

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»

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

Доктор технических наук

Шкуратник Владимир Лазаревич

Доктор физико-математических наук

Винников Владимир Александрович

Москва – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	10
Глава 1. Инструментальные методы изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород.....	17
1.1 Методы оценки параметров НДС на основе анализа геологической информации.....	19
1.2 Анализ геомеханических методов изучения НДС приконтурного массива.....	20
1.2.1 Измерение величин и направлений главных напряжений	20
1.2.2 Методы инструментального контроля приращений напряжений	26
1.3 Опыт применения геофизических методов контроля параметров НДС массива горных пород.....	29
1.3.1 Радиометрический метод контроля НДС.....	30
1.3.2 Электрометрические методы контроля НДС.....	31
1.3.3 Акустические методы изучения напряженно-деформированного состояния	33
1.3.3.1 Акустико-эмиссионные методы контроля НДС массива пород.....	39
1.3.3.2 Ультразвуковые методы контроля НДС массива пород.....	44
Выводы к главе 1.....	49
Глава 2. Использование акустико-эмиссионных эффектов для контроля параметров НДС массива горных пород.....	55
2.1 Влияние анизотропии композиционных материалов на проявление в них акустико-эмиссионных эффектов	55
2.2 Изучение механизмов проявления АЭЭП в анизотропных композитах на модельных образцах с единичным упругим включением.....	61

2.3 Исследование формирования и проявления АЭЭП в композиционных материалах в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия	65
2.3.1 Подготовка и предварительное цензурирование образцов	65
2.3.2 Особенности формирования и проявления АЭЭП в условиях трехосного неравнокомпонентного напряжения	75
2.3.3 Результаты лабораторных экспериментов	76
2.4 Спектральный анализ акустической эмиссии при нагружении композитов на основе углеродных волокон	84
2.5 Особенности формирования и проявления АЭЭП в композиционных материалах в условиях растягивающих механических напряжений	93
2.5.1 Акустико-эмиссионные эффекты при испытаниях образцов на чистый разрыв.....	93
2.5.2 Акустико-эмиссионные эффекты при испытании композитов по «бразильской» схеме	99
2.6 Изучение механизмов формирования АЭ импульсов в композитах и некоторых горных породах на основе AF-RA анализа.....	103
2.6.1 Основные принципы AF-RA анализа	103
2.6.2 Ядерная оценка плотности распределения АЭ событий при AF-RA анализе	109
2.6.3 Результаты применения AF-RA и KDE анализа для различных типов композитов и горных пород при различных режимах механического нагружения.	114
2.7 Использование акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах для контроля параметров НДС приконтурного массива пород.....	118

2.7.1 Способы контроля параметров НДС с использованием чувствительных элементов, изготовленных из анизотропных композитов	120
2.7.1.1 Способ определения ориентации вектора максимального главного напряжения в окрестностях горных выработок	120
2.7.1.2 Способ мониторинга смещения зоны опорного давления	122
2.7.1.3 Способ определения приращений напряжений вдоль заданного направления с дискретной сигнализацией	125
2.7.2 Аппаратурное обеспечение методов контроля НДС массива пород с применением композиционных чувствительных элементов	128
2.7.2.1 Система фиксации композиционного чувствительного элемента.....	128
2.7.2.2 Электронный блок регистрации АЭ.....	130
2.7.3 Контроль изменения девиатора напряжений вблизи горных выработок с использованием чувствительных элементов, изготовленных из дисперсно-наполненных композитов.....	133
2.7.3.1 Способ контроля изменения девиатора напряжений	133
2.7.3.2 Обоснование методических аспектов контроля изменения девиатора напряжений на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов.....	138
2.7.4 Контроль растягивающих напряжений в кровле горной выработки с использованием композиционных чувствительных элементов.....	141
Выводы к главе 2.....	143
Глава 3. Принципы обеспечения помехозащиты акустико-эмиссионных измерений при реализации методов контроля НДС массива	146

3.1 Оценка влияния влаги как помехового фактора при контроле НДС массива с применением композиционных чувствительных элементов систем измерений.....	146
3.2 Применение корреляционной фильтрации сигналов АЭ для повышения помехозащищенности контроля напряженного состояния in-situ	148
3.3 Использование спектральных особенностей проявлений АЭЭП в дисперсно-наполненных композитах для повышения помехозащищенности контроля НДС	155
Выводы к главе 3	159
Глава 4. Особенности использования активного ультразвукового прозвучивания при изучении напряженно-деформированного состояния горных пород	161
4.1 Закономерности распространения ультразвуковых колебаний в сильно анизотропных породах при различных режимах механического нагружения.....	162
4.2 Экспериментальное исследование влияния трещин на напряженно-деформированное состояние пород с использованием ультразвуковой интерферометрии	170
4.3 Аппаратурное и методическое обеспечение проведения ультразвукового контроля НДС в приконтурном массиве пород	182
4.3.1. Модульный ультразвуковой каротажный комплекс	182
4.3.2 Способ контроля вертикальной компоненты напряжений в кровле горной выработки с использованием ультразвуковой интерферометрии	185
Выводы к главе 4.....	190
Глава 5. Исследование акустических эффектов в горных породах в условиях термобарического нагружения для повышения надежности контроля НДС массива	192

5.1. Лабораторная установка для термобарических и ультразвуковых исследований на образцах горных пород.....	192
5.2. Методические аспекты установления влияния температуры на скорости распространения ультразвуковых колебаний в образцах.....	198
5.3 Подготовка образцов горных пород к совместным акустическим и термобарическим исследованиям.....	206
5.4 Экспериментальное исследование влияния напряжений на температурные зависимости скорости распространения ультразвука в горных породах.....	207
5.4.1 Влияния пористости пород на температурные зависимости скоростей продольных и поперечных волн	207
5.4.2 Понятие поврежденности горных пород и динамика ее изменения при термобарическом воздействии	219
5.4.3 Оценка эффективности нагрева как фактора, повышающего чувствительность скоростей упругих волн к изменению напряженного состояния пород	223
5.4.4 Анализ положения максимума спектра ультразвуковых импульсов при термобарическом воздействии на горные породы	229
5.5 Повышение чувствительности ультразвукового способа контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива за счет локального нагрева.....	231
Выводы к главе 5.....	233
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	235
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	238
Приложение А. Методические рекомендации по контролю параметров напряженно-деформированного состояния	

приконтурного массива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах	282
Приложение Б. Методические рекомендации по мониторингу динамики изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием ультразвуковой интерферометрии	297
Приложение В. Информация о внедрении результатов работы на предприятиях	313

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Акустические измерения

V_p , м/с – скорость продольной волны;

V_s , м/с – скорость поперечной волны;

A_p , дБ – амплитуда продольной волны;

A_s , дБ – амплитуда поперечной волны;

t_p , с – время первого вступления продольной волны;

f_0 , Гц – резонансная частота акустических преобразователей;

λ , м – длина волны;

$\tau_{ик}$, с – интервал корреляции сигнала;

T , с – длительность сигнала;

f_{max} , Гц – частота максимума спектра сигнала;

$t_{диск}$, с – период дискретизации сигнала;

E_d , Па – динамический модуль упругости;

$\Delta\omega_{эф}$, Гц – эффективная ширина спектра;

E , В – энергия сигнала;

Механические параметры

$\sigma_{1,2,3}$, Па – главные напряжения;

σ^i , Па – максимальный уровень механических напряжений, достигнутый в i -м цикле нагружения;

σ^* , Па – уровень механических напряжений, при котором проявляется акустико-эмиссионный эффект памяти;

K , Па – объемный модуль упругости;

E , Па – модуль Юнга (модуль упругости);

μ – коэффициент Пуассона;

D , Па – девиатор напряжений;

$\sigma_{сж}$, Па – предел прочности на одноосное сжатие;

ρ , кг/м³ – плотность;

P , % - общая пористость;

f , ед. – коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протодяконова;

λ , Вт/(м·К) – теплопроводность;

c , Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость;

Акустико-эмиссионные измерения

\dot{N}_Σ , имп./с – активность акустической эмиссии;

N , ед. – сумма импульсов акустической эмиссии;

\dot{N} , ед./с – скорость счета акустической эмиссии;

FR, ед. – Felicity Ratio («соотношение фелисити») – показатель сохранности акустико-эмиссионной памяти;

S_{AE} , соб./с·м) – акустико-эмиссионная тензочувствительность;

AF, Гц – средняя частота импульса акустической эмиссии.

Принятые сокращения

АЭ – акустическая эмиссия;

АЭЭП – акустико-эмиссионный эффект памяти;

ГИС – геофизические исследования скважин;

НДС – напряженно-деформированного состояние

УЗ - ультразвук

ЭК – эффект Кайзера

ЭМИ – электромагнитная эмиссия

ВВЕДЕНИЕ

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) горных пород вблизи горных выработок. Особенно это актуально на фоне тенденции к увеличению глубинности ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях. При этом инструментальные методы контроля НДС массива должны отвечать не только требованиям надежности и точности, но также быть пригодными для массового использования. Одним из перспективных направлений современной горной геофизики можно считать совершенствование акустических (в частности, ультразвуковых) методов контроля горного давления. Такое совершенствование может быть направлено как сторону увеличения 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 геоконтроля, а также методического и аппаратного обеспечения для их реализации.

Настоящая работа реализовывалась в рамках ряда научных проектов, среди которых гранты Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31201 «Закономерности акустико-эмиссионных 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 натуральных наблюдений, лабораторных экспериментов, геомеханического моделирования и ретроспективного анализа", № 17-77-10009 «Разработка метода контроля критических изменений напряженно-деформированного 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 напряженно-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 кров-ли горных выработок.

4. Для повышения надежности контроля НДС массива необходимо применять дополни-тельную полосовую фильтрацию сигналов, полученных от чувствительных элементов системы измерений, изготовленных из синтезированных на основе эпоксидной смолы и дисперсно-распределенных 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 акустико-эмиссионного 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°C.

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 и технических средств с высокими метрологическими характеристиками при проведении лабораторных исследований.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе:

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

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

- экспериментальные лабораторные 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:

- установлении закономерностей формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти 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, основанных на корреляционной обработке сигналов, значительно повышающего надежность контроля;

- установления 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 экспериментально-теоретических основ 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 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».

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); X Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (КНЦ РАН, г. Апатиты, 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-практической 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.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту д.ф.-м.н. Винникову Владимиру Александровичу за помощь и поддержку при подготовке диссертации. Автор чтит память своего учителя проф. Владимира Лазаревича Шкуратника и благодарит его за неоценимый вклад в проведенные исследования. Автор также благодарит весь коллектив кафедры Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС за поддержку и заинтересованное участие в обсуждении работы.

Глава 1. Инструментальные методы изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Естественное напряженно-деформированное состояние массива горных пород формируется взаимным наложением полей гравитационных и тектонических сил и зависит от целого набора факторов, к основным из которых относятся глубина, литологический состав пород, наличие тектонических нарушений, особенности температурного поля и др. В большинстве случаев массивы горных пород в своем естественном состоянии обладают высокой степенью стабильности, нарушить которую могут только динамические явления больших энергий, такие, как землетрясения. С другой стороны, техногенное вмешательство, связанное с бурением скважин, подземной разработкой месторождений полезных ископаемых и подземным строительством, вызывает перераспределение напряжений в массиве, которое может привести к нарушению его равновесного состояния. Обеспечение безопасного и эффективного недропользования должно основываться на всестороннем учете особенностей НДС массива, параметры которого должны быть определены максимально точно на различных масштабных уровнях.

Наиболее надежным способом контроля НДС пород является использование различных инструментальных методов, история которых берет начало в 30-х годах прошлого века. За почти столетнюю историю развития интерес к экспериментальным методам контроля напряжений не угас. Ежегодно большое количество статей, посвященных этой тематике, публикуется в отечественных и зарубежных изданиях. Это в значительной мере указывает на то, что, несмотря на большой накопленный опыт и десятки разработанных методов, проблема эффективного контроля напряжений в массивах горных пород до сих пор до конца не решена. Дополнительный импульс исследованиям в этой области придает увеличение глубин ведения горных работ и усложнение горно-геологических условий.

Основными задачами инструментальных методов контроля НДС массива являются:

- 1) определение величин и направлений главных напряжений массива в его естественном состоянии;
- 2) определение величин и направлений главных напряжений в зоне влияния горных выработок;
- 3) определение пространственных особенностей полей НДС (зон концентраций напряжений, параметров зоны опорного давления и др.);
- 4) определение компонент НДС в различных конструктивных элементах систем разработки (целиках, кровле, системе «крепь-порода» и др.);
- 5) мониторинг изменения параметров НДС в конструктивных элементах на различных временных промежутках.

Информация о компонентах тензора напряжений массива в его естественном состоянии обычно используется при верификации геомеханических моделей на этапе проектирования различных подземных сооружений и систем разработки полезных ископаемых. Такая информация может быть получена с поверхности, либо из существующих горных выработок на достаточном удалении от их контура, и должна максимально точно отражать все особенности НДС. Наибольшую же важность контроль напряжений приобретает в вопросах обеспечения безопасности ведения горных работ и устойчивости выработок. В этом случае не всегда требуется определять все компоненты тензора напряжений, а достаточно точно контролировать один или несколько наиболее важных параметров (изменение положения зоны опорного давления, приращение напряжений в заданной точке, изменение направления максимального сжимающего или растягивающего напряжения и т.п.). При этом с точки зрения обеспечения безопасности приоритет должен отдаваться массовости таких измерений и возможности осуществления мониторинга в дискретном или непрерывном режиме. Это накладывает некоторые ограничения на выбор методов

контроля, т.к. далеко не все из них адаптированы к широкому и многократному применению в рамках одного объекта в виду сложности, трудоемкости и высокой стоимости проведения измерений. Ниже приведен анализ используемых на сегодняшний день инструментальных методов контроля НДС приконтурного массива пород и дана оценка областей их применения и основных ограничений.

1.1 Методы оценки параметров НДС на основе анализа геологической информации

Для приближенной оценки параметров напряженно-деформированного состояния породного массива часто можно использовать набор методов, обобщенно называемых «геологическими». Как правило, первичный анализ НДС проводится исходя из априорной информации о геологическом строении породного массива, глубине и особенностях тектоники в указанной области [1]. Также важную роль играет сейсмическая активность района исследования. Для районов с высокой и повторяющейся сейсмической активностью характерны большие величины касательных напряжений [2].

Более детальный анализ НДС можно произвести на основе результатов бурения скважин. Одним из широко используемых подходов для экспресс-оценки величин напряжений является анализ дискования керна (дробление на разные по толщине диски) [2–5]. Метод является весьма приближенным, однако отличается малыми трудозатратами, так как анализу, как правило, подлежат керны, выбуриваемые для других целей (изучения минералогического состава, строения пород, и т.п.).

Наиболее развитым методом, который можно отнести к геологическим, можно считать метод изучения разрушений стенок скважины (Borehole breakout method). Метод основан на анализе состояния стенок скважин (как правило глубоких скважин, пробуренных с поверхности). Инструментальное изучение производится с применением оптических зондов, акустических телевьюеров, профилометров и других систем, позволяющих оценить форму

и размеры частичного разрушения стенок скважины. В основу метода положена замеченная в 1964 г. Е. Лиманом закономерность образования вывалов стенок скважины, направление которых ортогонально направлению действия максимального напряжения, действующего в плоскости, перпендикулярной оси скважины [6]. Дальнейшее развитие метода заключалось в теоретическом обосновании влияния типов пород, способов бурений, геологического строения массива на размеры и форму нарушений, а также на уточнение количественных связей параметров нарушений и величин действующих в массиве напряжений [7–12]. Основным достоинством метода можно считать доступность его реализации, т.к. в той или иной степени получение информации о геометрии скважины является частью многих технологических процессов, а также геофизических исследований в скважинах (ГИС). С другой стороны, локальные неоднородности и вариации свойств пород не позволяют добиться высокой точности и повторяемости результатов измерений параметров НДС.

В целом, геологические методы не позволяют получать точные оценки величин и направлений главных напряжений в массиве горных пород, однако в виду своей относительно невысокой трудоемкости могут и должны быть использованы на начальных этапах изучения полей напряжений.

1.2 Анализ геомеханических методов изучения НДС приконтурного массива

1.2.1 Измерение величин и направлений главных напряжений

К геомеханическим относят методы, в той или иной степени предполагающие измерение деформаций пород или давлений в гидравлических системах контроля. Основу геомеханических методов составляют методы разгрузки, развитие которых начинается с 30-х годов прошлого века. За почти столетнюю историю их применения накоплен колоссальный опыт проведения измерений, а также разработаны десятки

вариантов их реализации. В основе всех методов разгрузки лежит эффект восстановления формы и размера участка породы, частично или полностью отделенного от вмещающего массива. При этом механические напряжения оцениваются через инструментально измеряемые деформации и априорно определенные физико-механические свойства пород в зоне проведения измерений. Для успешной реализации методов разгрузки необходимо соблюдение двух основных условий: должна быть установлена однозначная связь между деформациями и напряжениями в исследуемой породе; измерительное оборудование должно обладать достаточной чувствительностью для регистрации малых по величине деформаций.

Первый опыт применения метода разгрузки был предпринят при контроле напряжений на гидротехнических объектах Р. Лоуренсом [13] в варианте частичной разгрузки. Подобный метод подразумевает создание разгрузочных щелей или отверстий на поверхности обнажения и регистрацию деформаций между заранее установленными реперами. Развитием метода щелевой разгрузки можно считать набор так называемых компенсационных методов, в которых в оборудованную щель помещается домкрат и окружающий массив нагружается до полного восстановления деформаций разгрузки. По развиваемому давлению судят о напряжениях в массиве [14–16].

Наиболее распространенным можно считать вариант частичной разгрузки, предложенный Ж. Талобром [17], предполагающий бурение центрального отверстия большого диаметра и измерение деформаций между реперами, находящимися в вершинах равностороннего треугольника. Дальнейшее развитие метод получил в работах М.В. Курлени, Н.П. Влоха и А.Д. Сашурина [18–21]. Более сложный в реализации, но более точный способ был предложен В. Дюваллем [22]. Указанный способ предполагал бурение центральной скважины диаметром 150 мм и измерение деформаций между шестью реперами, установленными равномерно вокруг отверстия с шагом 60°. Методы частичной разгрузки отличаются относительно простотой

реализации (особенно в части регистрации деформаций, которая может быть выполнена с помощью модернизированных датчиков перемещения часового типа или простейших тензометров). Однако основным ограничением указанного метода является необходимость работы на поверхности обнажения, т.е. в зоне техногенной нарушенности, которая вносит существенные искажения в поле напряжений. Указанный недостаток также справедлив и для методов разгрузки щелью, в котором измеряются деформации после разгрузки участка массива прямоугольной или полукруглой щелью [23–25].

Принципиально решить проблему влияния нарушенной приконтурной зоны удалось с переходом к скважинным методам разгрузки. С 1950-х годов начинает развиваться метод разгрузки, предполагающий наклейку на торец скважины набора тензометрических датчиков и последующее обуривание керна с целью создания условий для его разгрузки. В нашей стране такая схема известна как схема ВНИМИ [26–29], за рубежом – как Doorstopper Gauge System [30–32]. Использование измерительных скважин позволило проводить измерения как в зоне опорного давления, так и за ее пределами в зоне естественных напряжений. Однако схема ВНИМИ фактически предполагает решение плоской задачи. Развитием скважинных методов разгрузки можно считать схему Е. Лимана (South African CSIR triaxial strain cell) [33–37], позволившую перейти к трехосным измерениям деформаций упругого восстановления керна. При реализации схем ВНИМИ и Лимана из-за использования клея измерительная часть является одноразовой и теряется после завершения измерений. Более поздние разработки [38] позволили сделать измерительную систему частично многоразовой, оставляя одноразовой только эпоксидную часть, содержащую розетки тензорезисторов. Промежуточным решением между схемами ВНИМИ и Лимана можно считать предложенную С. Кобаяши схему измерений с наклейкой тензорезисторов на коническую поверхность, подготовленную специальной фрезой в торце скважины [39]. Следует отметить, что широкое

распространение скважинные методы разгрузки получили только с началом повсеместного использования многоазовых скважинных деформометров, предложенных Н. Хастом (USBM gage) [40–42]. Указанный метод предполагает бурение шпура и размещение в нем скважинного деформометра. После снятия первоначальных показаний участок породы с центральной скважиной обуривают кольцевой щелью и производят повторные измерения деформаций. Более поздние конструкции деформометров, предложенные Т. Канагавой [43], позволяли также измерять продольные деформации разгружаемого керна. В настоящий момент схема Хаста является наиболее распространенным вариантом реализации скважинных методов разгрузки при контроле напряжений в породном массиве. Некоторые экзотические варианты скважинных методов разгрузки, такие как скважинная щелевая разгрузка (borehole slotting) [44,45], не нашли широкого применения из-за высокой стоимости и сложности используемого оборудования.

Несмотря на большой накопленный опыт применения скважинных методов разгрузки и разнообразие конструкций измерительных зондов, их реализация все еще является крайне трудоемким процессом. К основным недостаткам метода можно отнести высокие требования к процессу бурения, сложность и дороговизна используемого измерительного оборудования, опасность слома керна в процессе бурения, приводящая к потере данных, сильная зависимость результатов от качества определения физико-механических свойств пород в зоне проведения контроля. Кроме того, для определения величин и направлений главных напряжений в массиве как правило требуется проводить измерения в серии разнонаправленных измерительных скважин. Недавние широкомасштабные исследования на угольном бассейне Кайпинг (КНР) [46] также указывают на значительный (превышающий 50%) разброс получаемых указанным методом оценок напряжений.

Другим широко используемым способом контроля параметров НДС массива является применение различных гидравлических методов. К последним обычно относят метод гидроразрыва, метод гидроразрыва на существующих трещинах (hydraulic tests on pre-existing fractures, НТРФ) и гидроразрыв с использованием эластичных рукавов (sleeve fracturing method, SFM). При этом подавляющее число измерений напряжений in-situ производится стандартным методом гидроразрыва. Суть метода заключается в нагнетании жидкости на интервале измерительной скважины, ограниченном двумя пакерами, до образования разрывного нарушения, ориентация которого, как правило, совпадает с направлением действия максимального главного напряжения. О величине действующего напряжения судят по давлению в гидросистеме в момент образования разрывного нарушения. Направление магистральной трещины определяют с применением скважинной телевизионной аппаратуры или с помощью высокочастотных акустических телевьюеров.

Исторически методы гидроразрыва основываются на принципах гидравлической интенсификации пластов, применяемой при добыче углеводородов и предложенной Дж. Кларком в 1949 г. [47]. Развитие метода для оценки напряженно-деформированного состояния пород на большой глубине отражено в работах К. Хуберта, Д. Уиллса, А. Шайдеггера и др. [10,48–53]. Более компактные измерительные устройства, пригодные для измерения напряжений в скважинах, пробуренных из горных выработок, предложены Дж. Энвером и др. [54]. В состав подобного оборудования как правило входит набор пакеров, ручная помпа, комплект соединительных рукавов высокого давления, измерительный блок и другие вспомогательные компоненты.

В нашей стране большой вклад в развитие метода гидроразрыва внесен А.В. Леонтьевым, М.В. Курленей, С.Н. Поповым [55–58], предложивших оригинальные конструкции измерительных комплексов и обосновавших принципы проведения измерений в шахтных условиях.

Условиями реализации метода гидроразрыва являются: необходимость ориентации скважины вдоль одного из главных напряжений; породы должны быть крепкими и низкотрещиноватыми; скорость нагружения должна значительно превышать скорость фильтрационных процессов [58].

Развитием метода гидроразрыва можно считать метод НТРФ, основы которого предложены Ф. Корнетом и Б. Валеттом [59]. Теоретически, использование существующих трещин, пересекающих скважину, позволяет оценить все компоненты тензора напряжений в трехмерной постановке. В действительности, для реального определения величин и направлений главных напряжений в двумерной постановке требуется проведение не менее 6 отдельных измерений в скважине. Для перехода к трехмерной постановке требуется уже не менее 10-12 отдельных измерений [60], что делает рассматриваемый метод исключительно трудоемким [59,61–64].

Отчасти требования к проведению измерений на низкотрещиноватых породах могут быть сняты при реализации варианта гидроразрыва с использованием эластичных рукавов. В этом случае рабочая жидкость не контактирует с породами напрямую, а давление передается через резиновую оболочку [65,66]. Основным недостатком метода можно считать малозаметный перепад давления в момент образования разрыва, а также смятие пород на контуре скважины, затрудняющее последующий анализ ориентации образовавшейся трещины.

Еще одним геомеханическим способом оценки направлений действующих напряжений является метод изучения упругого восстановления керна после его извлечения из массива (Anelastic strain recovery, ASR). В основе метода лежит эффект образования ориентированных микротрещин, вызванных деформациями восстановления. Однако, на интенсивность и направление трещинообразования обычно оказывают влияние множество факторов, среди которых: температура, содержание влаги, поровое давление флюида, анизотропия, точность ориентации керна [67,68]. В целом из-за

сложности реализации и необходимости учета множества параметров метод не нашел широкого распространения.

1.2.2 Методы инструментального контроля приращений напряжений

При решении задач обеспечения безопасности эксплуатации горных выработок часто встает задача наблюдения за изменением компонент НДС в приконтурном массиве и конструктивных элементах систем разработки (столбчатых и ленточных целиках, кровле и т.п.). Такие изменения могут происходить относительно быстро при перераспределении напряжений из-за ведения горных работ или проявления динамических явлений. Также изменения параметров НДС могут носить длительный характер на фоне развития процессов выветривания и частичного разрушения пород на границе с выработками.

Задачи оценки приращений напряжений решаются рядом методов, основными из которых являются метод скважинных деформометров, метод гидравлических датчиков и метод упругих скважинных датчиков. Все указанные методы не предназначены для определения абсолютных значений величин главных напряжений, зато в той или иной степени могут быть использованы для мониторинговых наблюдений. При этом обычно различают дискретный и непрерывный мониторинг. Первый вид мониторинга подразумевает произведение измерений в одной и той же точке через равные интервалы времени, второй – получение непрерывной информации о напряжениях (часто в автоматизированном или полуавтоматизированном варианте).

