{*S*}(σ,*T*) для широкого круга горных пород различного генезиса. Сформулированы принципы оценки эффективности нагрева в качестве фактора повышения чувствительности ультразвукового контроля параметров НДС массива.
- 10. Сформулирован ряд способов контроля параметров НДС массива на основе акустических эффектов в искусственных материалах и горных породах. Разработано методическое и аппаратурное обеспечение для их реализации.
- 11. Разработаны «Методические рекомендации по мониторингу динамики изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием ультразвуковой интерферометрии», использованные ИБРАЭ РАН при разработке проектной документации «Разведка участка захоронения радиоактивных отходов (Енисейский участок Нижне-Канского массива)», получившей положительное заключение ФГКУ «Росгеолэкспертиза» № 154-02-06/2023 от 31.07.2023, а также «Методические рекомендации по контролю параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах», принятые к использованию на Таштагольской и Шерегешской шахтах АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также Сибирским филиалом АО «ВНИМИ»

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК и Scopus по защищаемой специальности:

- Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Об использовании акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционном материале для контроля критических напряжений в массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 32-39.
- 2. Николенко П.В., Цариков А.Ю. Лабораторный стенд для механических и акустикоэмиссионных испытаний образцов композиционных материалов // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 4. С. 273-278.
- 3. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Особенности акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах и их использование для контроля напряжений в массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 217-223.
- 4. Николенко П.В., Буянова Д.С., Цариков А.Ю., Кормнов А.А. Контроль напряжений в массиве с использованием акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах с искусственно наведенной дефектностью // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 8. С. 198-203.
- 5. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 41-47.

- 6. Николенко П.В., Набатов В.В. Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. 2015. № 9. С. 33-36.
- 7. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. О принципах ультразвуковой структурной диагностики приконтурного массива с использованием шумовых зондирующих сигналов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 1. С. 53-62.
- 8. Николенко П.В., Кормнов А.А. Контроль напряжений в породном массиве с использованием акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композитах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 11. С. 143-147.
- 9. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Особенности аппаратурного обеспечения контроля структурных неоднородностей в окрестностях горных выработок с использованием шумовых зондирующих сигналов //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 178-183.
- 10. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кошелев А.Е. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 5. С. 48-53.
- 11. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Оценка чувствительности метода ультразвукового корреляционного каротажа при выявлении трещин в кровле горных выработок // Горный журнал. 2016. № 1. С. 54-57.
- 12. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного механического нагружения // Горный журнал. 2016. № 6. С. 60-63.
- 13. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Митрофанов Э.Р. Аппаратурное обеспечение и результаты измерения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в образцах угля при их одноосном механическом нагружении // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 11. С. 341-348.
- 14. Николенко П.В., Кормнов А.А. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 265.
- 15. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., Protasov M., Nikolenko P.V. Use of tomography in stress-strain analysis of coal-rock mass by solving boundary inverse problems // Procedia Engineering, Volume 191, 2017, Pages 1048-1055
- 16. Кормнов А.А., Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей с массивом при реализации ультразвукового корреляционного метола геоконтроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S1. C. 43-52.
- 17. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д., Кошелев А.Е. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 25-31.
- 18. Николенко П.В., Чепур М.Д. Об использовании акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах для оценки динамики напряженно-деформированного состояния

массива в окрестностях горной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 12. С. 134-141.