Метод скважинных деформометров основан на размещении устройства измерения деформаций в скважине на постоянной основе. В качестве измерительных устройств могут быть использованы деформометры, использующиеся при реализации методов разгрузки керна по схемам ВНИМИ, Хаста и Лимана, разработанные у нас в стране [69–71] и за рубежом

[72–74]. Также могут быть использованы различные конструкции струнных деформометров [75–80]. Вне зависимости от конструкции используемого деформометра переход от измеренных деформаций к величинам приращений напряжений производится на основе заранее определенных упругих модулей пород. Несмотря на большое количество разработанных за последние 50 лет конструкций деформометров, у подобного метода контроля есть ряд существенных недостатков. Во-первых, точность и надежность измерений деформаций в значительной степени зависит от качества контактных условий между деформометром и стенкой скважины. В работах [81,82] отмечается, что достаточная надежность измерений может быть гарантирована только при использовании клеевого контакта или цементирования. В этом случае сложный и дорогостоящий деформометр фактически превращается в одноразовый. Во-вторых, конструкции деформометров подвержены агрессивным воздействиям повышенных температур и влажности [75,83]. В целом, использование скважинных деформометров является эффективным способом оценки приращений напряжений, однако трудоемкость и стоимость проведения контроля остаются высокими.

Другим подходом к наблюдению за изменением напряженно-деформированного состояния является использование скважинных гидравлических датчиков. Суть метода заключается в размещении в скважине толстостенного резинового рукава, заполненного маслом и подключенного к манометру в устье скважины. Рост механических напряжений приводит к росту давления в гидросистеме, которое можно зафиксировать манометром. Большой вклад в развитие гидравлических датчиков принадлежит сотрудникам ИГД СО РАН В.К. Аксенову, М.В. Курлене, В.К. Федоренко и др. [84–88]. Теоретические выводы свидетельствуют о том, что изменение давления жидкости в датчике пропорционально полусумме экстремальных (квазиглавных) напряжений, действующих в нормальной к оси скважины плоскости. При этом направление напряжений не определяется и не учитывается.

Еще одним методом контроля изменения НДС является так называемый метод упругих датчиков (stressmeters) – устройств в виде дисков, жестко клеиваемых в измерительную скважину и воспринимающих деформации по всей поверхности их образующей. По соотношению модулей упругости упругих датчиков, рассматриваемых как упругие включения, и вмещающей породы различают жесткие датчики (stiff inclusions) и деформируемые датчики (deformable inclusions). В первом случае модуль упругости датчика должен быть в 4-5 раз выше, чем модуль упругости окружающих пород [89]. Соблюдение этого условия теоретически позволяет утверждать, что изменение напряжения во включении пропорционально изменению напряжения в окружающем материале независимо от его модуля упругости. На практике в обязательном порядке приходится учитывать толщину и свойства клеевого слоя, используемого для крепления датчика. Применение жестких упругих включений впервые предложено А. Коутиньо в 1949 г. для измерений напряжений в бетоне [90]. Как правило, материалом упругих датчиков служат толстостенные трубы из латуни [91] или стали [92], снабженные розетками тензорезисторов.

Отдельным подвидом жестких упругих датчиков следует считать датчики из фотоупругих материалов (photoelastic stressmeters). В качестве чувствительных элементов используются специальные материалы, в которых проявляется эффект фотоупругости - явления искусственного двойного лучепреломления поляризованного света при деформации. Фактически, фотоупругие датчики являются двухосевыми тензометрами, позволяющими на основе анализа оптической картины, наблюдаемой через специальные полярископы, определять величины и направления приращений напряжений, действующих в плоскости, ортогональной оси скважины. Предложенные А. Робертсом в 1964 г. [93] фотоупругие тензометры получили широкое развитие при измерении напряжений [94–97]. В нашей стране большой вклад в развитие фотоупругих тензометров внесен В.Ф. Трумбачевым и Г.А. Катковым [98]. Работы с датчиками активно велись в ИГД СО РАН [99,100],

ВостНИГРИ [101] и ИГД г. Екатеринбург [29,102]. Использование фотоупругих датчиков в сочетании с методами разгрузки описывается в работах С.В. Гужовой и Г.И. Кулакова [103,104].

Основным ограничением применения фотоупругих датчиков является выполнение условия четырехкратного превышения модулем упругости датчика модуля упругости вмещающих пород, что определяет верхний предел модуля пород в 17.5 ГПа [89]. Кроме того, превышение напряжениями уровня 20 МПа приводит к разрушению датчиков [105].

В отличие от жестких упругих включений, модуль упругости деформируемых упругих включений должен быть меньше, чем у вмещающих пород. Использование деформируемых датчиков для мониторинга изменения напряжений основано на математически обоснованном предположении, что если бесконечная линейно-упругая изотропная среда, содержащая идеально связанное одиночное эллиптическое или эллипсоидальное твердое включение, подвергается напряжениям на бесконечности, то поле напряжений во включении является однородным [106]. В более поздних работах это предположение было обобщено и для анизотропных сред [107]. В качестве чувствительных элементов обычно используются цилиндры из эпоксидной смолы, снабженные тензорезистивными датчиками деформаций различного количества и ориентации. Надежность измерений определяется непрерывностью механического контакта датчика со стенками скважины и устойчивостью электрических компонентов датчика к агрессивному влиянию влажности и температуры. В работе [82], в частности, указывается на низкую надежность таких датчиков.

1.3 Опыт применения геофизических методов контроля параметров НДС массива горных пород

Большинство описанных в п. 1.2 геомеханических методов контроля проводятся на малых объемах пород.. Таким образом, возникает проблема низкой повторяемости результатов при проведении многократных измерений

в различных точках массива, вызванная неоднородностью его свойств. Этому недостатка, как правило, лишены геофизические методы, в основу которых заложена взаимосвязь между изменением механических параметров пород (плотности, пористости, уровня дефектности) и параметров физических полей различной природы. Такие методы могут представлять информацию о некоторых параметрах НДС на больших базах измерений. Ниже приведен анализ опыта применения различных геофизических методов при решении задач контроля напряжений в приконтурной области массива горных пород.

1.3.1 Радиометрический метод контроля НДС

Одним из способов исследования напряжений в горных породах является так называемый радиометрический метод. В его основе лежит явление ослабления радиоактивного излучения с повышением плотности пород, которая в свою очередь является функцией механических напряжений. Для проведения радиометрического контроля, как правило, используется гамма-излучения ввиду низкой проникающей способности α - и β -излучения [108,109]. Метод реализуется в виде скважинных каротажных измерений специальными радиометрическими зондами. Опыт натурных измерений напряжений в породном массиве радиометрическим методом описан в работе Л. Шимона и В. Сибека [110]. Экспериментально продемонстрирована связь между частотой импульсов гамма-излучения и величиной приращений механических напряжений, развиваемых гидродомкратом. В целом метод позволяет оценивать положение зон концентрации напряжений и их величины (при условии априорного определения тарировочных зависимостей). При этом широкого применения метод не нашел из-за организационных сложностей работы с радиоактивными изотопами, а также необходимости учета исходного уровня трещиноватости исследуемого массива.

1.3.2 Электрометрические методы контроля НДС

Еще одним методом, позволяющим производить контроль достаточно больших объемов горных пород, является метод электрометрии. В основе метода лежит взаимосвязь между электрическими свойствами пород и механическими нагрузками [111–113]. Учеными КузГТУ экспериментально установлена зависимость электрических свойств угольных пластов от параметрами их геомеханического состояния [114,115]. Была также экспериментально и теоретически обоснована линейная зависимость потенциала стационарного электрического поля от компонент тензора напряжений [116,117]. При оценке параметров НДС в подземных условиях может быть использован скважинный метод электрометрии. Так, в [117] описываются подходы к определению протяженности зоны опорного давления на основе измерения естественного электрического поля земли. Там же приводится эмпирическая формула, связывающая величину нормальных к угольному пласту напряжений, геометрию, механические свойства пласта и протяженность зоны пониженных напряжений, которую предлагается оценивать по кривой распределения электрического потенциала в зоне влияния выработки. В [118] приводится анализ достаточно большого объема экспериментальных исследований включающий результаты определения НДС электрическими методами на шахтах Кузбасса.

На практике применяются три основных метода электрометрического контроля параметров НДС приконтурного массива. Первый предназначен для определения зоны максимума опорного давления. В этом случае измерение градиента электрического потенциала пород производят по все глубине измерительной скважины. Зону опорного давления определяют по пересечению измеренным градиентом горизонтальной оси [119]. Два других метода относятся к методам мониторинга склонности пласта к проявлению динамических явлений [120,121]. При этом о состоянии пласта судят по

относительным изменениям электрических свойств без перехода к абсолютным значениям напряжений.

Использование взаимосвязи механических напряжений и электрических свойств пород для оценки параметров НДС породных массивов нашло отражение в работах зарубежных ученых. Так, в работах [122–124] приводятся попытки оценки НДС с привязкой к очагам землетрясений. Недавние исследования демонстрируют положительный опыт применения скважинных электрических измерений для оценки пространственного распределения зон концентрации напряжений в приконтурной зоне массива [125].

В целом, контактные электрометрические методы нашли наибольшее распространение на угольных месторождениях при оценке удароопасности пластов и оценке глубины зоны опорного давления.

Еще одним электрическим методом изучения НДС является метод электромагнитной эмиссии (ЭМИ). Метод основан на явлении возникновения электромагнитных импульсов при появлении новых и росте существующих трещин в исследуемой среде. Таким образом, связь ЭМИ с механическими напряжениями устанавливается через дефектообразование. Первое упоминание электромагнитных эффектов при нагружении непьезоэлектрических материалов можно найти в работах А.В. Степанова [126]. Наиболее широкое использование метод ЭМИ получил при прогнозе динамических явлений – горных ударов и выбросов газа на угольных пластах [127–131]. Также экспериментально подтверждена связь между напряжениями в породном массиве и характеристиками сигналов ЭМИ [132], в частности в скважинном варианте исполнения метода при контроле положения зоны опорного давления [133]. Недавние исследования [134] демонстрируют эффективность метода для оценки пространственного распределения концентраций напряжений вокруг подземных тоннелей с железобетонной крепью. Метод также может быть использован в режиме непрерывного мониторинга за изменением параметров НДС с

использованием стационарных датчиков ЭМИ, встраиваемых в крепь [135].
Оценку абсолютных значений напряжений предлагается производить по тарировочным зависимостям, получаемым на образцах.

В целом, метод ЭМИ получил относительно широкое распространение на фоне своего основного достоинства – возможности организации бесконтактных измерений, не требующих проведения подготовительных операций. Вместе с этим, метод ЭМИ оказывается крайне чувствительным к электромагнитным помехам различной природы, а также требует проведения сложных экспериментальных исследований для определения тарировочных зависимостей на образцах. Точность перехода от параметров зарегистрированных импульсов ЭМИ к величинам действующих напряжений также остается дискуссионным вопросом.

1.3.3 Акустические методы изучения напряженно-деформированного состояния

Из всех геофизических методов контроля НДС наиболее широкое применение и глубину теоретической и экспериментальной проработки получила группа акустических методов.

Влияние механических напряжений на параметры распространения упругих волн в твердых телах проявляется на различных масштабных уровнях. Теоретически эффект влияния напряжений на скорости упругих волн был предсказан в первой половине XIX в. Г. Грином [136]. Математическая теория, позволяющая накладывать малые смещения, вызванные распространением упругих волн, на деформации среды, вызванные приложенным давлением, предложена Ф. Мурнаганом и писана в работах [137,138]. Позднее в работах Д. Хьюза и Дж. Келли [139] были получены конкретные соотношения для продольной V_{px} и поперечной V_{sx} волн, поляризованных вдоль оси x , совпадающей с направлением сжимающего напряжения σ , действующего в изотропной среде

$$V_{px} = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3K_0} \left(2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} \cdot (4m + 4\lambda + 10\mu) \right), \quad (1.1)$$

$$V_{sx} = \mu - \frac{T}{3K_0} \left(m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\lambda \right), \quad (1.2)$$

где λ, μ – константы упругости Ламе второго порядка, l, m, n – константы упругости третьего порядка (константы Мурнагана), $K_0 = (3\lambda + 2\mu)/3$ – модуль объемной упругости до приложения нагрузки, T – величина сжимающих напряжений.

Аналогичные выражения были получены для осей y и z , лежащих в плоскости, ортогональной оси приложения нагрузки

$$V_{py} = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} \left(2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right), \quad (1.3)$$

$$V_{sy} = \mu - \frac{T}{3K_0} \left(m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right), \quad (1.4)$$

$$V_{sz} = \mu - \frac{T}{3K_0} \left(m - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - 2\lambda \right). \quad (1.5)$$

Из соотношений 1.1 – 1.5 видно, что изначально изотропный материал начинает проявлять свойства анизотропии распространения упругих волн при возникновении в нем механических напряжений. Указанные закономерности были экспериментально подтверждены на образцах различных изотропных материалов [139,140].

Эффект пропорциональности ортогональных поперечных волн главным напряжениям, описываемый соотношениями (1.3)-(1.5), был назван Р. Бенсоном и В. Рилсоном «акустоупругим эффектом» [140]. Указанное название (или просто «акустоупругость») закрепилось в литературе для обозначения теории и методов определения параметров НДС, основанных на связи параметров распространения упругих волн с механическими напряжениями и упругими константами Ламэ и Мурнагана.

Теория акустоупругости нашла широкое применение при оценке одноосного и плосконапряженного состояния различных металлических

конструкций и изделий [141–143]. При этом, как правило, реализовываются два подхода к измерению напряжений.

Первый подход связан с оценкой изменения скорости продольной волны $\Delta V_p/V_p$ с ростом напряжений. Величина $\Delta V_p/V_p$ имеет порядок 10^{-4} (т.е. 0,01%), что делает процесс измерения скоростей крайне сложным. Как правило, для достижения такой точности требуется анализировать многократно отраженный сигнал, распространяющийся в образцах с плоскопараллельными границами [144].

Второй подход заключается в измерении разности фаз прихода поперечных волн, плоскости поляризации которых совпадают и ортогональны вектору приложения нагрузки [141, 143, 145]. В этом случае разность их скоростей будет пропорциональна разности главных напряжений.

Следует отметить, что теория акустоупругости оперирует средами, в которых соблюдается условие неразрывности деформаций, а, значит, отсутствуют внутренние дефекты в виде пустот. При этом для большинства конструкционных материалов (металлов, пластиков, стекла и др.) основные уравнения теории удовлетворительно подтверждаются экспериментальными измерениями ввиду малого размера и количества пустот в таких материалах. Развитие теории акустоупругости можно проследить в работах [146–148], в которых вводится понятие «акустоповрежденности». Для этого был введен скалярный параметр поврежденности, описываемый через плотность равномерно распределенных в единице объема микродефектов, приводящий к дисперсии акустической волны. Введение параметра поврежденности позволило использовать элементы теории акустоупругости для измерения напряжений в средах с большим количеством равномерно распределенных микродефектов, таких как полимерные композиты [149].

В отличие от металлов и композитов, горные породы отличаются разномасштабной дефектностью, сложно поддающейся строгому математическому описанию. При этом изменение скоростей упругих волн, вызванное закрытием пор и трещин под действием внешних нагрузок, может

превышать 10%, что на три порядка больше, чем наблюдается в изотропных конструкционных материалах [150] и описывается теорией акустоупругости. Отмеченное сильно ограничивает применение теории акустоупругости для реальных измерений напряжений в горных породах.

При механическом нагружении горных пород обычно выделяют пять основных стадий деформирования [150–156]: I - стадия закрытия трещин и пор, характеризующаяся начальной нелинейной областью; II - упругая стадия, во время которой деформация пропорциональна приложенному напряжению (справедливы основные уравнения теории акустоупругости); III - стадия зарождения трещин, в рамках которой рост микротрещин происходит в стабильном режиме (для продолжения роста требуется увеличение нагрузки) и начинается необратимое повреждение породы; IV – стадия перехода трещин к нестабильному режиму роста (рост трещин становится непредсказуемым и не зависит от приложенной нагрузки); V – стадия окончательного разрушения породы. Границы этих зон в значительной степени зависят от генезиса породы. В [157] отмечается, что для большинства пород III стадия проявляется при напряжениях 30% - 60% от предела прочности на одноосное сжатие. В [158,159] также отмечается, что стадии III и IV в большей степени отражают свойства породы и слабо связаны со скоростью нагружения, размера образца и др. параметров, связанных с экспериментальным изучением механических свойств пород.

Изменение уровня дефектности породы в процессе нагружения приводит к изменению ее акустических свойств. Многочисленные исследования демонстрируют влияние пористости и трещиноватости на скорости, амплитуды и спектральные характеристики акустических сигналов, распространяющихся в горных породах [150, 156,160–166]. С другой стороны, изменение уровня дефектности пород приводит к генерации акустических колебаний, источниками которых являются индивидуальные трещины. В этом случае количество, спектральные и энергетические характеристики таких зарегистрированных импульсов также несут

информацию о стадии деформирования породы, а значит косвенно указывают на параметры ее напряженно-деформированного состояния [167].

Все вышесказанное указывает на высокую практическую ценность изучения акустических свойств пород как инструмента оценки их напряженно-деформированного состояния.

Натурные акустические методы контроля НДС по характеру источника акустического сигнала делятся на активные и пассивные.

В активных методах источником зондирующего сигнала является некоторое устройство, являющееся частью измерительного комплекса и обладающего заранее известными и управляемыми характеристиками. В зависимости от частотного диапазона используемых сигналов активные методы разделяют на сейсмические и ультразвуковые.

При пассивных измерениях источником сигнала являются внутренние дефекты и неоднородности массива пород, образование и развитие которых приводит к формированию акустических сигналов самого широкого частотного диапазона. Методы контроля, оперирующие в звуковом и сейсмоакустическом диапазонах, принято называть звукометрическими (сейсмоакустическими или сейсмическими), в то время как регистрацию и анализ пассивных сигналов в ультразвуковом диапазоне относят к методу акустической эмиссии (АЭ).

В основе активных сейсмических методов лежит эффект влияния напряженного состояния на упругие характеристики пород. Сжимающие напряжения приводят к смыканию пор и трещин, увеличивая модуль упругости, что, как следствие, приводит к росту скоростей упругих волн [168]. Натурные сейсмические измерения обычно реализуются по схемам томографического просвечивания между профилями, расположенными в различных горных выработках [169], либо в специально оборудованных измерительных скважинах [170]. В обоих случаях результатом соответствующей обработки становится разрез массива пород в величинах скоростей продольных или поперечных волн между профилями, состоящими

из точек излучения и приема. Локальное увеличение скоростей, выявляемое на томографическом разрезе, может свидетельствовать о наличии зоны концентрации напряжений. Переход от значений скоростей к величинам напряжений производится на основе получаемых на образцах корреляционных зависимостей, решения аналитических задач [171], а также компьютерного [172] и физического [173] моделирования. Основными недостатками метода можно считать ограниченные возможности по выбору направления сейсмического просвечивания, а также сложность сопоставления скоростей упругих волн, получаемых in-situ сейсмическими методами и определяемых на образцах с применением ультразвука [174].

Применение пассивных сейсмических (звукометрических) измерений основано на эффекте возникновения акустических сигналов сейсмоакустического диапазона частот в массиве горных пород под действием горного давления. В качестве информативных параметров таких сигналов используются количество импульсов, зарегистрированных за единицу времени, а также их энергетические, спектральные и статистические характеристики [175]. Анализ зарегистрированных сейсмоакустических сигналов позволяет выделять зоны концентрации напряжений, а также классифицировать массивы по склонности к проявлению динамических явлений, а также прогнозировать их возникновение [176–178]. При переходе к абсолютным значениям используются тарировочные зависимости, устанавливаемые априорно в процессе звукометрических экспериментов на образцах горных пород [179]. В последнее время для верификации сейсмических данных также стали использоваться данные каротажа скважин [180] и результаты применения геомеханических методов исследования НДС [181]. Инверсия сейсмических данных производится разнообразными методами, среди которых преобладают линейная [182], поиск по сетке [183], PTGS [184] и др. В результате соответствующих преобразований оказывается возможным определить направления главных напряжений, а также оценить их величины. Пассивный сейсмический метод в наибольшей степени

подходит для характеристики НДС больших объемов пород в районах, склонных к микросейсмической активности. Также звукометрические измерения доказали свою эффективность при производстве мониторинговых измерений с целью прогнозирования динамических явлений. К сожалению, точность метода в значительной степени основывается на большом объеме априорных данных, получаемых в результате реализации других методов контроля, а также от качества и количества регистрируемых сейсмоакустических событий. Так, например, при реализации метода вблизи тоннеля Дуоксионгла (КНР) из 3887 зарегистрированных групп событий пригодными для анализа оказались лишь 42 [184].

1.3.3.1 Акустико-эмиссионные методы контроля НДС массива пород

В общем случае механическое нагружение твердых тел сопровождается высвобождением части энергии в виде акустических сигналов широкого диапазона частот, называемых акустической эмиссией. Источником таких сигналов являются зарождающиеся и растущие трещины, фрикционные процессы на берегах трещин, а также дислокационные механизмы, характерные для пластичных материалов. Для горных пород наиболее распространённым механизмом АЭ является образование и рост трещин по границам зерен [185]. В основе акустико-эмиссионного метода измерения напряжений лежит так называемый акустико-эмиссионный эффект памяти (АЭЭП), также называемый эффектом Кайзера (ЭК), открытый Дж. Кайзером в 1953г. [186]. Эффект заключается невоспроизводимости параметров АЭ в процессе нагружения при напряжениях, меньших максимально достигнутого ранее значения. Другими словами, горная порода при извлечении из массива способна «запоминать» ранее испытанные напряжения и воспроизводить информацию об их величинах в процессе повторного нагружения в виде резкого всплеска активности АЭ в момент достижения нагрузкой некоторого критического значения σ^* , равного максимальному напряжению

предшествующего цикла нагружения σ^I . Д. Холкомбом и Р. Мартином было показано, что отчетливое проявление АЭЭП наблюдается лишь в том случае, когда тестовое (повторное) нагружение полностью эмитирует условия первоначального напряженного состояния пород [187]. Направления приложения нагрузки в обоих циклах нагружения также должны совпадать [188].

Изучением механизмов формирования и проявления АЭ памяти начиная с 1980-х годов занимались многие ученые. Одним из подходов является использование взаимосвязи между количеством акустических событий и статистической оценкой распределения напряжений, продемонстрированной С. Тэнгом и др. в работе [189]. Продолжением этого подхода можно считать работу Р. Юана и Ю. Ли [190], в которой на основании анализа статистического накопления поврежденности выводится выражение, связывающее суммарное количество разрушенных в i -ом цикле нагружения структурных элементов N_i в породе в функции от величины напряжения σ в i -ом цикле нагружения

$$\frac{N_i}{N} = \begin{cases} 0, \sigma \leq \sigma_{(i-1)} \\ \int_{\sigma_{(i-1)}}^{\sigma} \Phi(t) dt, \sigma > \sigma_{(i-1)} \end{cases} \quad (1.6)$$

где $\sigma_{(i-1)}$ – величина нагрузки в $i-1$ цикле нагружения, N – суммарное количество разрушенных элементов, $\Phi(t)$ – вероятность разрушения элемента.

Более детальное изучение механизмов формирования АЭ памяти можно произвести на основе анализа различных моделей трещин и их взаимодействия с механическими напряжениями. Наиболее простая модель в виде дискообразной трещины, направленной вдоль оси максимального напряжения, предложена Л. Костиным в работе [191]. На основе этой модели Д. Холкомбом в работе [192] был обоснован ряд закономерностей формирования АЭЭП при трехосном нагружении породы в I цикле и одноосном – во II цикле:

- для случая всестороннего осесимметричного сжатия ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) величина σ_1^{II*} , при которой проявляется АЭЭП во втором цикле, линейно зависит от бокового давления σ_3 ;

- в случае $\sigma_1^I = \sigma_2^I > \sigma_3^I$, при одноосном нагружении вдоль осей σ_1 и σ_2 АЭЭП не проявляется.

Указанные закономерности позволили утверждать, что в случае одноосного нагружения образца вдоль максимального главного напряжения во втором цикле нагружения возможно определить линейную комбинацию двух оставшихся главных напряжений.

В других исследованиях для объяснения механизма АЭЭП используется более сложная модель «крылатой» трещины, используемая в работах Д. Холкомба, С. Ли, Б. Пестмана и др. [193–195]. Указанная модель предполагает наличие некоторого количества начальных наклонных трещин. Увеличение нагрузки приводит к возникновению сдвиговых напряжений на берегах трещин и образованию вторичных трещин из вершин исходной в направлении вдоль оси нагружения. Снятие и возобновление нагрузки приводит смыканию и раскрытию таких вторичных трещин, которое сопровождается выделением импульсов АЭ. Наиболее полный писание модели крылатой трещины (в том числе в трехмерной постановке) проведено В.Л. Шкуратником, А.В. Лавровым и Ю.Л. Филимоновым в работах [167,196]. В частности, были установлены следующие важные закономерности:

- для условий одноосного или трехосного осесимметричного ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) напряженного состояния в первом цикле нагружения АЭЭП во втором цикле в режиме одноосного нагружения проявляется при $\sigma_1^{II*} = \sigma_1^I$ (случай одноосного нагружения) и $\sigma_1^{II*} = \sigma_1^I - (k + 1)\sigma_3^I$ (случай трехосного нагружения), где k – безразмерный коэффициент, зависящий от угла трения между берегами трещин;

- для условия трехосного неравнокомпонентного нагружения ($\sigma_1^I > \sigma_2^I > \sigma_3^I$) образец породы «запоминает» разность максимального и промежуточного напряжений σ_1^I и σ_2^I ;

- рост угла между направлениями приложения сжимающих напряжений в I и II циклах нагружения приводит к существенному снижению качества проявления АЭЭП вплоть до его полного исчезновения.

На практике для контроля напряжений в породном массиве используются два подхода. Первый подход заключается в изучении проявления АЭЭП при локальном нагружении стенок измерительной скважины прессиометрами или гидродомкратами, второй - проведение акустико-эмиссионных измерений на извлеченных из массива образцах лабораторных условиях.

Первый подход, заключающийся в анализе АЭ при нагружении стенок измерительной скважины, прослеживается в работах Дж. Макелроя и А. Лорда [197,198]. При этом регистрация АЭ импульсов производилась в соседней скважине, пробуренной параллельно первой. Анализ изменения характера акустической эмиссии в зависимости от направления нагружения позволил установить направления действия напряжений в слабо трещиноватых породах.

Большой вклад в развитие скважинных методов контроля НДС на основе акустико-эмиссионной памяти внесен коллективом ГИ УРО РАН. В частности, в работах В.А. Асанова, В.Н. Токсарова и И.Л. Панькова описывается опыт регистрации акустической эмиссии в процессе нагружения прессиометром стенок скважины, пробуренной в массиве каменной соли. При этом уровень давления, при котором проявлялся АЭЭП, был близок к среднему значению между σ_1 и σ_2 , действующих в плоскости ортогональной оси скважины [199–201]. Основным недостатком использования прессиометра является равномерность прилагаемой им нагрузки по всему контуру скважины, что исключает возможность определения величин и

направлений главных напряжений по-отдельности. Частично решить эту задачу возможно с использованием гидродомкрата. Применению гидродомкрата Гудмана для оценки напряжений методом акустической эмиссии посвящена работа Н.Л. Бельтюкова [202]. При оценке напряжений на соляных породах указанным методом удалось оценить величины вертикальных и горизонтальных напряжений, а также определить глубину максимума зоны опорного давления [203–205]. Метод безусловно можно считать перспективным, однако опыт его применения на данный момент ограничен. Остаются открытыми вопросы его применимости на более прочных и трещиноватых породах, а также оценки степени помехового влияния смятия пород пластинами гидродомкрата на параметры регистрируемой акустической эмиссии.

Наибольший объем исследований НДС породных массивов получен при исследовании извлеченных из измерительных скважин образцов. Подобные исследования проводились в различных странах на протяжении последних 30 лет. При этом результаты таких измерений демонстрируют удовлетворительную сходимость с другими методами измерения напряжений. Так, в [206] демонстрируется подтверждение величин напряжений, определенных методом АЭЭП с помощью метода гидроразрыва по результатам измерений на глубине 4340 м. Аналогичные совпадения описываются в работах [207,208] при изучении напряжений в песчаниках и сланцах на глубине 245 м. В работах [209–211] демонстрируется близость результатов оценки напряжений, полученных АЭ методом и методом разгрузки керн. Недавние исследования образцов, извлеченных с глубин до 500 м, также показывают удовлетворительную сходимость результатов методов АЭЭП, гидроразрыва и разгрузки керн [176,212]. Сравнение результатов метода АЭЭП с методом щелевой разгрузки приведено в работе [213].

В целом оценка параметров НДС массива на основе акустико-эмиссионных измерений на извлеченных образцах пород является

перспективным методом контроля, наибольшая эффективность которого проявляется при исследовании керна, получаемого из глубоких скважин, пробуренных с дневной поверхности. Основным недостатком метода является необходимость подготовки и испытания большого количества образцов (особенно в случае необходимости определения всех компонент тензора НДС), а также довольно высокая стоимость лабораторного оборудования, необходимого для проведения исследований. Кроме того, принципиальным ограничением метода является существенная зависимость акустико-эмиссионных свойств от структуры конкретного образца породы, которая может существенно отличаться даже у образцов, отобранных на одном участке. Такое ограничение может быть снято при условии замены горной породы на материал с контролируемыми механическими и акустическими свойствами. Концептуально такой подход описывается в работах В.Л. Шкуратника и П.В. Николенко [214,215], где в качестве «носителя памяти» используется изотропный композит на основе эпоксидной смолы и кварцевого песка. Тестовые испытания на массиве соляных пород показали, что такой композит, будучи жестко закреплен в измерительной скважине, способен надежно «запоминать» направление и величину приращения максимального напряжения, действующего в плоскости, ортогональной оси скважины [216].

1.3.3.2 Ультразвуковые методы контроля НДС массива пород

Как было отмечено ранее в п. 1.3.3 основной причиной изменения скоростей упругих волн (в частности, продольных) являются деформации, возникающие в результате закрытия каверн, пор и микротрещин под действием нагрузки. Такие деформации в наибольшей степени проявляются вдоль приложения давления (при одноосном сжатии) и вдоль оси максимального главного напряжения (в сложнапряженном состоянии) [217,218]. Таким образом, в изначально изотропных породах формируется скоростная анизотропия, главная ось которой соответствует максимальному

сжимающему напряжению. Такая анизотропия проявляется в магматических [219], осадочных [220] породах и в целом характерна для широкого круга пород различного генезиса [221].

Первоочередной задачей ультразвуковых методов контроля является установления факта появления такой анизотропии и количественной оценки ее параметров. Для этого обычно используют метод межскважинного прозвучивания по трехскважинной схеме [218]. В этом случае значения максимальной V_{Pmax} и минимальной V_{Pmin} скоростей индикатриссы, а также угол α между направлением V_{Pmax} и горизонталью можно найти из системы уравнений

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{2V_1^2 V_2^2 - V_3^2 (V_1^2 - V_2^2)}{V_3^2 (V_2^2 - V_1^2)} \right];$$

$$V_{Pmax} = \sqrt{\frac{V_1^2 V_2^2 \cos 2\alpha}{V_2^2 \cos^2 \alpha - V_1^2 \sin^2 \alpha}}; \quad (1.7)$$

$$V_{Pmin} = \sqrt{\frac{V_1^2 V_2^2 \cos^2 \alpha}{V_1^2 \cos^2 \alpha - V_2^2 \sin^2 \alpha}},$$

где V_1 , V_2 и V_3 – скорости продольных волн, полученные между шпурами на одинаковой глубине от устья скважин. Выражения (1.7) справедливы для случая, если измерительные скважины пробурены вдоль одного из главных напряжений. В случае отсутствия априорной информации о направлении главных напряжений измерения проводят в трех ортогональных направлениях (кровле и стенах выработки), а уравнения (1.7) принимают более обобщенный вид [218]

$$\alpha = \arccos \left(V_{max\text{ ст}} \cos \beta' / \sqrt{V_{max\text{ кр}}^2 + V_{max\text{ ст}}^2 \sin^2 \beta'} \right), \quad (1.8)$$

$$\beta = \arccos \left(V_{max\text{ кр}} \sin \alpha' / \sqrt{V_{max\text{ кр}}^2 + V_{max\text{ ст}}^2 \sin^2 \beta'} \right), \quad (1.9)$$

$$\gamma = \arccos \left(V_{max} \sin \beta' / \sqrt{V_{max\text{ кр}}^2 + V_{max\text{ ст}}^2 \sin^2 \beta'} \right), \quad (1.10)$$

$$V_{max} = \sqrt{V_{max\text{ кр}}^2 + V_{max\text{ ст}}^2 \sin^2 \beta'}, \quad (1.11)$$

где « α , β и γ – углы, образуемые главными напряжениями с осями координат, V_{max} – скорость в массиве вдоль максимального главного напряжения, $V_{max\text{ ст}}$ – проекция максимальной скорости по измерениям в стенке выработки, $V_{max\text{ кр}}$ – проекция максимальной скорости по измерениям в кровле выработки, α' – азимут проекции $V_{max\text{ кр}}$, β' – наклон проекции $V_{max\text{ ст}}$ ».

Нахождение V_{Pmax} и V_{Pmin} позволяет перейти к величинам главных напряжений σ_1 и σ_2 (при условии, что измерительные скважины пробурены в направлении σ_3)

$$\frac{V_{Pmax} - V_{Pmin}}{V_{Pmin}} = f(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (1.12)$$

Наиболее сложной задачей в рамках реализации ультразвуковых методов контроля НДС является нахождение зависимости $V = f(\sigma)$. В [165] предлагается ряд зависимостей, связывающих скорости распространения продольных и поперечных волн в нагруженной и разгруженной среде с величинами напряжений, определяемыми из выражений

$$V_{Px} = V_{P0} [1 + \sigma_{xx}/(3K)]^{1/2}, \quad (1.13)$$

$$V_{Sy}, V_{Sz} = V_{S0} [1 + \sigma_{yy(zz)}/(3K)]^{1/2}, \quad (1.14)$$

где V_{Px} , V_{Sy} , V_{Sz} – скорости распространения продольных и поперечных волн при наличии напряжений, V_{P0} , V_{S0} – скорости распространения продольных и поперечных волн при отсутствии напряжений, $\sigma_{xx,yy,zz}$ – напряжения вдоль осей X, Y, Z соответственно; K – объемный модуль упругости. Выражения (1.13), (1.14) являются достаточно грубыми оценками и подходят только для первичной оценки величин напряжений.

Более распространенным и надежным способом перехода от измеренных параметров УЗ колебаний к механическим напряжениям является построение тарировочных зависимостей. Такие зависимости могут быть получены в процессе натурного эксперимента, когда участок массива, в котором производится прозвучивание, нагружается с применением

гидродомкрата [7,218], или на образцах керна, извлеченных из измерительных скважин [165,222,223]. Последний метод является предпочтительным, т.к. позволяет получать зависимости $V=f(\sigma)$ для различных направлений. Это, в свою очередь, позволяет определить параметры скоростной анизотропии в ненагруженных породах и сравнить их с результатами скважинных измерений. В этом случае удастся в значительной мере учесть естественную скоростную анизотропию пород, обусловленную особенностями их строения в зоне проведения измерений.

При реализации скважинных УЗ измерений в околорудном пространстве в качестве основного информативного параметра обычно выступают скорости продольных волн. В отдельных случаях для контроля напряжений также могут быть использованы скорости поляризованных поперечных волн [224]. Использование динамических информативных параметров (амплитуд продольных и поперечных волн, коэффициентов затухания) обосновано теоретически в [150], однако на практике сложно реализуемо из-за невозможности обеспечения повторяемости акустических контактных условий на границе «преобразователь-порода» в неводозаполненных скважинах. В последнее время для контроля напряжений и роста микронарушений в некоторых строительных конструкциях стали использоваться не скорости распространения продольных или поперечных волн, а приращения скоростей многократно рассеянных колебаний, информация о которых содержится в кодах волновых форм. Такой методический прием известен под названием coda wave interferometry (CWI). На сегодняшний день исследователями накоплен опыт использования CWI на различных конструкционных материалах, подвергаемых механическому [225–227] и температурному [228] воздействию. Так в [229] описывается опыт применения CWI на образцах бетона, подвергаемых одноосному нагружению. Показана практически линейная связь между приращениями скоростей многократно рассеянных упругих волн и значениями осевой нагрузки. При этом существенных изменений во времени первого вступления

продольной волны не выявлено. Наряду с лабораторными исследованиями также накоплен опыт применения СWІ для определения напряженного состояния и дефектообразования в различных промышленных конструкциях и сооружениях [227,230,231]. Во всех приведенных исследованиях использование СWІ приводит к существенному повышению чувствительности ультразвукового прозвучивания к возникновению микродефектов под различными воздействиями. Следует, однако, отметить, что использование алгоритма СWІ для контроля напряжений в породах in-situ требует дополнительных экспериментальных исследований для изучения влияния особенностей строения пород (в частности, наличия трещин) на результаты применения указанного методического приема.

Большой вклад в развитие ультразвукового метода изучения НДС приконтурного массива внесен исследователями ИФЗ РАН, КНЦ РАН, МГГУ, ВНИМИ, КузГТУ, института «Гидропроект». Ультразвуковые измерения производились на рудниках ГМК "Печенганикель" [222], Хибинских апатитовых рудниках [232], Чиатурском марганцевом месторождении [233], Нахичеванском руднике [234] и др. Во всех случаях в качестве информативных параметров использовались кинематические характеристики зарегистрированных сигналов.

При реализации натуральных УЗ измерений для контроля НДС массива также необходимо учитывать разнообразные факторы, влияющие на скорости распространения упругих волн в породах. К таким факторам относятся особенности строения и нарушенности пород в зоне прозвучивания, учет которых описан выше, а также наличие влаги и повышенных температур. Присутствие воды в трещинах изменяет упругие модули пород и может приводить к росту скоростей продольных волн до 30%, при этом учет такого влияния может быть произведен на основе экспериментально устанавливаемых корреляционных зависимостей [235–237]. Температурный фон также оказывает существенное влияние на скорости упругих волн. Известно, что повышение температуры может приводить к снижению

упругих модулей пород и, как следствие, снижению скоростей продольных и поперечных волн. Такой эффект экспериментально установлен на ряде конструкционных материалов [238] и горных пород [239–242].

Выводы к главе 1

В таблице 1.1 представлен общий анализ описанных в первой главе методов контроля параметров напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестностях горных выработок и других подземных сооружений. Следует отметить, что приведенная в таблице классификация по возможностям определения напряжений вдоль одного (1D), двух (2D) или трех (3D) направлений является условной, т.к. в большинстве случаев повторные измерения в других выработках или скважинах могут расширить возможности метода. То же касается вопросов пригодности метода к осуществлению мониторинговых измерений. В большинстве случаев под отсутствием такой возможности подразумевается отсутствие экономического и технологического обоснования многократного проведения измерений в одной точке указанным методом.

Таблица 1.1 – Классификация методов контроля изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Метод	1D/2D/ 3D	Область применения	Ограничения	Мониторинг
Геологические методы исследования НДС				
Анализ геологического строения массива	2D/3D	Первичная оценка поля напряжений	Низкая точность	-
Анализ дискования керна	2D	Приближенная оценка напряжений. Сопутствует другим исследованиям керна	Низкая точность	-
Анализ разрушения стенок скважины	2D	Оценка направлений действия напряжений в комплексе методов ГИС	Низкая точность	-
Геомеханические методы изучения НДС				
Щелевая разгрузка	1D	Определение величины напряжений вдоль заданного направления на контуре выработки	Сильное влияние приконтурной нарушенной зоны	-
Щелевая разгрузка с компенсацией	1D	Более точный метод, чем щелевая разгрузка	Сильное влияние приконтурной нарушенной зоны	-

Метод	1D/2D/ 3D	Область применения	Ограничения	Мониторинг
Частичная разгрузка с центральным отверстием	2D	Определение величин и направлений напряжений на контуре выработки	Сильное влияние приконтурной нарушенной зоны	-
Разгрузка керн по схеме ВНИМИ (Doorstopper Gauge)	2D	Определение величин и направлений напряжений, ортогональных оси скважины	Высокие требования к буровому оборудованию. Одноразовая измерительная система	-
Разгрузка керн по схеме Лимана (CSIR)	2D/3D	Определение компонент тензора напряжений	Высокие требования к буровому оборудованию. Одноразовая измерительная система	-
Разгрузка с коническими отверстиями	3D	Определение компонент тензора напряжений	Высокие требования к буровому оборудованию. Одноразовая измерительная система	-
Разгрузка керн по схеме Хаста (USBM gage)	2D/3D	Определение компонент тензора напряжений	Высокие требования к буровому оборудованию. Более низкая точность по сравнению с другими методами разгрузки	-
Скважинная щелевая разгрузка (borehole slotting)	2D	Определение величин и направлений напряжений, ортогональных оси скважины	Сложность и высокая стоимость оборудования.	-
Метод гидроразрыва скважины (hydraulic fracturing)	2D	Определение величин и направлений напряжений, ортогональных оси скважины в низкотрещиноватых массивах	Высокая стоимость оборудования, сильное влияние исходной трещиноватости	-
Гидроразрыв на существующих трещинах (HTPF)	3D	Определение компонент тензора напряжений	Сложность проведения измерений. Необходимость проведения до 12 измерений для определения компонент тензора	-
Гидроразрыв с использованием эластичных рукавов (SFM)	2D	Определение величин и направлений напряжений, ортогональных оси скважины в трещиноватых массивах	Низкая чувствительность по сравнению с стандартным методом гидроразрыва	-
Метод изучения упругого восстановления керн (ASR)	3D	Определение компонент тензора напряжений	Необходимость получения ориентированного керн и учета температуры, влажности, анизотропии.	-
Геомеханические методы исследования приращений напряжений				
Метод скважинных деформометров (strain cells)	2D/3D	Определение приращений напряжений с использованием деформометров, используемых для методов разгрузки	Высокая стоимость одноразовых деформометров, низкая надежность при длительных измерениях	Д/Н
Метод гидравлических датчиков	2D	Мониторинг приращения напряжений без учета их	Невозможность определения направлений	Н

Метод	1D/2D/ 3D	Область применения	Ограничения	Мониторинг
		направлений	напряжений	
Метод жестких упругих включений (stiff inclusions)	2D	Измерение приращений напряжений без необходимости определения упругих констант пород	Сложность размещения датчиков, необходимость учета влияния клеевого слоя	Д/Н
Метод фотоупругих датчиков (photoelastic stressmeters)	2D	Измерение приращений напряжений без необходимости определения упругих констант пород	Сложность размещения датчиков, необходимость учета влияния клеевого слоя. Ограничения по максимальным напряжениям и предельным модулям упругости пород	Д
Метод деформируемых датчиков (deformable inclusions)	2D/3D	Определение приращений напряжений вдоль 2 или 3 осей	Сложность размещения датчиков, относительно низкая надежность	Н
Геофизические методы контроля НДС				
Радиометрический контроль	2D/3D	Оценка зон концентрации напряжений	Организационные сложности реализации метода, неточные оценки	-
Электрометрические методы	2D/3D	Качественная оценка напряжений, удароопасности пластов. Определение зоны концентрации напряжений	Качественные оценки, сложность перехода к абсолютным значениям напряжений	Д
Метод ЭМИ	2D/3D	Бесконтактное определение параметров НДС массива	Качественные данные, сложность перехода к абсолютным значениям напряжений	Д/Н
Активный сейсмический метод	2D	Выявление зон концентрации напряжений на больших базах. Оценка величин напряжений	Сложность перехода от скоростей упругих волн к величинам напряжений	-
Звукометрический метод	2D/3D			Н
Метод акустической эмиссии	2D/3D	Определение компонент тензора НДС	Трудоемкость, Необходимость подготовки множества образцов, высокая стоимость оборудования, низкая повторяемость из-за разброса свойств пород	-
Скважинные УЗ методы	2D/3D	Определение величин и пространственного распределения напряжений	Необходимость тарировки, ограниченная чувствительность при использовании традиционных кинематических информативных параметров	Д

Прим.: Д – дискретный мониторинг, Н – непрерывный мониторинг

Приведенный анализ подтверждает существенное развитие инструментальных методов контроля напряжений. При этом наиболее

важными для обеспечения безопасного и эффективного ведения горных работ и подземного строительства следует считать те методы, которые могут одновременно решать задачи по определению различных параметров НДС массива, а также осуществлять мониторинг за их изменением с течением времени. Таким требованиям в значительной степени соответствуют геофизические методы, среди которых наибольшей глубиной теоретической и методической проработки отличаются ультразвуковые методы.

Неоспоримым достоинством активных ультразвуковых методов изучения НДС является гибкость их применения и широкие возможности по созданию измерительных комплексов для реализации скважинных измерений. Для возбуждения и приема УЗ импульсов могут быть использованы серийно выпускаемые низкочастотные дефектоскопы с высокими метрологическими характеристиками, при этом опыт создания скважинных зондов накоплен у многих организаций. Основным ограничением метода на сегодняшний день является низкая чувствительность кинематических информативных характеристик УЗ сигналов к медленно изменяющимся малым приращением напряжений, особенно ярко проявляющаяся в породах с высоким модулем упругости. Указанный недостаток существенно снижает возможности метода в области организации мониторинга за изменением параметров НДС. Одним из направлений увеличения чувствительности могло бы стать использование более сложных алгоритмов обработки, основанных на анализе многократно рассеянных на микронеоднородностях волн, однако особенности применения указанного алгоритма в горных породах различной степени нарушенности требуют дополнительных исследований. Другим направлением повышения чувствительности ультразвуковых методов может стать использование локального нагрева участка породы, в котором на фоне снижения абсолютных значений скоростей продольных и поперечных волн ожидается возрастание их приращений в функции от приложенной нагрузки. Применение указанного приема требует проведения дополнительных

исследований для определения оптимальных температурных диапазонов, влияния особенностей строения и нарушенности пород различных генотипов и установления ограничений применимости метода.

Акустико-эмиссионный метод, основанный на применении акустико-эмиссионного эффекта памяти в горных породах, обладает широкими возможностями при определении компонент тензора напряженного состояния и демонстрирует удовлетворительную сходимость с результатами других «классических» методов изучения НДС – гидроразрыва и разгрузки. При этом основным ограничением на пути к более широкому применению АЭ метода является существенное влияние свойств пород в извлеченном образце на параметры проявления АЭЭП. На данный момент указанное влияние до некоторой степени удастся снизить за счет проведения измерений на большом количестве образцов с последующим осреднением результатов. Однако при отсутствии априорных данных о направлениях главных напряжений для реализации АЭ метода требуется проведение измерений на еще большем количестве разноориентированных кернов. Большое количество разноориентированных образцов также требуется для определения безразмерного коэффициента k , связывающего напряжения в установочном цикле нагружения и нагрузку, при которой проявляется АЭЭП в тестовом цикле. Учитывая довольно высокую стоимость оборудования для механического нагружения образцов и акустико-эмиссионных измерений возможности масштабирования применения указанного метода оказываются весьма ограниченными. С другой стороны, большим потенциалом развития обладает вариант АЭ метода, предполагающий использование акустико-эмиссионных эффектов в композиционном материале с заранее известными и постоянными акустическими свойствами в качестве чувствительного элемента, размещаемого в измерительной скважине и выступающего в роли первичного преобразователя давления. Потенциально подобный подход может решать задачи определения пространственного распределения напряжений и контроля приращений напряжений, в том числе в варианте

непрерывного мониторинга. Для этого, однако, необходимо проведение комплексного исследования особенностей формирования и проявления АЭ эффектов в серийно выпускаемых и специально синтезированных композитах, подвергаемых различным видам механического нагружения, а также разработка аппаратурного и методического обеспечения для реализации предлагаемых способов контроля.

На основании проведенного в настоящей главе анализа, были сформулированы следующие задачи 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.
4. Экспериментальное исследование влияния различных схем механического нагружения на параметры активных ультразвуковых сигналов в горных породах, композитах и модельных материалах.
5. 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.

Глава 2. Использование акустико-эмиссионных эффектов для контроля параметров НДС массива горных пород

2.1 Влияние анизотропии композиционных материалов на проявление в них акустико-эмиссионных эффектов

Промышленно изготавливаемые композиты, выполняющие роль конструкционных материалов, в подавляющем большинстве случаев имеют слоистую структуру, в которой в качестве армирующего компонента используют переплетенные синтетические или натуральные волокна, а в качестве матрицы – разнообразные эпоксидные и полиэфирные смолы [243]. Подобная структура обуславливает высокую степень анизотропии механических и, как следствие, акустических свойств, связанную с принципиально разной прочностью на растяжения вдоль и поперек слоев. В последнем случае возникает вероятность проявления эффекта деламации, заключающегося в отслоении армирующих слоев друг от друга и формировании трещины по матрице [244]. Сдвиговые механические нагрузки также с большей вероятностью приводят к деламации, чем к разрывам армирующих компонентов. Указанные механические свойства оказывают сильное влияние и на акустические характеристики композитов, в частности на проявление в них акустико-эмиссионных эффектов в зависимости от угла между направлением приложения нагрузки и плоскостью слоев армирующих компонентов. С целью установления качественных и количественных характеристик проявления АЭ в анизотропных композитах был проведен ряд лабораторных исследований [245].

В настоящей работе приводится анализ проявления акустико-эмиссионных эффектов в таких распространенных слоистых анизотропных материалах, как гетинакс (марка V), текстолит (марка ПТК) и стеклотекстолит (марка СТЭФ). Особое внимание уделяется влиянию направления анизотропии на акустико-эмиссионную тензочувствительность и проявление

АЭЭП в исследуемых материалах. Физико-механические свойства вышеуказанных материалов представлены в таблице 2.1, а микрофотографии аншлифов их поверхностей — на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства исследуемых композитов

Материал	E , ГПа		μ	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа
	параллельно слоистости	перпендикулярно слоистости			
Стеклотекстолит	20	15	0.11	1600–1800	300
Текстолит	15	6.5	0.15	1300–1400	250
Гетинакс	9.5	7	0.28	1280–1380	140

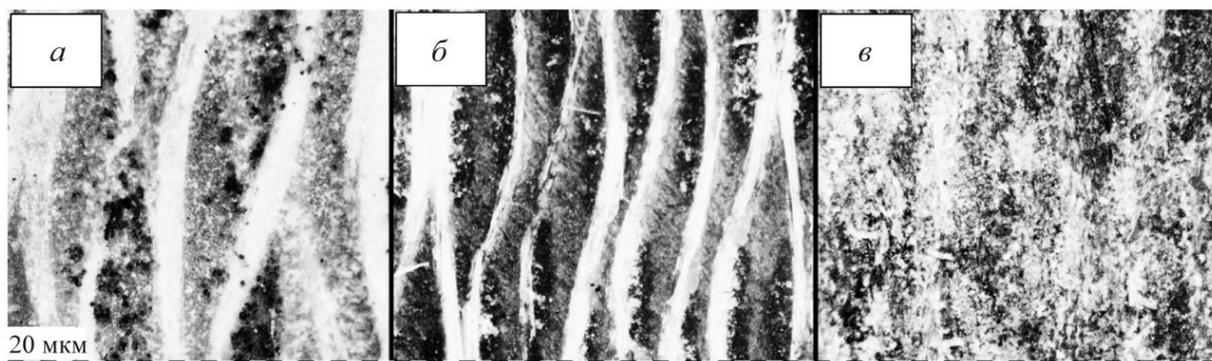


Рисунок 2.1 – Микрофотографии аншлифов стеклотекстолита (а), текстолита (б) и гетинакса (в)

На рисунке 2.1 видна слоистая структура исследуемых композитов. Расстояние между слоями колеблется в пределах от 20 до 140 мкм, при этом гетинакс (рисунок 1в) характеризуется значительно большей степенью однородности структуры, чем стеклотекстолит и текстолит (рисунки 2.1а и 2.1б).

Лабораторные исследования проводились на специализированном лабораторном стенде [246], позволяющем регистрировать весь спектр акустико-эмиссионных параметров в функции от времени и прилагаемой нагрузки. Особенностью стенда является полное отсутствие акустических и

электромагнитных помех в процессе нагружения и поддержания заданного уровня нагрузки.

Суть лабораторных исследований сводилась к следующему: образцы кубической формы со стороной 24 мм, изготовленные из рассматриваемых композиционных материалов, подвергались двухциклового одноосному нагружению до уровня 20 МПа (в первом цикле) и 30 МПа (во втором цикле). Для разных серий образцов нагружение проводилось под углами $\gamma = 0, 45$ и 90° относительно направления расположения слоев композитов. Одновременно с нагружением велась регистрация комплекса акустико-эмиссионных параметров.