- 19. Николенко П.В., Чепур М.Д. Особенности спектрального анализа проявлений акустикоэмиссионного эффекта памяти в композиционных материалах для решения задач контроля горного давления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). 2018. № 5. С. 129-135.
- 20. Shkuratnik, V.L., Nikolenko, P.V. Spectral Characteristics of Acoustic Emission in Carbon Fiber-Reinforced Composite Materials Subjected to Cyclic Loading // Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2018, 2018, Art. 1962679.
- 21. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Акустико-эмиссионные эффекты при растяжении композитов и их использование для контроля состояния кровли горных выработок // Горный журнал. 2019. №1. С. 13-16.
- 22. Николенко П.В. Аппаратурное и методическое обеспечение контроля сложного напряженного состояния массива с использованием эффектов памяти в упругих композиционных датчиках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 2. С. 97-104.
- 23. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Установка для ультразвуковых измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 5. С. 89-96.
- 24. Николенко П.В. Методические вопросы установления влияния термобарических воздействий на скорость распространения ультразвуковых колебаний в горных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 9. С. 160-167.
- 25. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных волн // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 4. С. 117-126.
- 26. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Закономерности изменения скоростей упругих волн в горных породах различной пористости при механическом и термическом нагружении по данным лабораторных экспериментов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 12-18.
- 27. Николенко П.В. Экспериментальное исследование влияния температуры и давления на развитие поврежденности в образцах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 5. С. 21-32.
- 28. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Особенности изменения скоростей продольных и поперечных волн в образцах осадочных горных пород, подвергаемых термобарическим воздействиям // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). 2021. № 7. С. 5-13.
- 29. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С., Эпштейн С.А. Закономерности криотермического разрушения углей по данным спектрального анализа результатов ультразвукового прозвучивания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 1. С. 3-12.
- 30. Petr V. Nikolenko, Svetlana A. Epshtein, Vladimir L. Shkuratnik, Polina S. Anufrenkova. Experimental study of coal fracture dynamics under the influence of cyclic freezing-thawing using

shear elastic waves // International Journal of Coal Science & Technology, Vol. 7(2) https://doi.org/10.1007/s40789-020-00352-x

- 31. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Использование нагрева для повышения чувствительности ультразвукового метода контроля напряжений в породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11. С. 159-168.
- 32. Николенко П.В., Зайцев М.Г. Экспериментальное исследование влияния нарушений сплошности на скорости упругих волн в напряженных образцах горных пород с использованием ультразвуковой интерферометрии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 70-79.

Патенты:

- 33. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Способ определения напряженного состояния массива горных пород. Патент №2704086 РФ, МПК Е21С 39/00. Заявл. 24.07.2019; Опубл. 23.10.2019, Бюл. №30.
- 34. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Цариков А.Ю. Способ определения изменения напряженного состояния горного массива в окрестностях выработки. Патент №2532817 РФ, МПК Е21С 39/00, G01N 29/14. Заявл. 24.06.2013; Опубл. 10.11.2014, Бюл. №31.
- 35. Николенко П.В., Кормнов А.А., Шкуратник В.Л. Способ исследования напряженного состояния массива горных пород. Патент №2557287 РФ, МПК Е21С 39/00. Заявл. 17.06.2014; Опубл. 20.07.2015, Бюл. №20.

В прочих изданиях:

- 36. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Новые акустические методы оценки структурной повреждённости и напряжённо-деформированного состояния массива в окрестностях горных выработок // Тезисы докладов Х Международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Апатиты: ГОИ КНЦ РАН.14-17 июня 2016 г.- С.30-31.
- 37. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. О применении кодированных акустических сигнализаторов в системах геомониторинга // Тезисы докладов Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ». Апатиты: ГОИ КНЦ РАН. 24-47 сентября 2013г. С. 3-8.
- 38. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Прогноз разрушения каменного угля на основе анализа временных и спектральных характеристик его акустической эмиссии // Тезисы докладов XI всероссийской школы-семинаре с международным участием «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». – М.:ИФЗ РАН, 2019, -С. 72-72
- 39. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Nazarov L.A., Shkuratnik V.L., Protasov M.I., Nikolenko P.V. Stress evolution and induced seismicity in mining: lab test, observation and modeling // In proc. Rock Dynamics - Experiments, Theories and Applications. Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications, ROCDYN-3 2018. 2018. pp. 461-467.
- 40. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., Protasov M., Nikolenko P.V. Use of tomography in stress-strain analysis of coal-rock mass by solving boundary inverse problems // In proc. 79th EAGE Conference and Exhibition 2017. 79, Energy, Technology, Sustainability Time to Open a New Chapter. 2017.