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

$$S_{АЭ} = \frac{\Delta \dot{N}_\Sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad (2.1)$$

где $\Delta \dot{N}_\Sigma$ — приращение активности АЭ на участке нагружения; $\Delta \varepsilon$ — приращение относительных деформаций на участке нагружения.

На рисунке 2.2 приведен пример проявления АЭ-тензочувствительности для образца текстолита в зависимости от направления приложения нагрузки. Качественно близкие закономерности прослеживаются и при испытаниях образцов стеклотекстолита и гетинакса.

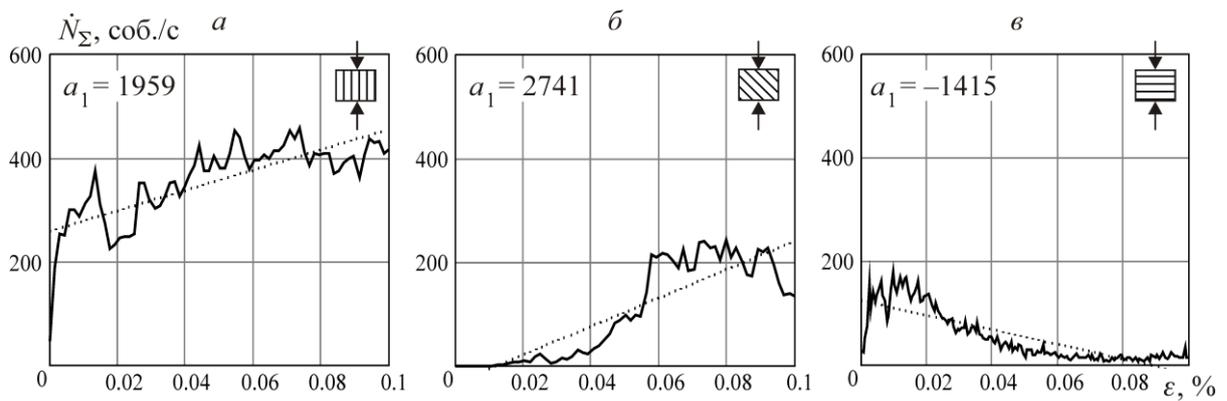


Рисунок 2.2 – Пример зависимостей $\Delta\dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$, характеризующих акустико-эмиссионную тензочувствительность текстолита при направлении одноосного нагружения, составляющем с направлением слоев угол $\gamma = 0^{\circ}$ (а), $\gamma = 45^{\circ}$ (б) и $\gamma = 90^{\circ}$ (в)

Видно, что направление анизотропии в композите оказывает значительное влияние на его АЭ-тензочувствительность. Для удобства сравнения результатов экспериментов функции $\Delta\dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$ аппроксимировались линейными зависимостями вида $y = a_0 + a_1x$, для которых были вычислены коэффициенты a_1 при переменной x , показывающие степень влияния независимой переменной на зависимую. Согласно рисунку 2.2, увеличение деформаций приводит к росту активности АЭ, причем в случае наклонного расположения слоев в композите скорость этого роста максимальна, что, вероятно, связано с преобладанием сдвиговых напряжений. Совершенно иная картина наблюдается при $\gamma = 90^{\circ}$ (рисунок 2.2в). В этом случае с увеличением деформации активность АЭ падает. 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.

Наряду со скоростью нарастания активности АЭ при увеличении деформации важным информативным параметром является уровень акустического сигнала — абсолютное значение величины $\Delta\dot{N}_{\Sigma}$,

характеризующее степень интенсивности дефектообразования в материале. Стоит иметь в виду, что на уровень акустического сигнала оказывает существенное влияние тип материала, размер и форма изготовленных из него образцов, поэтому данным параметром можно пользоваться только для сравнения аналогичных образцов.

Во второй части лабораторных исследований рассматривались закономерности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в исследуемых слоистых композиционных материалах. В рамках первого цикла нагружения все образцы подвергались одноосному установочному нагружению $\sigma_{уст}$ до уровня 20 МПа. Через 24 ч образцы нагружались повторно до уровня тестовой нагрузки $\sigma_{тест} > \sigma_{уст}$. Проявление АЭЭП во втором цикле нагружения показано на рисунке 2.3 на примере образца стеклотекстолита.

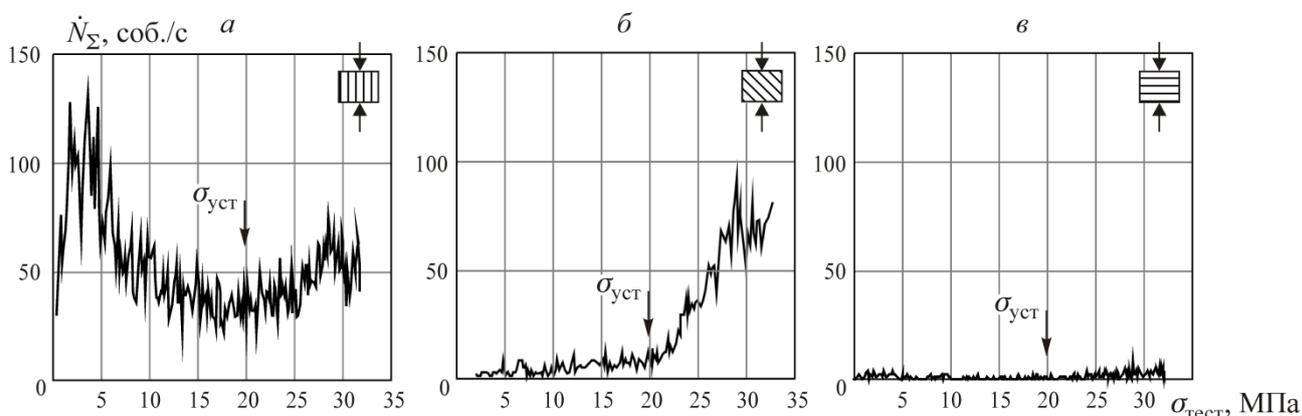


Рисунок 2.3 – Пример зависимостей $\Delta \dot{N}_{\Sigma}(\varepsilon)$ для стеклотекстолита во втором цикле одноосного нагружения ($\gamma = 0^\circ$ (а), $\gamma = 45^\circ$ (б) и $\gamma = 90^\circ$ (в))

Отчетливое проявление эффекта памяти наблюдается только в случае угла между направлением приложения нагрузки и плоскостью слоев композита, равного 45° (рисунок 2.3б). Очевидно, что отсутствие АЭЭП при $\gamma = 90^\circ$ (рисунок 2.3в) связано с недостаточным образованием дефектов на стадии формирования эффекта памяти в первом цикле нагружения. Отсутствие явного проявления АЭЭП в случае $\gamma = 0^\circ$ (рисунок 2.3а) связано с

тем, что при таком нагружении происходит процесс активного трещинообразования, связанного с низкой прочностью межслоевого сцепления в композите. Процесс активного дефектообразования иллюстрируется рисунком 2.2, где в случае $\gamma = 90^\circ$ активность акустической эмиссии значительно превосходит соответствующую величину при $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 45^\circ$. Во втором цикле нагружения при $\gamma = 0^\circ$ (рисунок 2.3а) момент проявления эффекта памяти оказывается “зашумленным” акустической эмиссией, вызванной разрушением межслоевых связей в композите. Сводные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2.2.

В качестве информативных параметров приведены угол γ между направлением нагружения и плоскостью слоев композита, коэффициент a_1 регрессионной прямой для тензочувствительности и относительная погрешность воспроизведения АЭЭП $\Delta_{\text{ЭП}}$.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментальных исследований

Материал	γ , град	a_1	$\Delta_{\text{ЭП}}$, %
Стеклотекстолит	0	1959	АЭЭП не наблюдался
	45	2741	4.1
	90	-1415	АЭЭП не наблюдался
Текстолит	0	2148	» »
	45	2654	3.7
	90	-1027	АЭЭП не наблюдался
Гетинакс	0	2341	» »
	45	3049	7.4
	90	-421	АЭЭП не наблюдался

Из таблицы 2.2 видно, что установленные закономерности справедливы для всех исследованных материалов. Низкое значение коэффициента a_1 для гетинакса в случае горизонтального расположения слоев связано с его низкой прочностью на растяжение вдоль слоев, а также более однородным строением (рисунок 2.1в).

2.2 Изучение механизмов проявления АЭЭП в анизотропных композитах на модельных образцах с единичным упругим включением

Ранее в работе [215] были сформулированы методы определения напряжений в массиве с использованием изотропного дисперсно-наполненного композита на основе эпоксидной смолы и кварцевого песка. Исследования показали, что такого рода материалы оказываются чувствительны к ранее испытанным нагрузкам и могут воспроизводить эту информацию при повторном нагружении. Однако однородность свойств таких материалов препятствует развитию возможностей контроля направлений главных напряжений в массиве. В настоящей работе представлено экспериментальное исследование проявления акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композитах на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями, предпринята попытка объяснения механизмов проявления АЭ в таких материалах [247].

В рамках первой части работы производилось исследование параметров проявления акустико-эмиссионных эффектов в композитах в зависимости от материала наполнителя. Исследования велись на описанном в п. 2.1 лабораторном стенде с низким уровнем собственных механических шумов. В качестве объектов исследования выступали цилиндрические образцы диаметром 42 мм и толщиной 16 мм, изготовленные из эпоксидной смолы, в центральной части которых размещалось прямоугольное упругое включение размером 16 мм на 16 мм и толщиной 50 мкм. Упругие включения изготавливались из полиэтилена ($E = 0,012$ ГПа), мусковита ($E = 79$ ГПа), стали ($E = 210$ ГПа) [248,249]. Кроме того, образцы изготавливались со сквозным отверстием такого же размера, как и упругие включения. Все образцы подвергались одноосному диаметральному нагружению σ вдоль плоскости упругого включения с использованием стальных пуансонов, повторяющих геометрию образца. Параллельно с нагружением велась регистрация таких параметров, как активность \dot{N}_Σ и сумма импульсов N

акустической эмиссии. Пример полученных зависимостей $N(\sigma)$ представлен на рисунке 2.4.

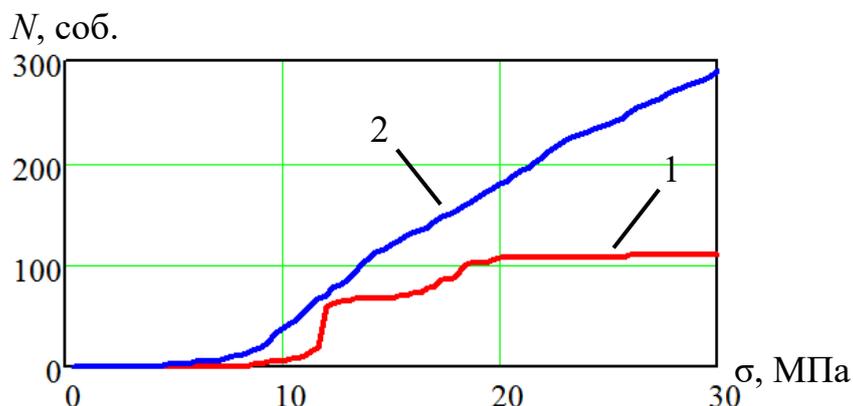


Рисунок 2.4 - Пример зависимости $N(\sigma)$ для образцов эпоксидной смолы с упругим включением из стали (1) и мусковита (2)

Из рисунка 2.4 видно, что нагружение образцов с упругими включениями из материалов, модуль упругости которых превышает модуль упругости вмещающей матрицы (для эпоксидной смолы $E = 30$ ГПа), сопровождается активным образованием структурных дефектов и, как следствие, ростом числа зарегистрированных импульсов АЭ. С другой стороны, при использовании в качестве включений материалов с модулем упругости ниже модуля упругости матрицы, а также в случае сквозного отверстия в виде щели, акустическая эмиссия не регистрировалась вплоть до моментального хрупкого разрушения образца. Таким образом, можно утверждать, что механизм возникновения АЭ при деформации дисперсно-наполненных композитов на основе эпоксидных смол отличается от механизма возникновения АЭ при деформации горных пород, в которых трещины и поры, заполненные различными веществами, являются достаточными концентраторами напряжений для возникновения дефектов и устойчивого трещинообразования. В отличие от горных пород, исследуемым композиционным материалам свойственно не последовательное развитие трещин, а скорее лавинообразное разрушение при достижении сжимающим нагружением предела прочности. С целью провокации активного

последовательного трещинообразования, чувствительного к небольшим изменениям напряженного состояния, в образце следует использовать в качестве наполнителя материалы, модуль упругости которых превосходит модуль упругости матрицы.

Вторая часть исследований была посвящена нахождению зависимости характера проявления акустической эмиссии от угла между упругим включением и направлением нагружения. В рамках исследований образцы, аналогичные исследованным в первой части работы, с упругими включениями из стали и мусковита подвергались двухциклового нагружению до уровня σ_1 и σ_2 соответственно, причем $\sigma_2 > \sigma_1$. Пример зависимостей $\dot{N}_\Sigma(\sigma)$ для образца с упругим включением из мусковита представлен на рисунке 2.5. Условно процесс нагружения можно разделить на 4 стадии: линейное нагружение до σ_1 (I), поддержание нагрузки (II), снижение нагрузки до нуля (III), повторное нагружение до σ_2 (IV). Аналогичной схеме нагружения подвергались образцы со стальным включением.

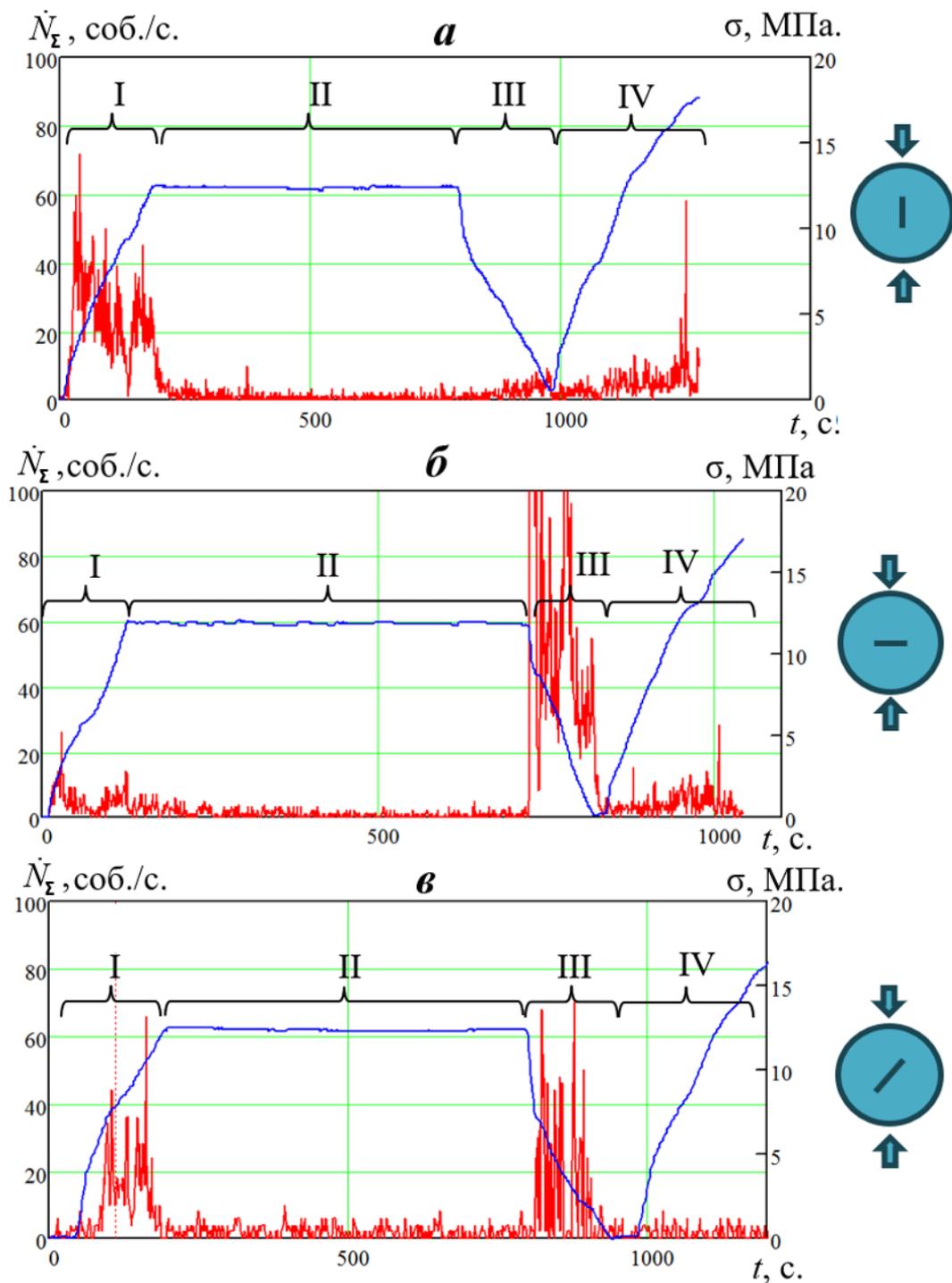


Рисунок 2.5 – Проявление активности АЭ при угле между упругим включением и направлением приложения нагрузки, равном 0° (*a*), 90° (*б*) и 45° (*в*) для образца с упругим включением из мусковита

Из рисунка 2.5 видно, что для вертикального упругого включения характерна высокая степень дефектообразования на I стадии (рисунок 2.5*a*), при этом дальнейший рост дефектов продолжается только на IV стадии при

достижении нагрузкой ранее достигнутого максимума σ_1 . Такой всплеск активности АЭ свидетельствует о проявлении АЭЭП в исследуемом образце.

В случае горизонтального расположения упругого включения на I стадии не происходит заметного развития дефектов, что, очевидно, связано с отсутствием концентраторов напряжений в виде вершин трещин. С другой стороны, наблюдается высокая активность акустической эмиссии на III стадии. Вероятнее всего такая особенность связана со слоистой структурой упругого включения из мусковита. В этом случае при снижении нагрузки начинают нарушаться связи между слоями слюды, что и провоцирует рост активности АЭ. В пользу этого предположения говорит и то, что в аналогичной ситуации при исследовании образцов со стальным включением таких особенностей не наблюдалось. Следует также обратить внимание, что АЭЭП на IV стадии практически не проявляется.

В случае наклонного расположения упругого включения высокая активность АЭ проявляется на I и III стадиях. При этом при исследовании образцов со стальным включением активность АЭ на III стадии практически не наблюдается. Также и АЭЭП на IV стадии полностью отсутствует.

Таким образом наибольшая эффективность работы анизотропных композитов в качестве чувствительных элементов систем контроля НДС достигается в случае, когда модуль упругости армирующего компонента существенно превышает модуль упругости матрицы, а также когда угол между приложением нагрузки и плоскостью слоев не отличен от 90° .

2.3 Исследование формирования и проявления АЭЭП в композиционных материалах в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия

2.3.1 Подготовка и предварительное цензурирование образцов

Для проведения эксперимента в лабораторных условиях были изготовлены три серии образцов из синтезированных композиционных

материалов, представляющие из себя цилиндры высотой 90 мм и диаметром 45мм. Матрицей для всех образцов выступала эпоксидная смола Роху Systems L. В качестве наполнителя использовались: алюминиевая пудра, имеющая размер частиц $\approx 60\mu\text{м}$ и весовое соотношении с матрицей 1/500 (серия образцов А); дисперсно-распределенные нити углеволокна, имеющие длину 3 мм, толщину 15 мкм и весовое соотношении с матрицей 1/1000 (серия образцов В); листы углеткани, расположенные параллельно оси цилиндров (серия образцов С). Изготовленные образцы изображены на рисунке 2.6. Свойства синтезированных композитов определяются набором свойств, слагающих их отдельных компонентов. Для наглядности в табл. 2.3 представлены значения предела прочности на сжатие и растяжение, а также модуля упругости наполнителей и эпоксидной смолы, использующиеся для изготовления образцов из композитов.

Таблица 2.3 – Физико-механические свойства материалов

Материал	Предел прочности на растяжение, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Алюминий	230	120	71
Углеродное волокно	280	-	238
Эпоксидная смола	75	119	4



Рисунок 2.6 – Изготовленные образцы композиционных материалов

Эпоксидный состав, используемый для изготовления образцов, включает в себя два компонента: низковязкую эпоксидную смолу Roxo Systems L и отвердитель EPH 500. При их смешивании в массовом соотношении 1:0.63 состав полностью полимеризуется по истечении 60 мин. При этом важно соблюдать пропорцию, избыток или недостаток отвердителя в эпоксидном составе негативно отражается на качестве полимера: снижается прочность, устойчивость к физическому и механическому воздействию.

Для изготовления образцов эпоксидная смола смешивалась с наполнителями в пропорциях, о которых говорилось уже ранее, и заливалась в заранее подготовленные формы необходимых размеров, смазанные техническим вазелином для легкого извлечения композитов. Предварительно были подготовлены ламинированные листы углеткани для удобного размещения их в образце параллельно оси цилиндра.

До полной полимеризации матрицы все образцы подвергались вакууммированию для удаления пузырьков воздуха, образованных в результате химической реакции смешения двух компонентов эпоксидного состава, и сохранения постоянства свойств синтезированных материалов. Для этого использовалась вакуумная система дегазации MT 3D, показанная на рисунке 2.7 и состоящая из камеры и роторного насоса марки ZSN. В данной системе используется роторный насос, который способен создавать глубину вакуума до 5 Па.



Рисунок 2.7 – Вакуумная система дегазации МТ 3D

Образцы из композиционных материалов находились в вакуумной камере под давлением 0.3 бар на протяжении времени 15 мин. После этого давление постепенно спускалось, приводя к избавлению от пузырьков воздуха, поднявшихся на поверхность.

Все изготовленные образцы подвергались цензурированию, целью которого является исключение наличия существенных неоднородностей внутри образца еще до начала проведения эксперимента [250]. Цензурирование проводилось с использованием двух методов: временно-импульсным и шумовым прозвучиванием с корреляционной обработкой сигналов [251,252]. В качестве информативного параметра, для первого из указанных методов, используется скорость распространения продольных волн V_p в образцах. Суть данного метода сводилась к следующему. Прозвучивание всех образцов выборки производилось вдоль оси с использованием низкочастотного дефектоскопа УД2Н-ПМ и комплекта пьезопреобразователи с резонансной частотой $f_0 = 200$ кГц. Значение скорости V_p , вычислялось с учетом определенного по волновой форме сигнала времени первого вступления импульсного УЗ сигнала и известной

базы прозвучивания (высоты образца). Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.8.

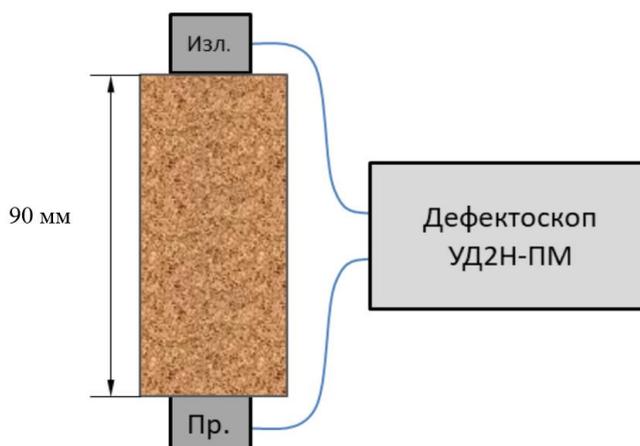


Рисунок 2.8 – Схема проведения лабораторного эксперимента по определению скорости продольных волн C_p с помощью УЗ прозвучивания

Для цензурирования на основе ультразвукового шумового прозвучивания с корреляционной обработкой испытания проводились по следующей схеме. На противоположных сторонах образца размещались излучатель (Изл.) и приемник (Пр.) УЗ сигналов, представленные широкополосными пьезоэлектрическими преобразователями с резонансной частотой 200 кГц. Один из указанных преобразователей подключался к шумовому генератору, а другой к входу 4-х канального АЦП E20-10 производства ООО «Л-Кард» с частотой дискретизации 10 МГц. Производилось излучение шумового УЗ сигнала в образец, с его последующим приемом, аналого-цифровым преобразованием и обработкой. Схема проведения шумового прозвучивания показана на рисунке 2.9.

При средней скорости $V_p = 2500$ м/с (характерной для композиционных материалов) и базе измерений 90 мм для центральной частоты зондирующих импульсов 200 кГц соблюдалось условие формирования базе измерения не менее трех, определяемых из соотношения

$$\lambda = V_p / f, \quad (2.1)$$

где V_p – скорость продольной волны в материале образца; f – максимальная частота излучаемого в образец акустического сигнала.

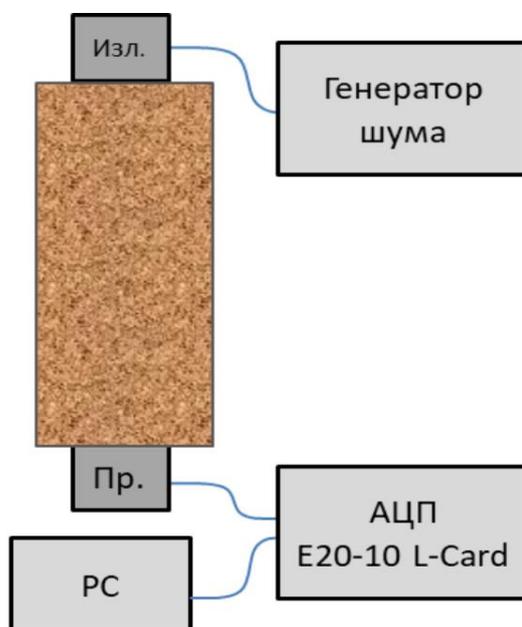


Рисунок 2.9 – Схема проведения ультразвукового шумового прозвучивания

Как уже говорилось ранее, источником электрического сигнала, возбуждающего излучающий преобразователь при реализации корреляционного метода является шумовой генератор, специально изготовленный для осуществления УЗ измерений [253,254]. Структурно такой генератор состоит из задающего генератора, предусилителя, ступенчатого аттенюатора, предназначенного для регулировки выходного напряжения и усилителя мощности. Подключение пьезопреобразователя к генератору осуществляется с помощью высокочастотного коаксиального кабеля.

Информативным параметром для ультразвукового шумового цензурирования был принят интервал корреляции $\tau_{ик}$. Это параметр, показывающий величину отрезка по времени, на котором в сигнале остаются

корреляционные связи с самим собой. Выражение для определения $\tau_{ик}$ автокорреляционной функции имеет следующий вид:

$$\tau_{ик} = \frac{1}{B(0)} \int_0^{\infty} B(\tau) d\tau, \quad (2.2)$$

где $B(\tau)$ – автокорреляционная функция принятого сигнала.

Графическое определение величины $\tau_{ик}$ иллюстрируется рисунком 2.10.

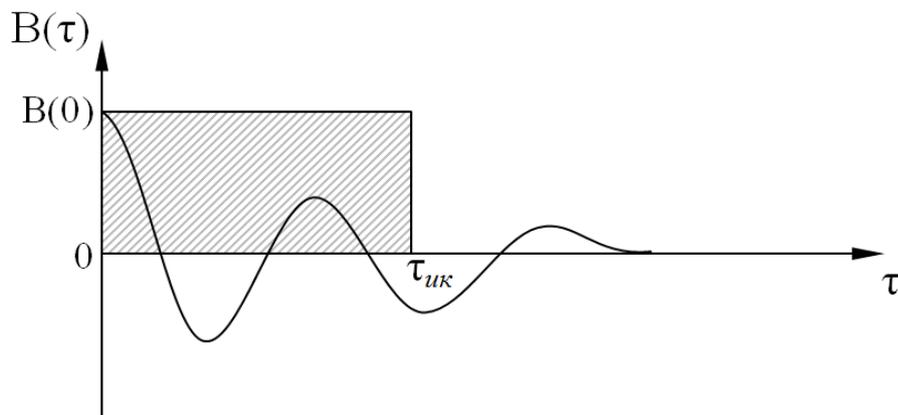


Рисунок 2.10- Графическое нахождение интервала корреляции $\tau_{ик}$

В соответствие с рисунком 2.10, значение $\tau_{ик}$ находится как сторона прямоугольника, вторая сторона которого равна $B(0)$, а его площадь равна площади под автокорреляционной функцией.

С помощью $\tau_{ик}$ можно косвенно оценить ширину спектра принимаемого сигнала, задаваясь крайними значениями интервала корреляции для белого шума и гармонического сигнала (рисунок 2.11).

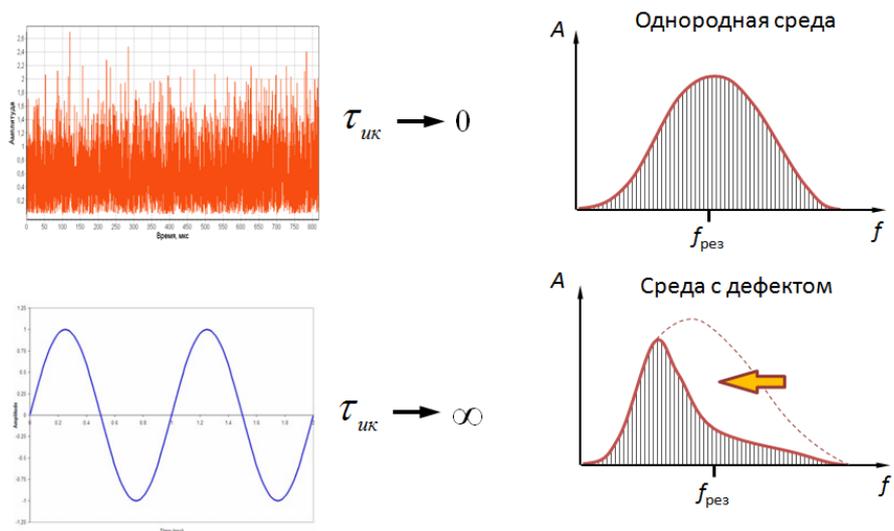


Рисунок 2.11 – Влияние дефекта на спектр сигнала и его интервал корреляции

Из рисунка 2.11 следует, что в первом случае интервал корреляции стремится к 0, а во втором к бесконечности. Увеличение $\tau_{ик}$ свидетельствует о сужении спектра, что, как правило, соответствует наличию дефекта, выступающего в качестве фильтра нижних частот.

После аналогово-цифрового преобразования сигналы длительностью 2048 отсчетов ($\approx 400\text{мкс}$) через интерфейс USB 2.0 поступали на персональный компьютер, где происходила их корреляционная обработка. Суть такой обработки сводится к вычислению значений $\tau_{ик}$ в дискретной форме.

Общий вид стенда для ультразвуковых корреляционных исследований образцов композитов представлен на рисунке 2.12.

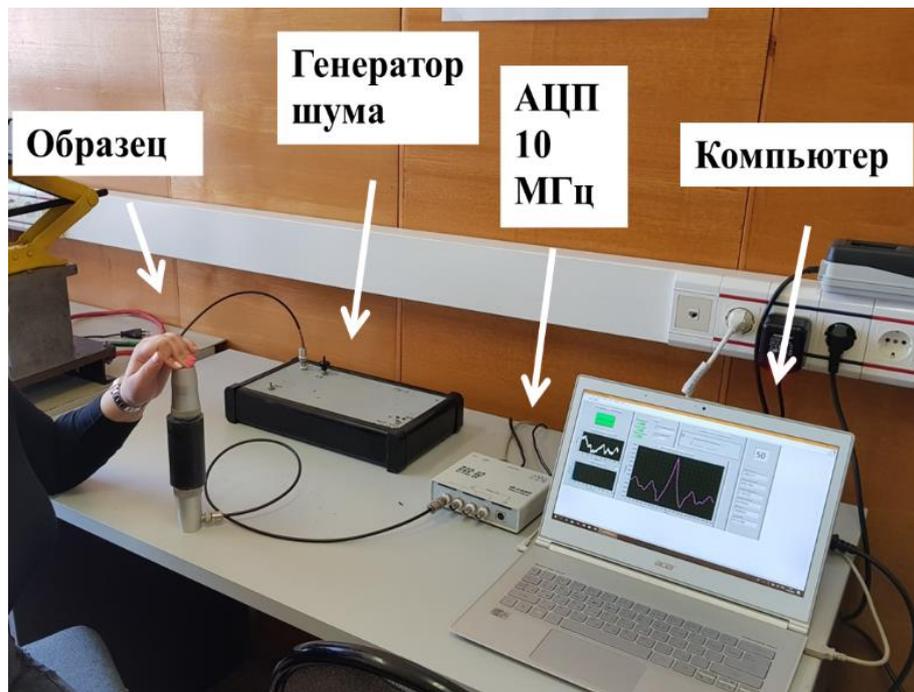


Рисунок 2.12 – Процесс проведения цензурирования методом шумового прозвучивания с корреляционной обработкой

Сравнительные результаты проведенного цензурирования с использованием двух методов оценки, представлены на рисунке 2.13 в виде процентного соотношения информативных параметров V_p и $\tau_{ук}$.

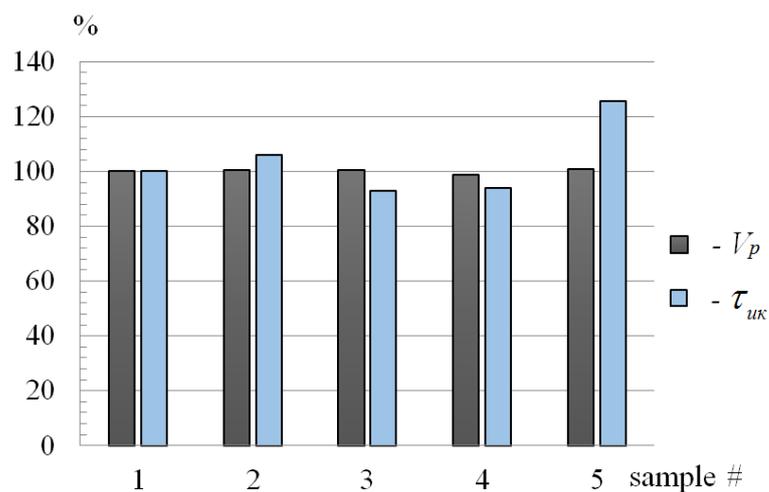


Рисунок 2.13 – Результаты цензурирования

Из результатов следует, что скорость продольных волн примерно одинакова во всех образцах, чего нельзя сказать об интервале корреляции. Его значение в последнем композите превышено на 25%.

Для подтверждения результатов цензурирования пятый образец был разрезан перпендикулярно оси (рисунок 2.14). Это позволило обнаружить зону скопления воздушных пузырьков, связанную с нарушением технологии синтеза материала.

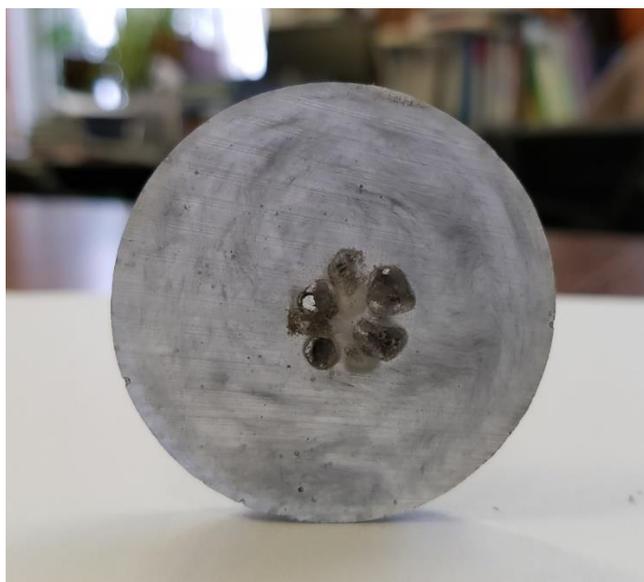


Рисунок 2.14 – Спил образца #5 группы «В» после выявления завышенных значений $\tau_{ик}$

Предложенный подход к первичному ультразвуковому цензурированию образцов композитов обладает повышенной чувствительностью к образованию пор и каверн [255,256]. При этом в отличие от использования амплитудных критериев, требования к качеству и повторяемости контактных условий на границе «преобразователь-объект контроля» оказываются гораздо ниже.

2.3.2 Особенности формирования и проявления АЭЭП в условиях трехосного неравнокомпонентного напряжения

Опыт применения АЭЭП для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях одноосного НДС показал, что уровень напряжений во втором (тестовом) цикле нагружения σ_{1*}^{II} , при котором проявлялся эффект памяти, точно соответствовал уровню напряжений σ_1^I в первом (установочном) цикле, когда эта память была сформирована. Незначительное различие значений σ_1^I и σ_{1*}^{II} наблюдалось только в случае существенной поврежденности исследуемого геоматериала.

При использовании АЭЭП для оценки сложного НДС (например, при нагружении образцов горных пород в установочном цикле по схеме Кармана, а в тестовом — вдоль их оси) отмечено, что уровни σ_1^I и σ_{1*}^{II} никогда не совпадали [257,258]. Более поздними исследованиями установлено, что величина σ_{1*}^{II} оказывается в той или иной степени близкой к девиатору напряжений первого цикла $D^I = \sigma_1^I - \sigma_2^I$ [259], а различие σ_{1*}^{II} и D^I меньше в тех породах, у которых меньше угол внутреннего трения [260]. В общем случае при осесимметричном нагружении значение σ_{1*}^{II} будет определяться соотношением $\sigma_{1*}^{\text{II}} = \sigma_1^I - \sigma_2^I - k\sigma_2^I$ (k — безразмерный параметр, индивидуальный для каждой горной породы и зависящий от коэффициента трения между берегами трещин) [261].

Процедура определения k описана в [262]. Она крайне 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 $k = 3.4$ [257,258]. Разброс значений k для каменных солей лежит в интервале 0.40–0.75 [263].

Сведение параметра k к нулю позволило бы значительно снизить трудоемкость применения метода АЭЭП для оценки НДС массива, но только за счет потери точности, 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 уменьшить k ниже определенного порога, после которого им можно будет пренебречь.

Ниже приводятся результаты исследований закономерностей формирования и проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в ряде композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния.

2.3.3 Результаты лабораторных экспериментов

Образцы подвергались многоцикловым испытаниям на установке для испытания пород в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия УДС 65/80 по схеме Кармана ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) [264]. Подготовленный к испытаниям образец в термоусадочном рукаве представлен на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Образец, подготовленный к испытаниям

Регистрация АЭ выполнялась с помощью акустико-эмиссионного измерительного комплекса A-Line 32D. Длительность записи одной волновой формы АЭ-события составляла 5000 отсчетов при интервале дискретизации 0.2 мкс. Также регистрировалось время проявления события с точностью до 1 мкс. Образцы всех серий разбиты на три группы. В группе 1 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 напряжения σ_1 до определенного уровня. Тем самым в образце формировалась разница (девиатор) напряжений $D^I = \sigma_1^I - \sigma_2^I$. Во втором цикле образец нагружался в условиях одноосного сжатия до уровня $\sigma_1^{II} > D^I$. Схема нагружения приведена на рисунке 2.16.

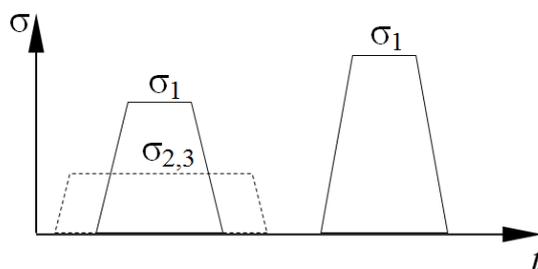


Рисунок 2.16 – Схема нагружения образцов 1 группы

Образцы всех серий в группе 1 подвергались установочным нагружениям при $\sigma_2^I = 2, 4, 10$ МПа и $\sigma_1^I = 5, 8, 20$ МПа соответственно. По результатам испытаний для всех образцов рассчитаны усредненные параметры k : композиты серии А — 0.06; композиты серии В — 0.03; композиты серии С — 0.1; гранит — 3.0; каменная соль — 0.6. Видно, что значения k в исследованных композитах на один–два порядка ниже значений k для горных пород. Это позволяет предположить, что в определенных обстоятельствах при контроле напряжений в породном массиве на основе эффекта памяти в композиционных материалах указанным параметром можно пренебречь.

Пример проявления АЭЭП для образца серии В группы 1 во втором цикле нагружения представлен на рисунке 2.17

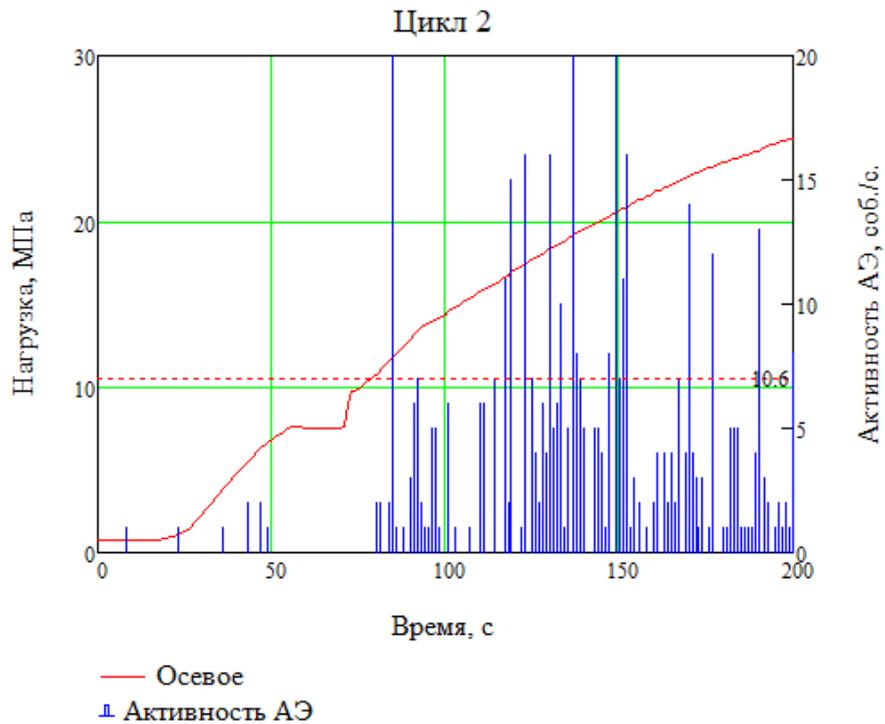


Рисунок 2.17 – Пример проявления АЭЭП во втором цикле нагружения образца серии «В» группы 1

На рисунке 2.18 представлена зависимость относительной погрешности $\Delta ЭП$ воспроизведения эмиссионной памяти от различных значений девиатора напряжений D^I . Погрешность рассчитана по формуле

$$\Delta ЭП = \left[\frac{D^I - \sigma_{1*}^{II}}{D^I} \right] \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

где σ_{1*}^{II} — осевое напряжение во втором цикле, при котором проявляется АЭЭП.

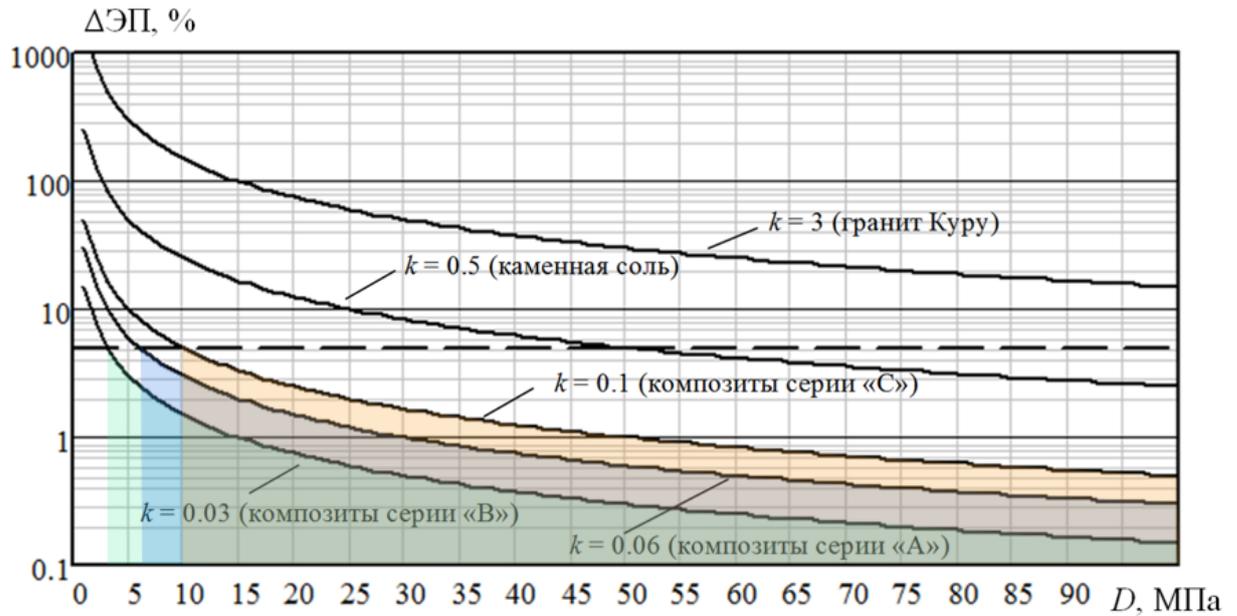


Рисунок 2.18 – Зависимость $\Delta ЭП$ от девиатора напряжений D^I при различных значениях k (штриховой линией отмечен уровень погрешности 5 %)

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

Образцы группы 2 подвергались двухцикловому нагружению, при этом в обоих циклах соблюдалось условие $\sigma_{2,3}^I = \sigma_{2,3}^{II}$, $\sigma_1^I < \sigma_1^{II}$. Схема нагружения представлена на рисунке 2.19

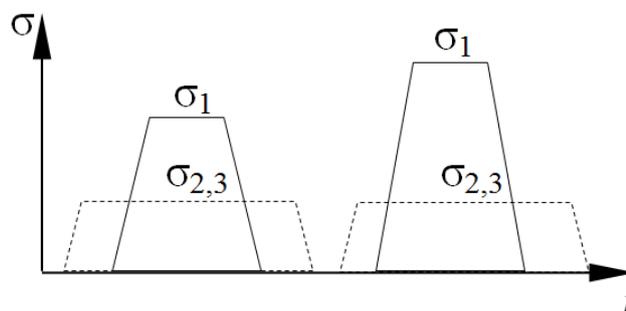


Рисунок 2.19 – Схема нагружения образцов 2 группы

Во всех случаях регистрировалось отчетливое проявление эффекта памяти. На рисунке 2.20 представлен пример проявления АЭЭП в образце серии С для условий $\sigma_{2,3}^I = \sigma_{2,3}^{II} = 5$ МПа, $\sigma_1^I = 16$ МПа. Одновременно с регистрацией напряжений σ_1^{II} , $\sigma_{2,3}^{II}$ и активности АЭ \dot{N}_Σ также регистрировались осевые деформации ε .

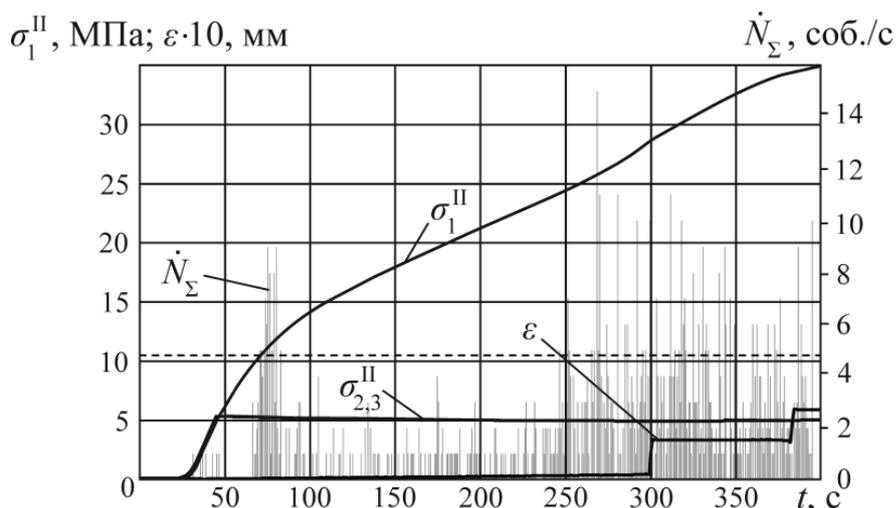


Рисунок 2.20 – Зависимости σ_1^{II} , $\sigma_{2,3}^{II}$, ε и \dot{N}_Σ во втором цикле нагружения образца серии С (штриховой линией отмечен уровень D^I)

Следует отметить, что проявление АЭЭП при подобной схеме нагружения во всех типах материалов наблюдается при достижении условия $\sigma_{1*}^{II} = D^I$. Также обращает на себя внимание тот факт, что резкий скачок продольных деформаций ε происходит значительно позднее скачка \dot{N}_Σ и связан, скорее всего, с частичным разрушением композита. Таким образом, в отличие от горных пород [265,266], деформационный эффект памяти в исследованных материалах не проявляется.

Образцы группы 3 подвергались двухциклового гидростатическому нагружению по схеме $\sigma_{1-3}^{II} > \sigma_{1-3}^I$. В результате испытаний ни в одном образце эффект памяти не наблюдался. Это подтверждает известное условие формирования и проявления АЭЭП, которое заключается в том, чтобы девиатор напряжений в установочном цикле не был равен нулю ($D^I \neq 0$) [263].

С целью установления диапазона напряжений, при которых формируется и проявляется четкий АЭЭП в исследуемых материалах, образцы каждой из серий подвергались многоцикловому одноосному нагружению с одновременной регистрацией активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ . Пример синхронизированных зависимостей σ_1 и \dot{N}_Σ для образца серии А приведен на рисунке 2.21.

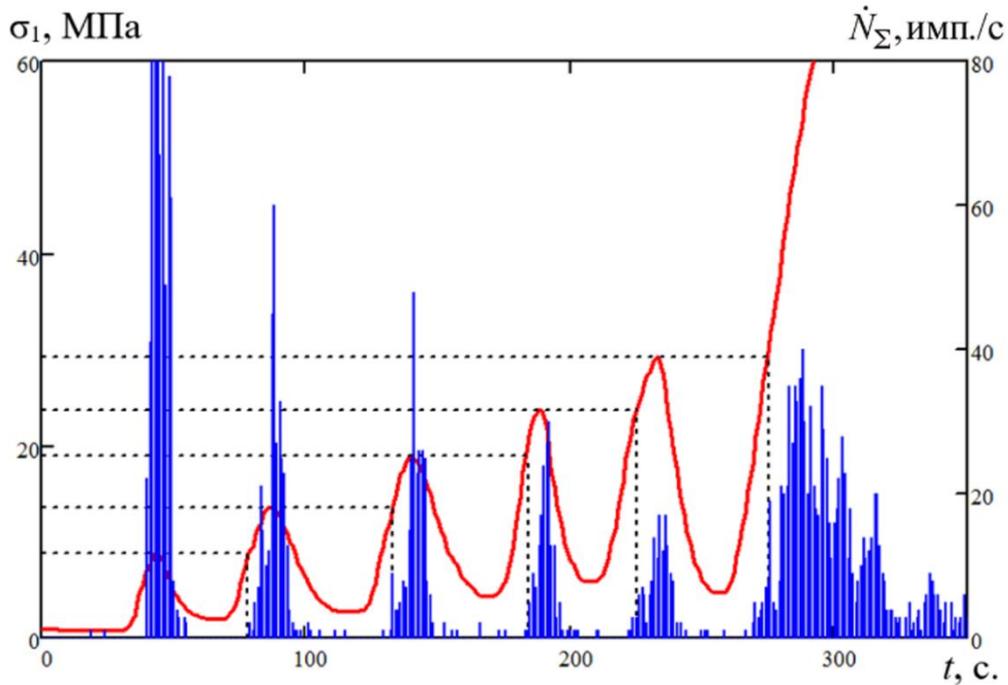


Рисунок 2.21 – Зависимости σ_1 и \dot{N}_Σ при циклических испытаниях образца серии А

Видно, что на поздних циклах нагружения эффект памяти начинает проявляться при более низких значениях σ_1 . Подобная закономерность справедлива и для горных пород [267]. Для оценки сохранности памяти в исследованных материалах был определен показатель FR (Felicity Ratio), являющийся, по сути, отношением $\frac{\sigma_{1*}^{\text{II}}}{\sigma_1}$. На рисунке 2.22 представлены зависимости значений показателя FR от осевой нагрузки σ_1 для образцов всех серий.

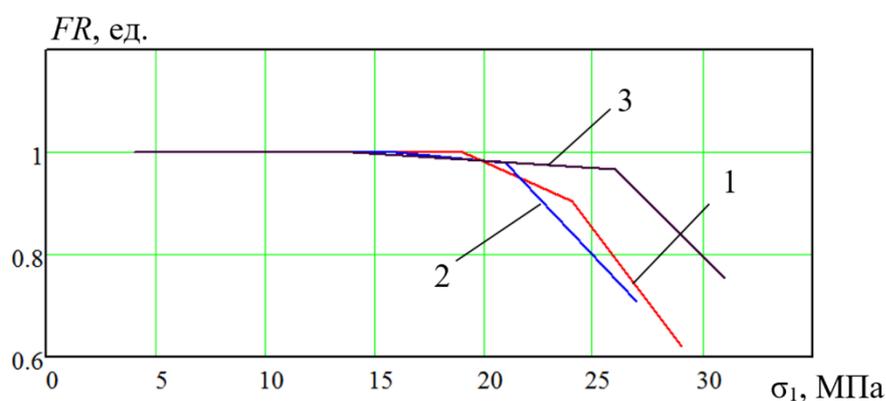


Рисунок 2.22 – Зависимость FR для образцов серий А, В и С

Для образцов серий А, В и С показатель FR остается близким к 1 вплоть до максимальных значений σ_1 , равных 24, 27 и 22 МПа соответственно. Указанные значения и являются верхней границей “рабочего” диапазона напряжений каждого из исследованных композитов. В случае сложного напряженного состояния этот диапазон определит возможные значения D^I в массиве, которые можно контролировать с применением АЭЭП в композиционных материалах.

В дополнение к показателям $\Delta ЭП$ и FR для оценки применимости исследованных композитов для контроля горного давления рассчитаны значения акустико-эмиссионной тензочувствительности S_{AE} при различных значениях бокового давления $\sigma_{2,3}$ (S_{AE} — параметр, характеризующий влияние продольной относительной деформации на уровень активности акустической эмиссии в образце и являющийся отношением приращения активности АЭ к приращению относительных продольных деформаций на участке нагружения [258]). Фактически величина S_{AE} определяет чувствительность метода АЭЭП при определении напряжений. На рисунке 2.23 представлены результаты расчета значений S_{AE} при $\sigma_{2,3} = 0, 2, 4$ и 10 МПа.

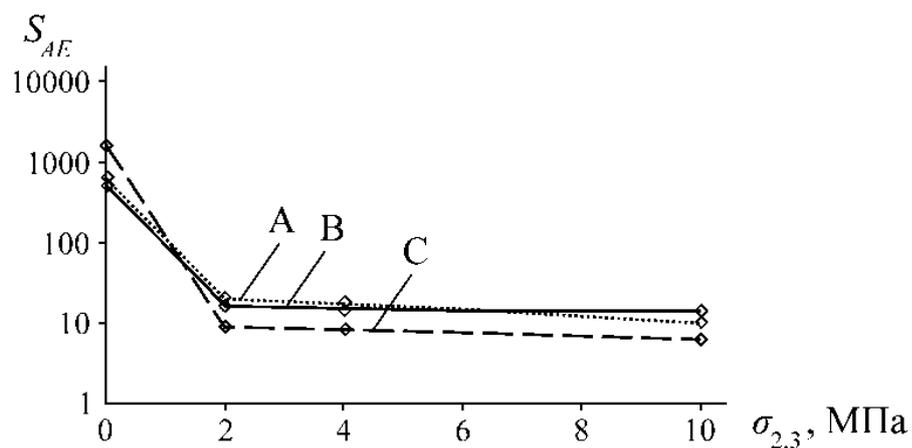


Рисунок 2.23 – Зависимости S_{AE} для композитов серий А, В и С

Отмечено, что при отсутствии бокового давления S_{AE} достигает достаточно высоких значений. Так, при $\sigma_{2,3} = 0$ для слоистого композита серии С $S_{AE} = 1584$. Однако даже при приложении незначительного бокового обжатия значения S_{AE} для всех исследованных материалов падают более чем на два порядка (например, для образца серии С при $\sigma_{2,3} = 2$ МПа $S_{AE} = 9$). Увеличение $\sigma_{2,3}$ приводит к дальнейшему плавному снижению АЭ тензочувствительности. Подобное снижение обусловливается противодействием $\sigma_{2,3}$ раскрытию трещин, сформированных преимущественно в вертикальном направлении. Особенно значительное падение тензочувствительности наблюдается в слоистых композитах, где в силу их анизотропной структуры все трещины образуются вдоль армирующих слоев из углеткани.

Таким образом на основе экспериментов показано, что в отличие от горных пород, свойства твердеющих композиционных материалов можно изменять в достаточно широких пределах за счет использования различных по составу и концентрации наполнителей. В частности, композиты могут иметь незначительный угол внутреннего трения. Благодаря этому при помещении в массив и последующем извлечении из него они способны с высокой точностью и повторяемостью воспроизводить информацию об испытанном девиаторе напряжений в широком диапазоне его абсолютных значений. При этом в большинстве случаев нет необходимости в учете

свойств композитов и определении дополнительных эмпирических поправочных коэффициентов, как в случае использования при оценке динамики НДС акустико-эмиссионного эффекта памяти в горных породах.

2.4 Спектральный анализ акустической эмиссии при нагружении композитов на основе углеродных волокон

В практике акустико-эмиссионного контроля основными регистрируемыми параметрами являются активность, скорость счета АЭ, суммарный счет, энергия и прочие параметры, так или иначе связанные с описанием свойств волновой формы сигналов АЭ во временной области и регламентируемые ГОСТ 27655-88 «Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения». Подобные параметры хорошо подходят для описания динамики развития дефектов в конструкциях, подвергаемых различным механическим и термическим воздействиям, а также для локации указанных дефектов в пространстве. Наряду с очевидными преимуществами использования описанных параметров существует и ряд принципиальных недостатков, связанных с невозможностью характеристики механизма образования и роста дефекта. В этом случае дополнительную информацию может дать спектральный анализ зарегистрированных импульсов акустической эмиссии.

Попытки использования анализа спектров акустической эмиссии обычно сталкиваются с рядом проблем аппаратного и методического характера. Так, при использовании в качестве основного информативного параметра частоты максимума спектра f_{max} , неизбежно возникает необходимость использования широкополосных акустических преобразователей [268]. При этом известно, что чувствительность таких преобразователей значительно уступает их резонансным аналогам [269].

Другой подход к спектральной обработке АЭ сигналов заключается в подробном анализе спектров отдельных акустических событий, взятых на различных стадиях нагружения образцов [270–272]. Результаты

интерпретации в этом случае отличаются низкой надежностью и повторяемостью из-за значительной случайной составляющей в каждом отдельном эмиссионном событии. Совместный анализ всех АЭ событий без дополнительной обработки так же малоинформативен, как это будет продемонстрировано далее.

Преодоление описанных проблем возможно за счет комплексного спектрального анализа всех волновых форм зарегистрированных АЭ событий.

Для демонстрации эффективности спектрального анализа в качестве инструмента изучения особенностей проявления АЭЭП в композиционных материалах был проведен ряд экспериментов по механическому нагружению образцов [273,274]. В качестве армирующих компонентов для образцов использовались дисперсно-распределенные нити углеволокна (группа образцов «В») и параллельно уложенные слои углеткани (группа образцов «С»). Технология синтеза указанных композитов подробно описана в п. 2.3.1. Всего было изготовлено по 5 однотипных образцов в виде для каждой серии в виде цилиндров высотой 90 мм и диаметром 45 мм. На рисунке 2.24 представлены микрофотографии шлифов образцов групп «В» и «С»

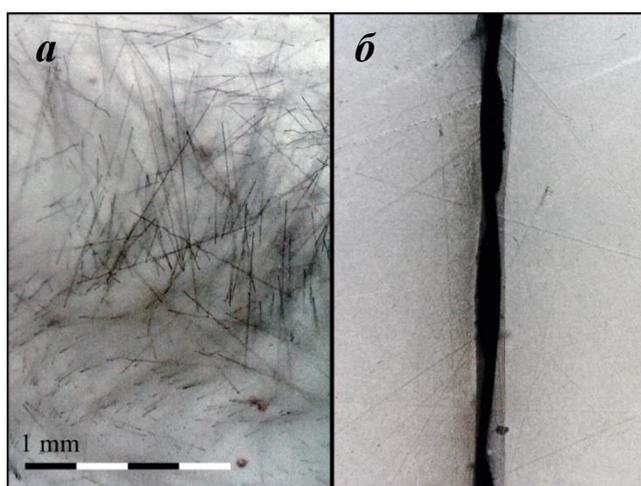


Рисунок 2.24 – Микрофотография шлифа композита серии «В» (а) и серии «С» (б)

Образцы нагружались по одноосной схеме. При этом производилась запись основных параметров АЭ, а также полных волновых форм всех зарегистрированных импульсов с помощью многоканального акустико-эмиссионного комплекса A-Line 32D с комплектом резонансных акустических преобразователей GT-200. Полоса пропускания всего измерительного тракта составила 25–500 кГц. Длительность записи одной волновой формы составляла 5000 отсчетов при интервале дискретизации 0.2 мкс. Также регистрировалось время проявления события с точностью до 1 мкс. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.25.

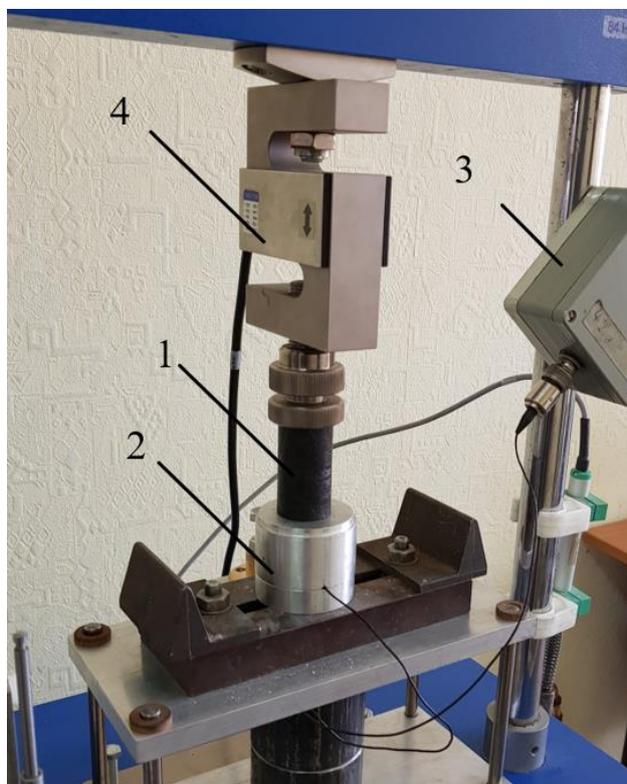


Рисунок 2.25 – Лабораторная установка: 1 – образец; 2 – преобразователь АЭ; 3 – предусилитель; 4 – динамометр

Результатом эксперимента являлись полученные зависимости осевой механической нагрузки σ и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ от времени нагружения t , а также пакет отдельных осциллограмм каждого АЭ события. Все полученные осциллограммы подвергались быстрому преобразованию

Фурье для перевода их в спектральную форму. Для соблюдения требований преобразования длительность сигналов ограничивалась 4096 отсчетами. Полученный таким образом набор амплитудных спектров представлялся в виде так называемой спектрограммы – трехмерного изображения, где по горизонтальной оси откладывается номер АЭ события N , по вертикальной – частота f , а цветом кодируется амплитуда. Для корректной интерпретации полученных спектрограмм на них требуется наложить зависимость $\sigma(t)$. Особенностью формирования осциллограммы является последовательное расположение спектров в ней в функции от порядкового номера. При этом в зависимости $\sigma(t)$ по оси абсцисс откладывается время с периодом дискретизации $t_{\text{диск}} = 1$ с. В этом случае, с учетом того, что в одну секунду происходит сразу несколько АЭ событий, происходит «рассинхронизация» спектрограммы и графика нагрузки. Для решения этой проблемы существует два пути – коррекция осциллограммы или коррекция зависимости $\sigma(t)$. Корректирование осциллограммы является трудоемким процессом и, впоследствии, может осложнить ее дальнейшую обработку. Наиболее простым решением является трансформация зависимости $\sigma(t)$ в $\sigma(N)$.

При регистрации нагрузки запись начинается с первой секунды. Таким образом, порядковый номер записи значений нагрузки одновременно является и секундой, на которой эта нагрузка была зарегистрирована. Для трансформации $\sigma(t)$ в $\sigma(N)$ из файлов осциллограмм берется информация о точном времени проявления АЭ события $t_{\text{соб}}$. Величины $t_{\text{соб}}$ округляются до целых значений. В этом случае $t_{\text{соб}}$ одновременно становится индексом зарегистрированного отсчета нагрузки σ . Таким образом из всего массива отсчетов $\sigma(t)$ выбираются те, которым соответствуют $t_{\text{соб}}$. Пример зависимости $\dot{N}_z(t)$, полученной в результате нагружения образца из первой группы и осциллограммы с наложенной зависимостью $\sigma(N)$ приведен на рисунке 2.26.

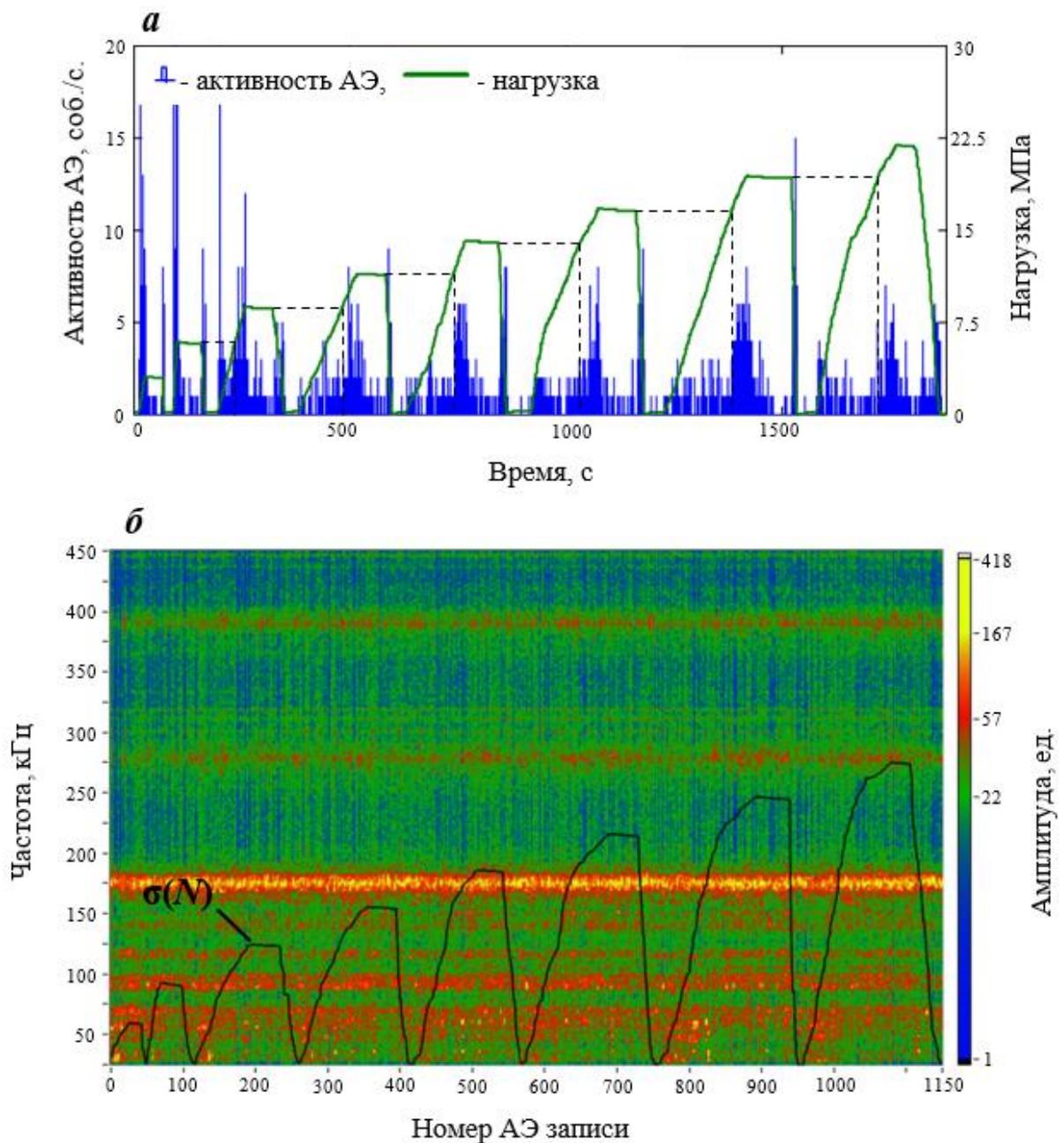


Рисунок 2.26 – Активность АЭ при нагружении образца из группы «В» (а) и пример полученной спектрограммы с наложением зависимости $\sigma(N)$ (б)

Из рисунка 2.26а видно, что на всех циклах нагружения, начиная с III, отчетливо выявляются скачки активности АЭ при достижении нагрузкой максимума предшествующего цикла. При этом на полученной спектрограмме (рисунок 2.26б) без дополнительно обработки не прослеживается никаких закономерностей изменения спектрального состава АЭ событий. В осциллограмме выделяется только область повышенных амплитуд вдоль

горизонтальной линии на уровне 175 кГц. Подобная линия обусловлена резонансной формой АЧХ используемого преобразователя, для которого резонансная частота как раз и составляет $f_0 = 175\text{кГц}$.

Вид представленной на рисунке 2.26б спектрограммы в первую очередь обуславливается случайной природой отдельных АЭ импульсов. Уменьшить влияние случайного компонента возможно при использовании специальной обработки. В данном случае предлагается сглаживание спектрограммы скользящим средним в прямоугольном окне в соответствии с выражением

$$m_{i,j} = \frac{1}{a \cdot b} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b A_{i,j}, \quad (2.4)$$

где a и b – ширина и высота окна сглаживания, $A_{i,j}$ – элементы исходной матрицы амплитуд АЭ событий.

Следует отметить, что при использовании скользящего среднего теряется информация об абсолютных значениях амплитуд зарегистрированных АЭ импульсов. Такая потеря, впрочем, не оказывает существенного влияния на результаты интерпретации спектрограмм, так как в итоге значение имеет лишь относительное изменение амплитуд на различных стадиях нагружения.

При сглаживании скользящим средним возникает проблема выбора параметров окна сглаживания. На практике конкретные численные значения для получения наилучшего результата подбираются оператором. Однако при использовании слишком больших окон возникают краевые эффекты – потери данных на краях области сглаживания. В данном случае для сглаживания было выбрано окно с параметрами $a = 15$ и $b = 5$ при количестве зарегистрированных АЭ импульсов $N = 1150$ и количестве дискретов по оси частот – 2048. Результат преобразования осциллограммы представлен на рисунке 2.27.

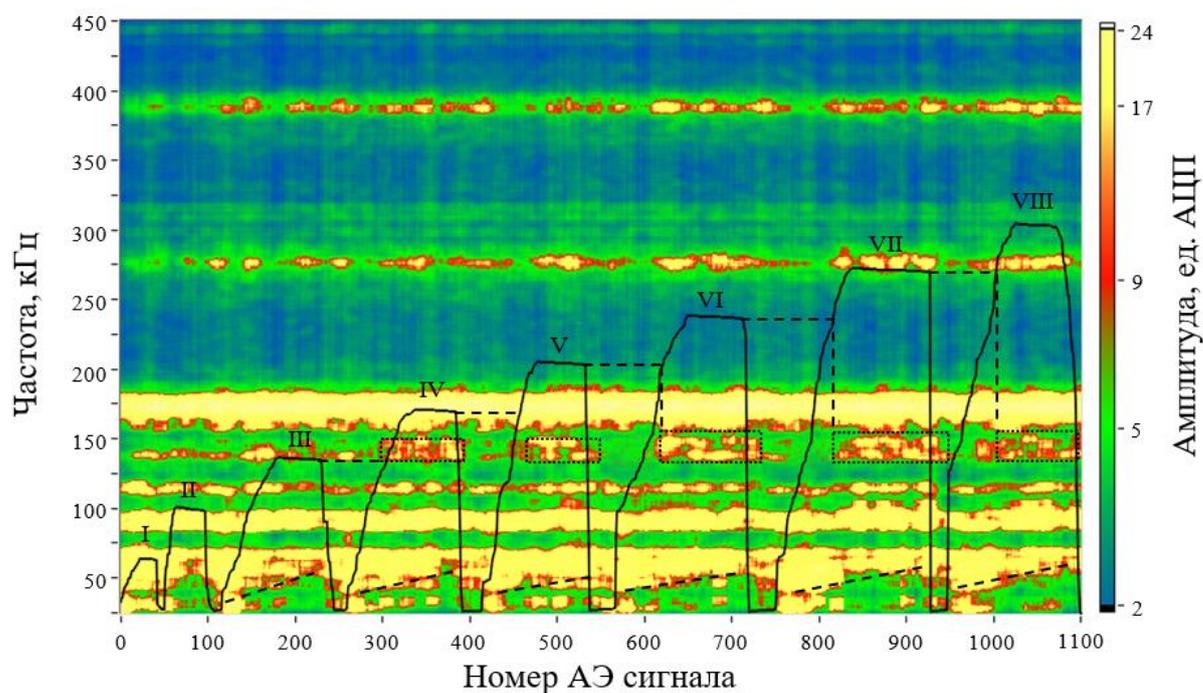


Рисунок 2.27 – Пример сглаженной спектрограммы для образца первой группы серии «В» с наложением зависимости $\sigma(N)$ (римскими цифрами отмечены номера циклов нагружения)

В результате обработки осциллограммы на ней оказывается возможным выделить ряд закономерностей. Во-первых, в диапазоне до 50 кГц наблюдается снижение роли низких частот при увеличении нагрузки. 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 [275].

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, т.е. с уровня нагрузки $\sigma = 0.1\sigma_{сж}$. Таким образом эффект Кайзера в исследуемом

материале проявляется не только в виде скачка активности акустической эмиссии, но и в виде резкого изменения спектральных характеристик АЭ сигналов.

Результаты нагружения образца серии «С» представлены на рисунке 2.28.

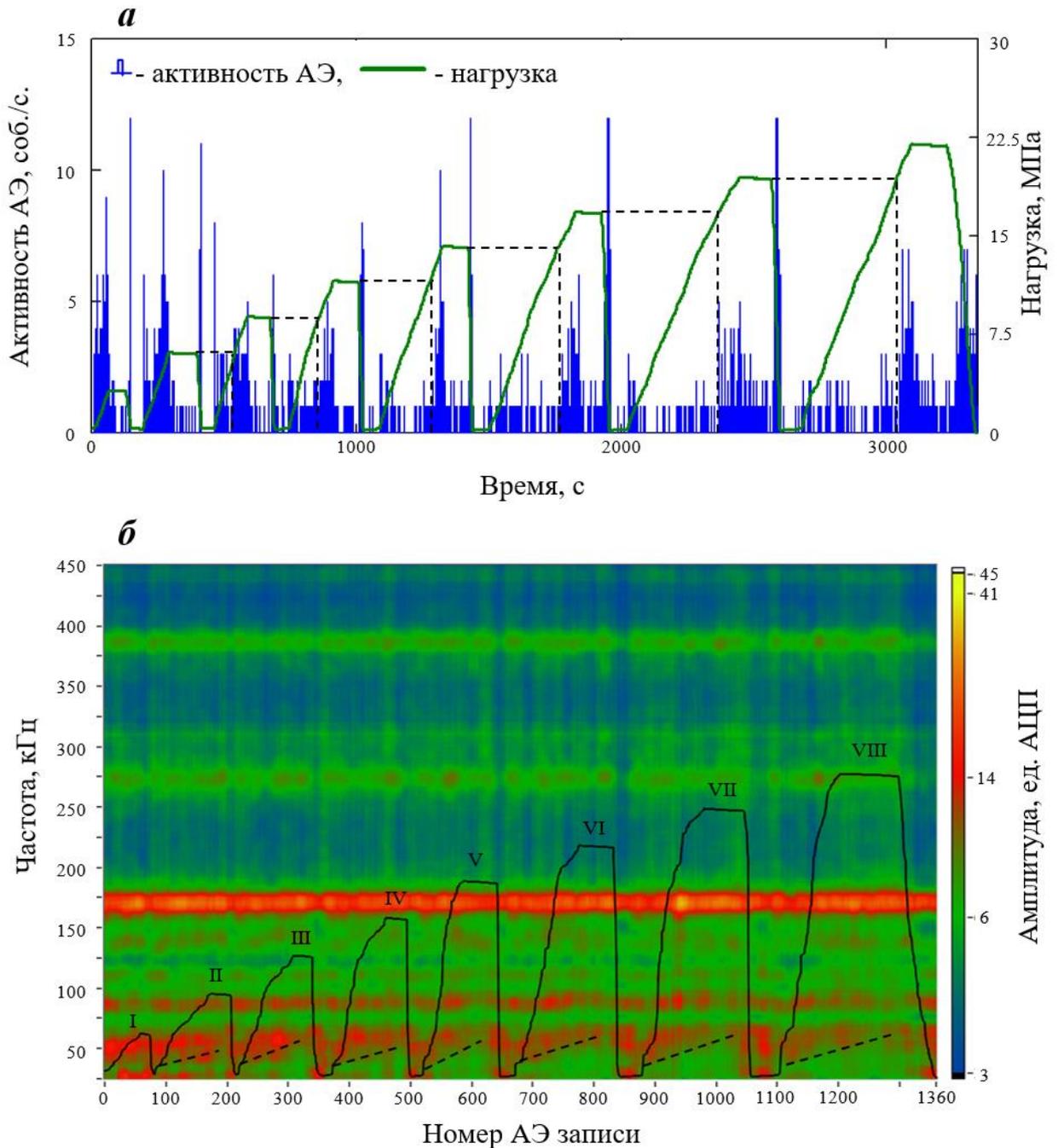


Рисунок 2.28 – Активность АЭ при нагружении образца серии «С» (а) и пример полученной спектрограммы с наложением зависимости $\sigma(N)$ (б)

Рисунок 2.28а демонстрирует наличие акустико-эмиссионного эффекта памяти в композите, усиленном слоями углеткани. Однако, в отличие от образцов группы «В», при спектральном анализе АЭ (рисунок 2.28б) значимого изменения в полосе частот $130 \div 150$ кГц не наблюдается. Подобная закономерность может объясняться отсутствием в композитах серии «С» трещин малого размера, способных вызвать высокочастотные АЭ события (см рисунок 2.24б). В данном случае присутствует лишь повторяющееся от цикла к циклу снижение амплитуд на частотах до 50 кГц при возрастании нагрузки.

В результате спектрального анализа импульсов АЭ было установлено, что:

1) Анализ спектров акустической эмиссии наиболее эффективен при включении в обработку всех зарегистрированных волновых форм. При этом для исключения случайной компоненты необходимо применять сглаживание спектрограмм как по оси времени, так и по оси частот.

2) Спектральный состав АЭ событий при циклическом нагружении образцов композитов, усиленных дисперсными волокнами, изменяется как в диапазоне низких частот (до 50кГц) так и в диапазоне частот $130 \div 150$ кГц. Причем резкое изменение амплитуд в диапазоне $130 \div 150$ кГц соответствует моменту достижения нагрузкой на образец максимального ранее испытанного значения. Таким образом акустико-эмиссионный эффект памяти (эффект Кайзера) для подобных материалов проявляется не только во временной, но и в спектральной области.

3) Спектральный состав АЭ событий при циклическом нагружении образцов композитов, усиленных листами углеткани, изменяется только в диапазоне низких (до 50кГц) частот. Это можно связать с отсутствием малых по протяженности трещин, способных к упругому закрытию-открытию при нагружении и разгрузке.

2.5 Особенности формирования и проявления АЭЭП в композиционных материалах в условиях растягивающих механических напряжений

2.5.1 Акустико-эмиссионные эффекты при испытаниях образцов на чистый разрыв

В пунктах 2.1–2.4 подробно рассматриваются особенности формирования и проявления акустико-эмиссионных эффектов в ряде композиционных материалов в условиях различных комбинаций сжимающих механических напряжений. В этом случае армирующий компонент служит в качестве инструмента повышения равномерности распределения напряжений в образцах или изменения направления преимущественного дефектообразования (для анизотропных композитов). Принципиально другие механизмы возникновения АЭ будут наблюдаться при работе композиционных элементов в режиме растягивающих механических напряжений. Матрица композита на основе эпоксидной смолы характеризуется прочностью, на два или более порядка меньше, чем прочность на растяжение углеродных армирующих компонентов. В этом случае наибольший вклад в формирование импульсов АЭ будет вносить взаимодействие «матрица-армирующий компонент». При этом углеродные волокна будут препятствовать формированию магистральной разрывной трещины. Армирующий компонент в виде дисперсно-распределенных частиц алюминия, напротив, не способен препятствовать образованию магистрального разрывного нарушения и в целом не повышает прочность композита на разрыв. В этом случае необходимость армирования определяется требованием обеспечения равномерного распределения растягивающих напряжений.

С целью выявления конкретных особенностей проявления АЭ эффектов в условиях растягивающих напряжений был проведен ряд экспериментальных исследований [276].

В лабораторных условиях были исследованы две группы по пять образцов гантелеобразной формы длиной $L = 170$ мм с центральным сечением в виде окружности диаметром $d = 10$ мм, изготовленные тех же дисперсно-наполненных композиционных материалов, что и образцы групп «А» и «В», подробно описанные в п. 2.3.1.

В процессе нагружения проводили измерение и запись активности акустической эмиссии $\dot{N}_\Sigma(t)$, а также полных волновых форм всех зарегистрированных импульсов с помощью многоканального акустико-эмиссионного комплекса A-Line 32D с комплектом из двух акустических преобразователей GT-200, закрепленных на противоположных торцах образца. Полоса пропускания всего измерительного тракта составила 25–500 кГц. Длительность записи одной волновой формы составляла 1024 отсчета при интервале дискретизации 0,2 мкс. Также регистрировалось время проявления каждого АЭ-события с точностью до 1 мкс. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.29.

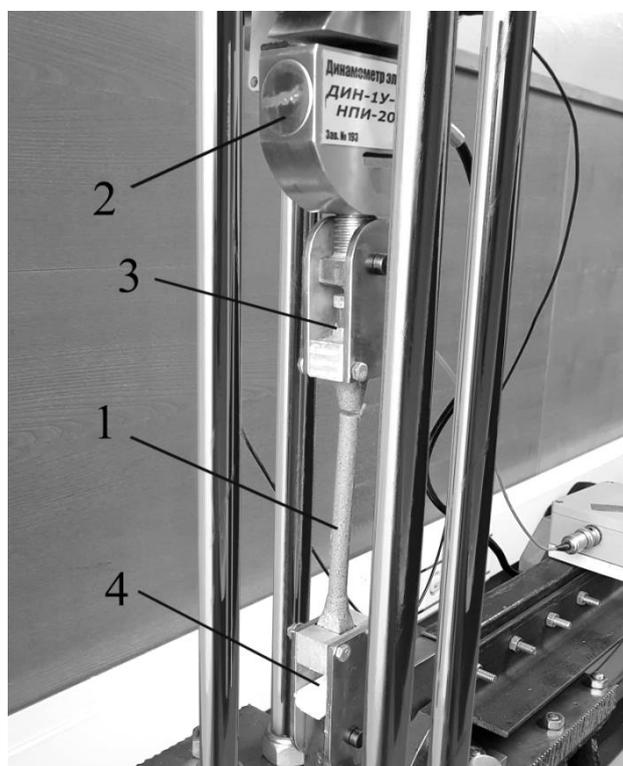


Рисунок 2.29 - Внешний вид лабораторной установки: 1 – образец серии «А»; 2 – динамометр; 3, 4 – акустические преобразователи

На рисунке 2.30 в качестве примера приведены зависимости активности акустической эмиссии $\dot{N}_\Sigma(t)$ и растягивающей нагрузки $\sigma_p(t)$ для образцов из группы «В» и «А».

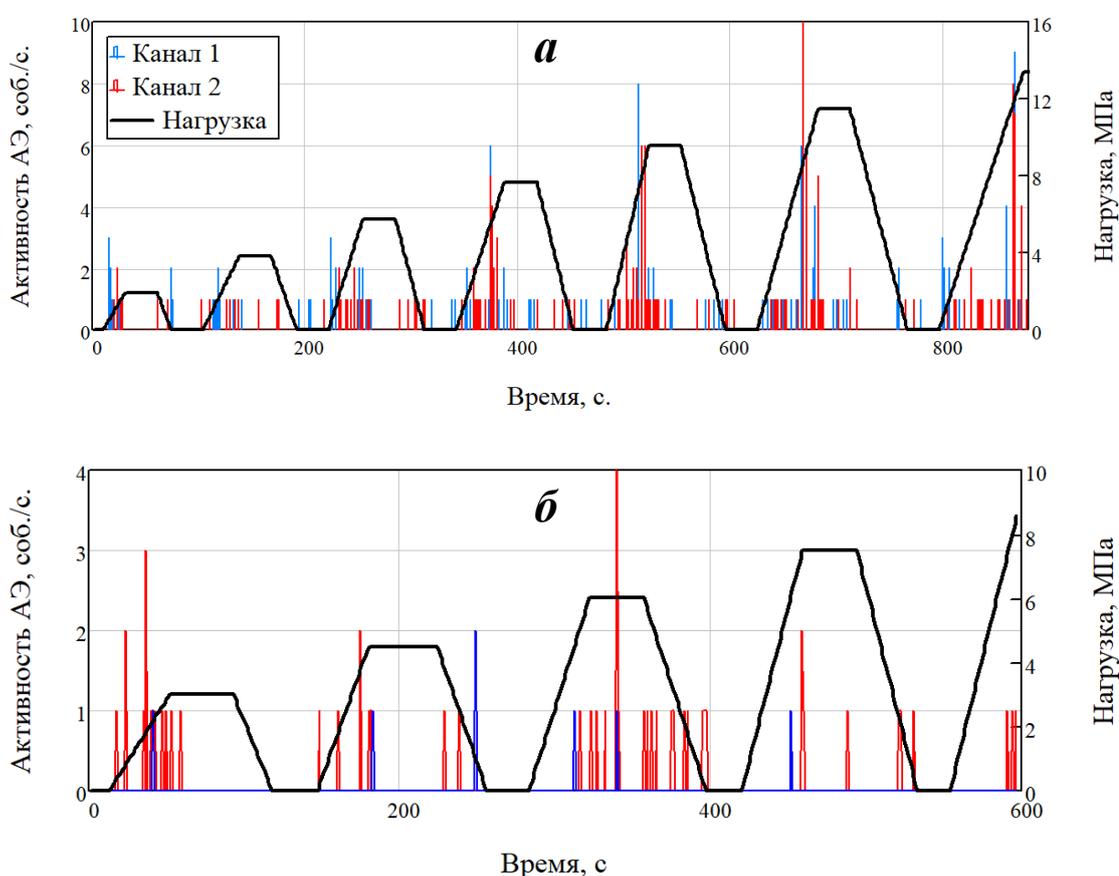


Рисунок 2.30 – Активность акустической эмиссии при циклическом нагружении образца группы «В» (а) и «А» (б)

Как видно из рисунка 2.30а, процесс циклического нагружения образцов, армированных углеродными волокнами, сопровождается скачкообразным ростом активности акустической эмиссии в момент достижения нагрузкой σ уровня максимума предшествующего цикла σ^* , что свидетельствует о достаточно четком проявлении в обоих композиционных материалах АЭЭП [277]. Для образцов, армированных алюминиевой пудрой, проявление АЭЭП не является очевидным из-за малого количества АЭ событий, регистрируемых в процессе циклического растяжения.

В то же время проведенный 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 выше 4 МПа (при более низком значении σ_p ЭК не проявляется). Для группы «В» FR колеблется вблизи значения 1 вплоть до разрушения образца, а для образцов группы «А» $FR = 0,91$ (показатель FR определен только для тех образцов и циклов нагружения, где удалось зарегистрировать проявление АЭЭП). Более высокое качество сохранности памяти для образцов группы «В» можно объяснить наличием в матрице волоконных армирующих компонентов, работающих «на разрыв».

Для практического применения эффекта памяти в композитах с целью контроля напряжений в кровле интерес представляет взаимосвязь уровня эмиссии со степенью деформирования образца. Такая взаимосвязь описывается параметром акустико-эмиссионной тензочувствительности S_{AE}

$$S_{AE} = \frac{\Delta \dot{N}_{\Sigma}}{\Delta \varepsilon}, \quad (2.4)$$

где $\Delta \dot{N}_{\Sigma}$ – приращение активности акустической эмиссии на участке нагружения; $\Delta \varepsilon$ – приращение относительных деформаций на участке нагружения.

Экспериментально определено, что для образцов группы «А» среднее значение $S_{AE} = 495$ соб./с, а для группы «В» – $S_{AE} = 2056$ соб./с. Поскольку упругие характеристики материалов обеих групп близки, то основной вклад в значение тензочувствительности вносит активность акустической эмиссии, уровень которой в композитах с волокнистым армирующим компонентом существенно выше. Отметим также, что полученные для исследованных

композитов значения $S_{AЭ}$ на порядок превышают значения $S_{AЭ}$ для большинства горных пород [245].

При контроле состояния кровли горных выработок интерес представляет не только ее напряженно-деформированное состояние, но и наличие и геометрическое положение расслоений (трещин разрыва, очагов заколообразования и др.). На первый план при этом выходит необходимость идентификации АЭ-сигналов, сопровождающих хрупкое разрушение композитного образца по плоскости, перпендикулярной его оси, а также обеспечения максимально точной локации места разрушения. На рисунке 2.31 представлены примеры сигналов акустической эмиссии во временной и частотной областях, зафиксированные преобразователями на противоположных торцах образца группы «В» в процессе нагружения и в момент его хрупкого разрушения.

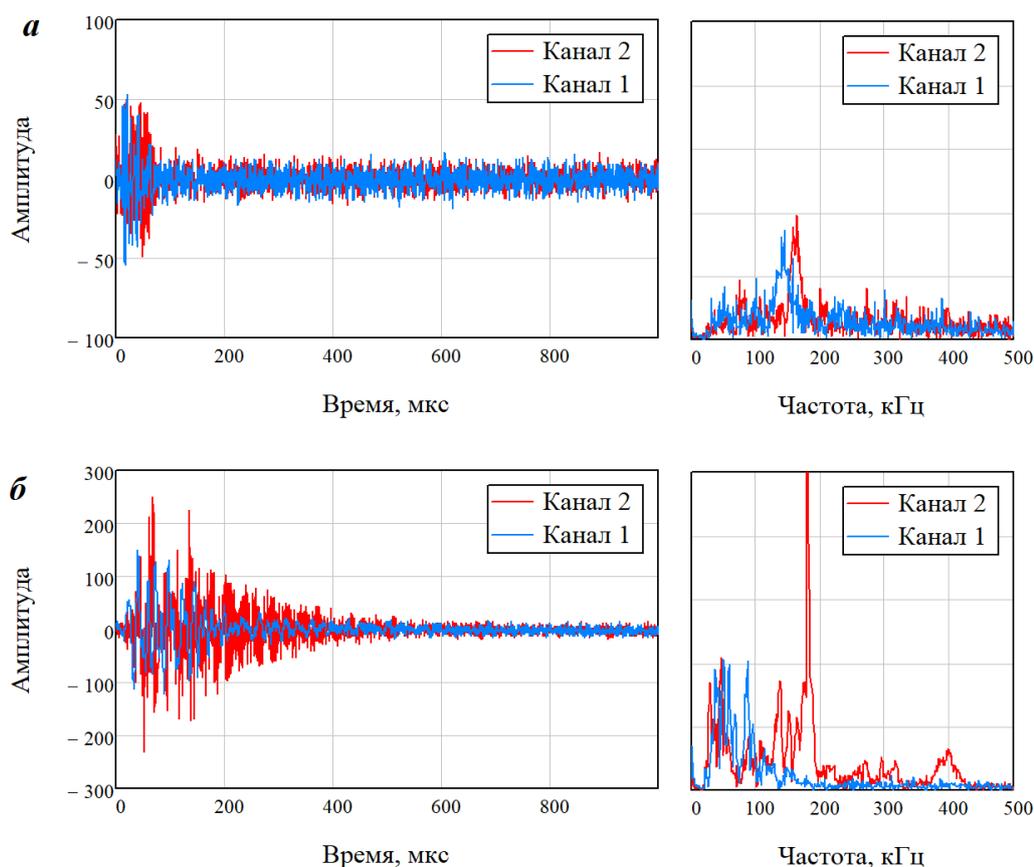


Рисунок 2.31 – Волновые формы и спектры сигналов акустической эмиссии при испытании образца группы «В» в процессе нагружения (а) и в момент разрыва (б)

Как следует из рисунка 2.31а, амплитуды и спектральный состав сигналов в процессе нагружения на обоих торцах достаточно близки. В то же время у сигналов, зарегистрированных на торцовых поверхностях образца при его хрупком разрушении, наблюдаются существенные различия как по амплитуде, так и по спектрам (см. рисунок 2.31б). При этом низкоамплитудному сигналу соответствует более низкочастотный спектр. Это объясняется тем, что хрупкое разрушение произошло со смещением относительно центра образца. Таким образом, пробег упругой волны от места образования трещины до обоих торцов оказался разным, и из-за частотно-зависимого затухания амплитудные и частотные параметры сигналов не совпадают. Абсолютные времена первых вступлений принятых сигналов различаются на $\Delta t = 53$ мкс. Исходя из известной скорости продольной волны в композите $V = 2000$ м/с, координату места разрыва l можно определить из выражения

$$l = \frac{L - V\Delta t}{2}. \quad (2.5)$$

Для рассматриваемого образца расчетное значение l составило 32 мм, а реальная координата разрыва находилась от торца образца на расстоянии 37 мм при длине образца 170 мм. Таким образом, относительная погрешность определения координаты составила 2,94 %. Критериями выделения сигналов от разрушения образца на фоне акустической эмиссии, возникающей при образовании микротрещин, выступают: увеличенные в 3 раза и более амплитуды событий; значительные различия в спектральном составе АЭ-событий, значение Δt , не превышающее значение L/V для конкретного образца. В случае, когда однозначно выделить необходимые АЭ-события не удается, следует воспользоваться более сложным алгоритмом корреляционной фильтрации, описанным в работе [278].

2.5.2 Акустико-эмиссионные эффекты при испытании композитов по «бразильской» схеме

Еще одним способом формирования растягивающих напряжений в образцах является испытание образцов по так называемой «Бразильской» схеме [279], нашедшей широкое распространение при испытаниях горных пород и бетонов. В этом случае цилиндрические образцы нагружаются вдоль диаметра, при этом в центральной части образца формируются горизонтальные растягивающие напряжения σ_p . Схема нагружения показана на рисунке 2.32.

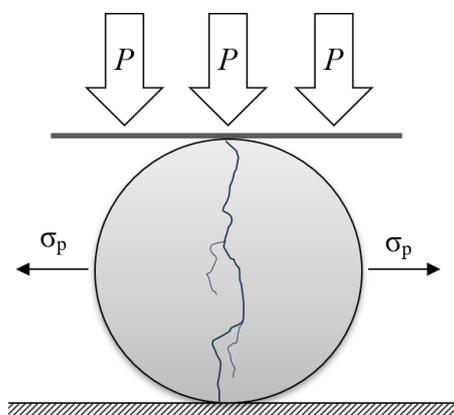


Рисунок 2.32 – Схема испытаний образцов по «Бразильской» схеме

В исследованиях участвовали образцы композитов в виде цилиндров диаметром 45 мм и длиной 45 мм, армированные алюминиевой пудрой (серия «А») и углеродными волокнами (серия «В»). Более подробно технология синтеза композитов описана в п. 2.3.1. В каждой из серий испытывалось по 5 образцов, при этом регистрировались зависимости активности акустической эмиссии и усилие, создаваемого прессом P , в функции от времени t , а также полные волновые формы для последующей спектральной обработки.

На рисунке 2.33 представлены примеры зависимостей $\dot{N}_\Sigma(t)$ и $P(t)$ для образцов серии «А» и «В».

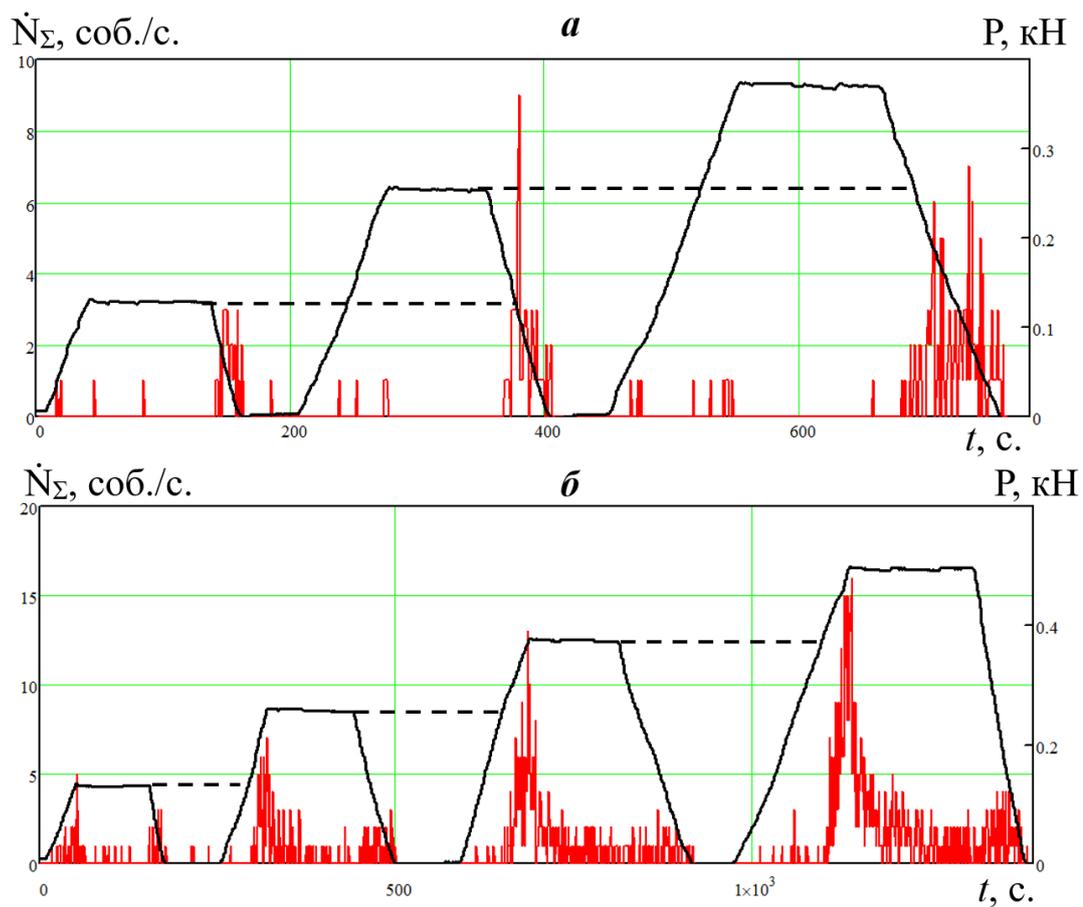


Рисунок 2.33 – Пример зависимостей $\dot{N}_\Sigma(t)$ и $P(t)$ для образца серии «А» (а) и серии «В» (б)

В дополнение к зависимостям $\dot{N}_\Sigma(t)$ и $P(t)$ был выполнен спектральный анализ АЭ импульсов по алгоритму, описанному в п. 2.4. Примеры спектрограмм для серий «А» и «В» представлены на рисунке 2.34

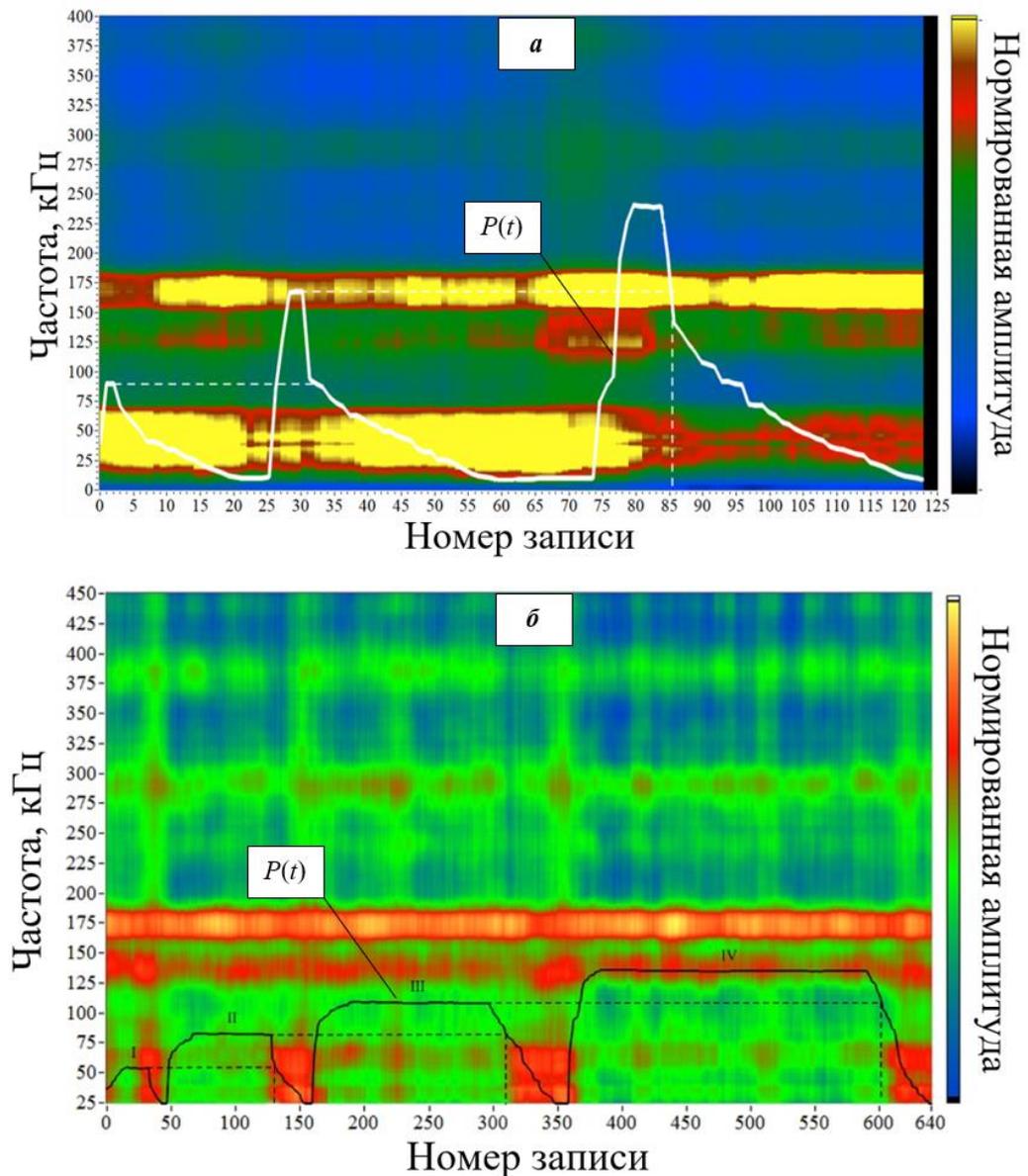


Рисунок 2.34 – Примеры спектрограмм для образцов серии «А» (а) и серии «В» (б)

Рисунок 2.33 демонстрирует существенное отличие особенностей формирования и проявления АЭЭП в исследованных композитах. Для композитов, армированных углеродными волокнами, характерно «классическое» проявление эффекта Кайзера, заключающееся в резком росте зависимости $\dot{N}_2(t)$ в момент достижения нагрузкой максимальных уровней P^* , достигнутых в предшествующем цикле нагружения. Также следует отметить возникновение всплесков эмиссии на ветвях разгрузки.

В отличие от композитов серии «В», композиты, армированные алюминиевым порошком, не демонстрируют склонности к проявлению АЭЭП в режиме растягивающих напряжений при испытании по «бразильской» схеме. Резкий всплеск эмиссии наблюдается при на ветви разгрузки, однако его начало совпадает с началом снятия нагрузки и не может свидетельствовать о проявлении акустико-эмиссионной «памяти».

Более детальный анализ параметров проявления АЭЭП возможно произвести при изучении спектров сигналов АЭ. На спектрограмме, представленной на рисунке 2.34б, наблюдается отчетливое и резкое изменение амплитуд в диапазоне частот $25 \div 70$ кГц, причем возрастание амплитуд в этом диапазоне происходит каждый раз, когда при снижении нагрузки, она переходит через уровень P^* . Амплитуды низких частот остаются высокими вплоть до пересечения уровня P^* на этапе последующего нагружения. В этот момент они восстанавливают первоначальные значения. Подобное поведение можно объяснить тем, что на этапе разгрузки акустическая эмиссия имеет преимущественно фрикционную природу (т.е. связана с трением между берегами трещин), т.к. образования новых и роста существующих трещин практически не происходит. В процессе снятия нагрузки присутствуют тангенциальные напряжения на границе «матрица-армирующее волокно» [280], возникающие из-за существенной разницы в упругих модулях эпоксидной смолы ($E = 40$ МПа) и углеродного волокна ($E = 50$ ГПа) что и приводит к «скользящему» нарушению на границе «волокно-матрица». При этом в процессе нагружения растягивающие напряжения, способные разорвать используемые углеродные волокна, не достигались.

В отличие от композитов серии «В», композиты серии «А» не демонстрируют существенного изменения спектрального состава АЭ сигналов, приуроченного к проявлению АЭЭП, что связано с принципиально другим предназначением армирующего компонента. В этом случае металлические частицы способствуют более равномерному распределению

сжимающих напряжений и препятствуют образованию магистральных трещин.

При использовании спектрального анализа АЭ необходимо понимать, что на практике вычисление точных характеристик источника сигнала практически невозможно из-за необходимости вычисления как функции отклика используемых преобразователей, так и всей системы в целом. И если подходы к вычислению функций отклика преобразователей известны [281,282], то нахождение функции всей системы (включающей преобразователи, образец, нагружающее устройство и т.п.) является чрезвычайно сложной задачей. Несмотря на вышесказанное, относительное изменение спектральных характеристик сигналов АЭ в процессе нагружения может дать важную косвенную информацию о характере и степени нарушенности композиционных материалов.

2.6 Изучение механизмов формирования АЭ импульсов в композитах и некоторых горных породах на основе АФ-РА анализа

2.6.1 Основные принципы АФ-РА анализа

Одним из способов изучения механизмов формирования акустико-эмиссионных импульсов при деформировании гетерогенных материалов является применение так называемого АФ-РА анализа, нашедшего широкое применение при изучении механизмов разрушения горных пород и бетонов [283–287].

Сигналы акустической эмиссии, формирующиеся при дефектообразовании в материале, содержат информацию о режиме разрушения. Для анализа этого режима используются параметры АЭ, такие как счет акустической эмиссии N , продолжительность АЭ события t_d , время нарастания RT и максимальная амплитуда A_{max} . Основным смыслом указанных параметров проиллюстрирован схемой на рисунке 2.35.

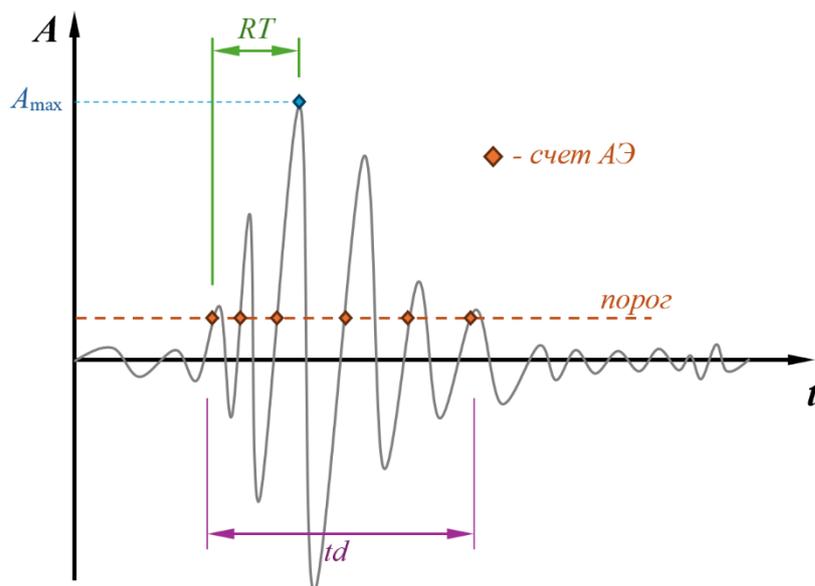


Рисунок 2.35 – Схема определения основных параметров АЭ сигнала для АF-RA анализа

Угол подъема RA и средняя частота AF рассчитываются на основе этих параметров на основании выражений

$$RA = \frac{RT}{A_{max}}, \quad (2.6)$$

$$AF = \frac{N}{td}, \quad (2.7)$$

где N – количество пересечений передним фронтом волновой формы АЭ события порогового значения.

Соотношение между параметрами RA и AF может указывать на различные режимы образования трещин. Образование трещин в режиме растяжения обычно сопровождается выделением энергии в виде продольных волн, для которых характерны малые значения RA. Сдвиговые нарушения, напротив, вызывают преимущественно поперечные волны с высокими значениями RA.

Частотный параметр AF также чувствителен к режиму трещинообразования, при этом обычно наблюдается снижение AF при переходе от режима растяжения к режиму сдвига, а также формированию

макротрещин [285,286]. На рисунке 2.36 представлена условная схема оценки режимов трещинообразования по анализу величин RA и AF.

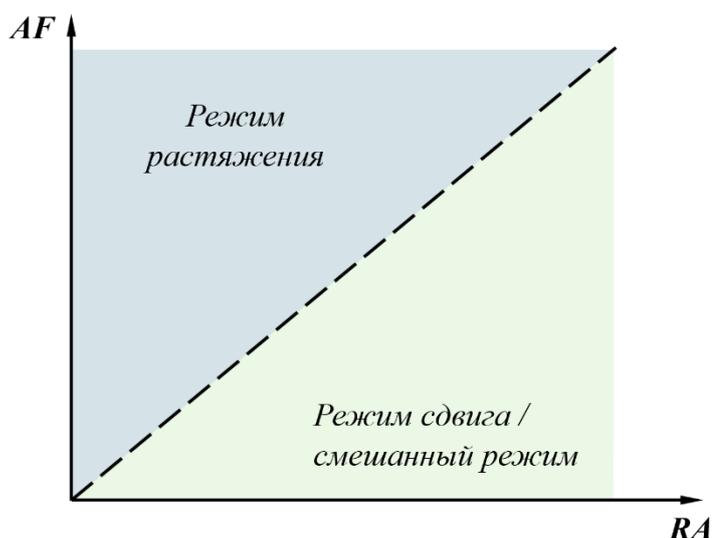


Рисунок 2.36 – Оценка режимов трещинообразования по анализу параметров RA и AF

Следует отметить, что классификация АЭ событий на основе AF-RA анализа может носить только относительный характер, т.к. конкретные значения RA и AF будут зависеть как от типа исследуемого материала, так и от параметров электроакустического тракта регистрирующей аппаратуры. Несмотря на отмеченное, AF-RA анализ может быть эффективно использован для наблюдения за изменением характера трещинообразования во времени, а также для сравнения однотипных материалов, подвергаемым различным режимам нагружения. В этом случае необходимо гарантировать единообразие подходов к обработке АЭ сигналов.

Приведенная на рисунке 2.35 схема АЭ события не в полной мере отражает реально регистрируемые АЭ события. Для примера на рисунке 2.37 приведена волновая форма, зарегистрированная измерительным комплексом A-Line 32d в процессе одноосного нагружения композита серии «В»

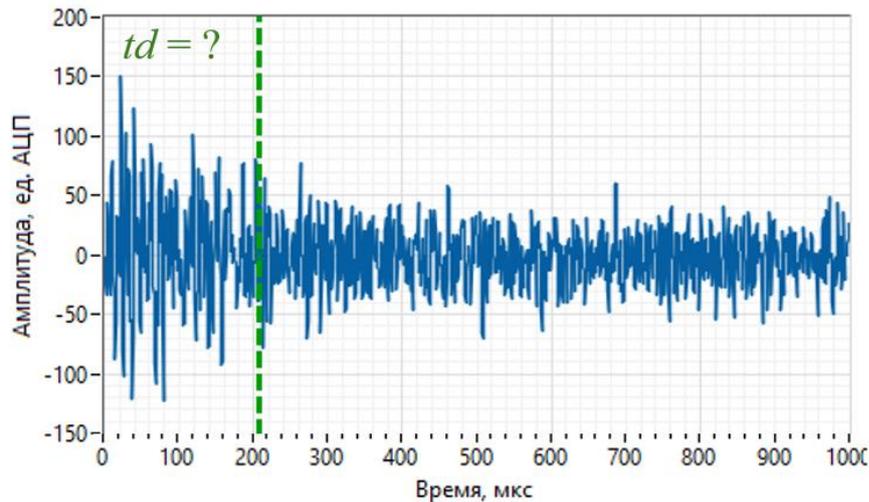


Рисунок 2.37 – Пример волновой формы АЭ события

Из рисунка 2.37 очевидно, что определение реальной длительности сигнала t_d является нетривиальной задачей из-за низкого соотношения сигнал/шум. Также неочевидным является значение выставляемого для расчета t_d амплитудного порога.

Решение задачи определения t_d в этом случае заключается не в нахождении его точного значения (которое невозможно, из-за наложения полезного сигнала на шумовую компоненту, скрывающую «хвост» волновой формы АЭ импульса), а в формулировании объективного и однообразного подхода к его оценке для всех зарегистрированных АЭ событий.

Суть такого подхода сводится к следующему.

Для волновой формы АЭ сигнала строится спектрограмма с применением оконного преобразования Фурье в соответствии с

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)W(\tau - t)e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (2.8)$$

где τ – временной сдвиг (лаг), $W(t)$ – оконная функция. В качестве оконной функции была выбрана функция Хеннинга

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad (2.9)$$

где N – ширина окна (в данном случае $N = 64$).

Результат применения оконного преобразования представлен на рисунке 2.38.

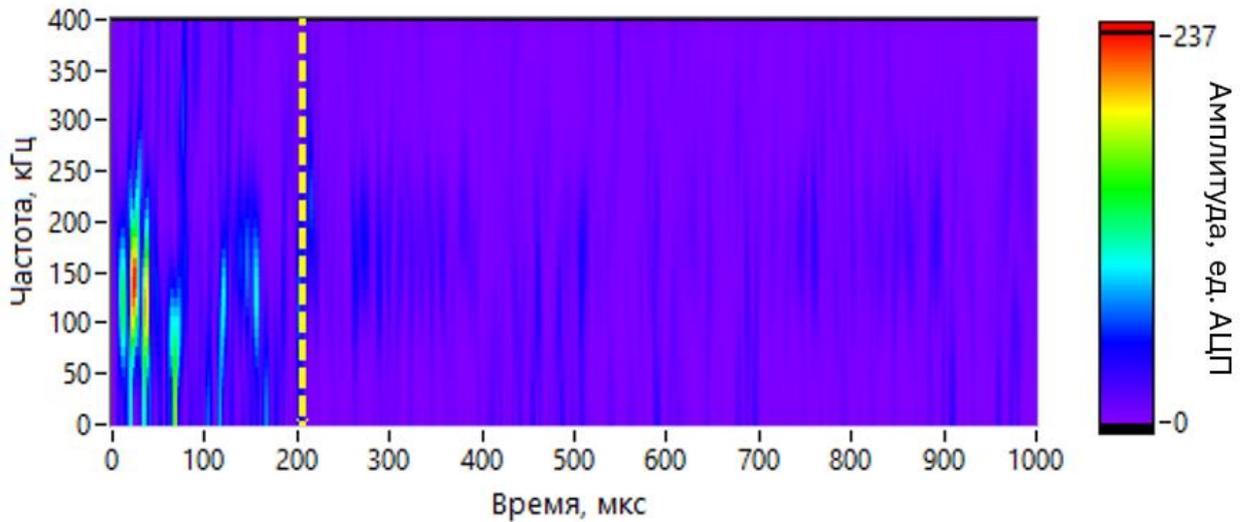


Рисунок 2.38 – Спектрограмма АЭ импульса, полученная с применением оконного преобразования Фурье

Из рисунка 2.38 видно, что основная энергия сигнала содержится в начальной части сигнала. Более точно изучить распределение амплитуд можно с помощью параметра S , представляющего собой суммированные значения амплитуд всех спектральных составляющих сигнала на i -ом временном отсчете

$$S_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}(f), \quad (2.10)$$

где n – количество спектральных составляющих спектрограммы, $A_i(f)$ – амплитудный спектр на i -ом временном отсчете.

На рисунке 2.39 представлен результат вычисления параметра S , а также его сглаживания скользящим средним с окном шириной 64 отсчета.

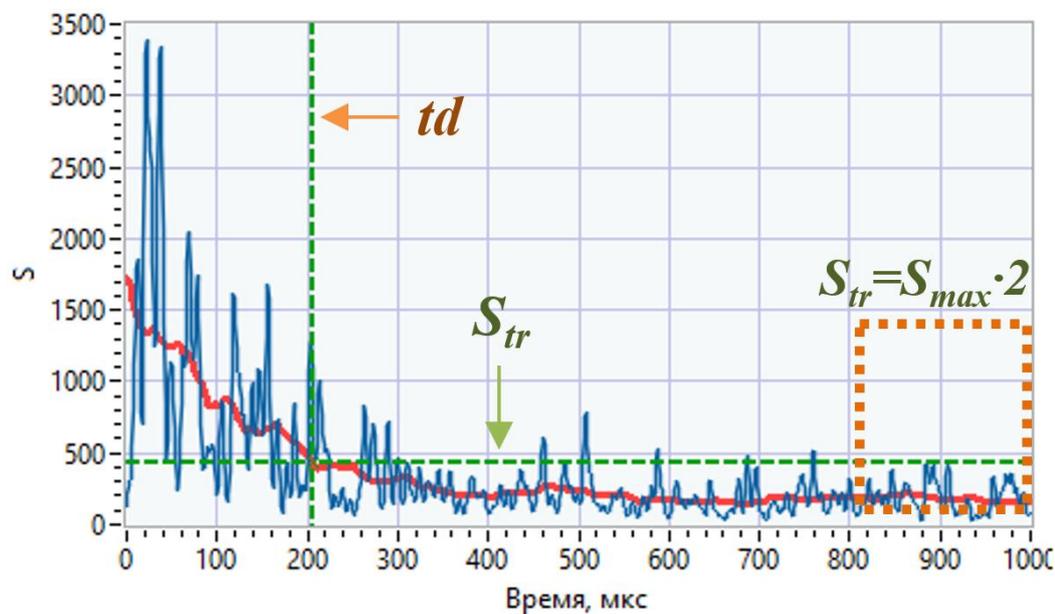


Рисунок 2.39 – Результат расчета параметра S (синяя кривая) и сглаженный вариант параметра S (красная кривая)

Из рисунка 2.39 видно, что параметр S снижается в диапазоне 0–400 мкс, после чего практически не изменяется до окончания волновой формы. Анализ большого количества АЭ импульсов, зарегистрированных в процессе нагружения композитов, показал, что длительность «полезной компоненты» практически никогда не превышает 500–600 мкс. Поэтому пороговое значение S_{tr} предлагается вычислять из следующего выражения

$$S_{tr} = S_{\max} \cdot 2, \quad (2.11)$$

где S_{\max} – максимальное значение параметра S , зарегистрированное в шумовой компоненте сигнала на отрезке 800–1000 мкс.

Пересечение сглаженного графика S с пороговым значением S_{tr} позволяет установить объективное положение td , которое может быть использовано для вычисления параметра AF (см. рисунок 2.39).

2.6.2 Ядерная оценка плотности распределения АЭ событий при AF-RA анализе

На рисунке 2.40 представлен пример распределения АЭ событий на координатной плоскости параметров AF-RA для образца серии «А», подвергаемого одноосным растягивающим нагрузкам вплоть до разрушения.

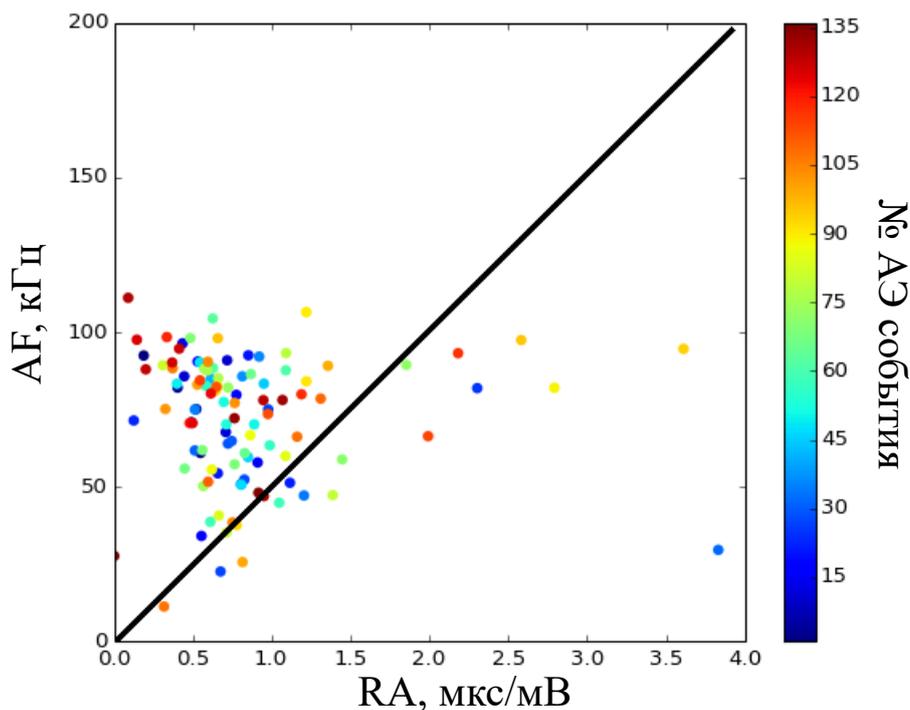


Рисунок 2.40 – Пример AF-RA анализа для образца композита серии «А»

Из рисунка 2.40 видно, что сигналы АЭ кластеризуются в области значений $AF \approx 150$ кГц и $RA \approx 0,7$ мкс/мВ. Более детальное изучение распределение АЭ событий на плоскости параметров AF-RA можно предпринять с использованием ядерной оценки плотности (*kernel density estimation*, KDE) [288,289]. Предложенный Э. Парзенном и М. Розенблаттом [290,291], KDE является алгоритмом, позволяющим производить непараметрическую оценку плотности распределения случайной величины. Причем в отличие от построения 2D гистограмм, алгоритм позволяет вычислять неразрывную функцию распределения случайной величины, не привязанную к субъективному выбору ширины интервалов гистограммы.

В общем случае ядерной оценкой плотности распределения $f(x)$, построенной по выборке значений $(X_1 \dots X_n)$, будет случайная функция

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (2.12)$$

где $K(x)$ – ядерная функция, h – параметр сглаживания, n – количество элементов в выборке.

В качестве ядерной функции использовалась функция Гаусса

$$K(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}. \quad (2.13)$$

Управление формой и положением функции (2.13) происходит за счет изменения параметров a , b и c , которые в общем случае связаны с среднеквадратическим отклонением σ и математическим ожиданием μ :

$$a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (2.14)$$

$$b = \mu, \quad (2.15)$$

$$c = \sigma. \quad (2.16)$$

Однако в данном случае среднеквадратическое отклонение функции Гаусса используется в качестве сглаживающего параметра ($\sigma = h$), а математическое ожидание привязано к конкретной координате точки из исходной выборки ($\mu = x$). Рисунок 2.41 иллюстрирует нахождение функции \hat{f} методом KDE для одномерного массива модельных данных и разных значениях сглаживающего параметра h .

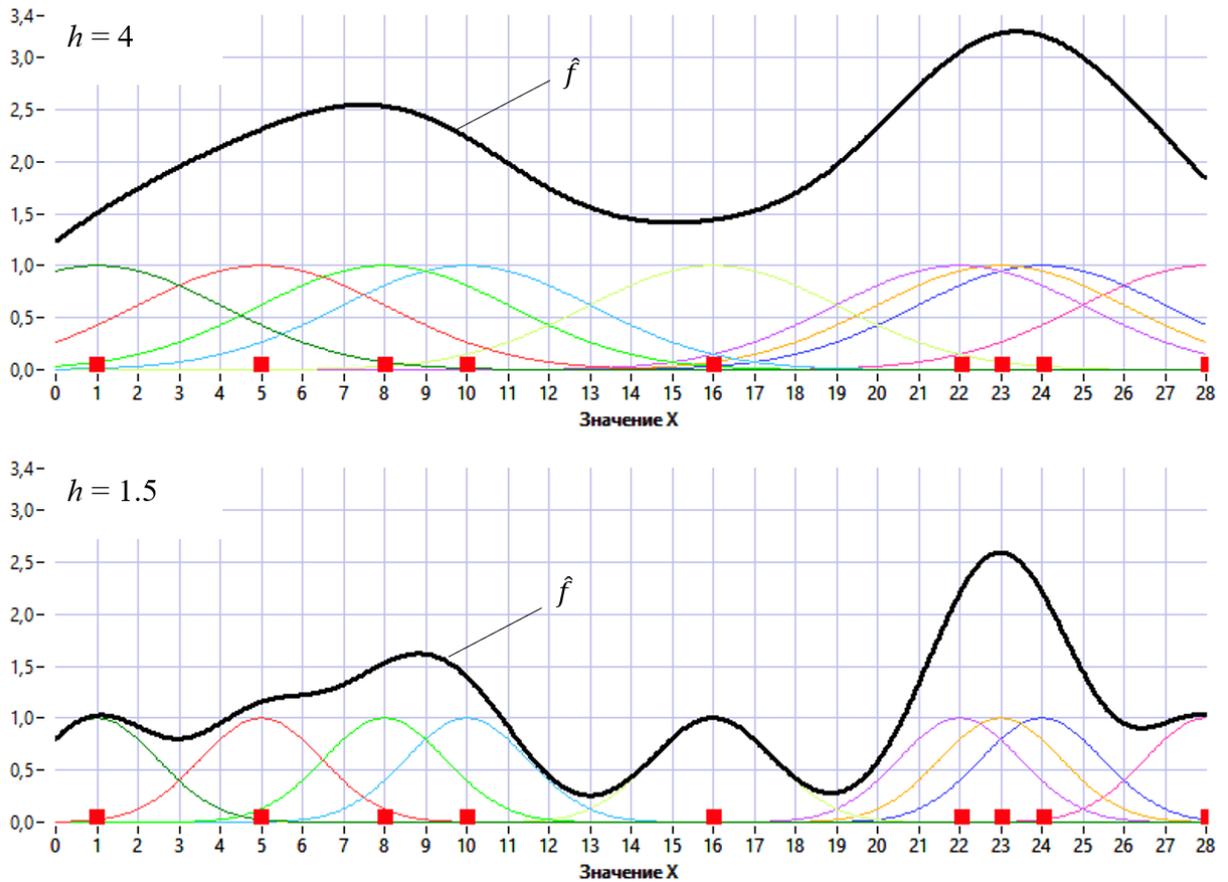


Рисунок 2.41 – Примеры построения функции \hat{f} при различных значениях h (красными квадратами отмечены координаты точек модельных данных)

Из рисунка 2.41 видно, что изменения параметра h приводит к существенному изменению формы функции \hat{f} . Выбор оптимального значения h для функции Гаусса, используемой в качестве ядра, возможен на основе выражения (2.17), которое обеспечивает минимизацию среднего накопленного квадрата ошибки предложенного в [292]

$$h = \left(\frac{4\sigma^5}{3n} \right)^{\frac{1}{5}} \approx 1,06\sigma n^{-\frac{1}{5}}. \quad (2.17)$$

Реализация алгоритма KDE в 2D постановке (на поле координат параметров AF-RA) приводит к формированию трехмерной поверхности, описывающей плотность распределения акустико-эмиссионных событий с точки зрения параметров AF и RA. Пример реализации указанного

алгоритма, совмещенный с ранее полученными результатами AF-RA анализа для образца серии «А» представлен на рисунке 2.42

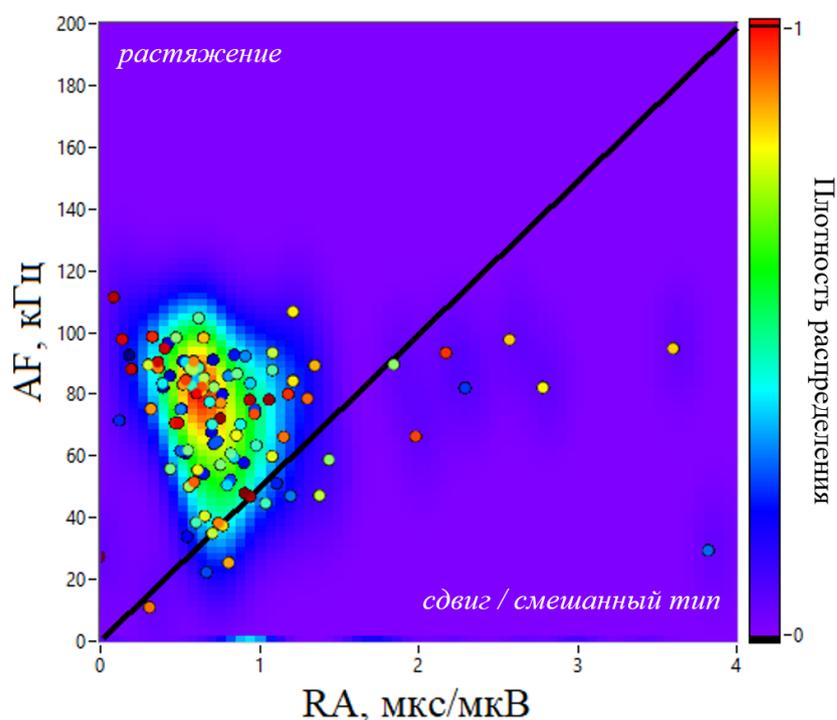


Рисунок 2.42 – Результаты совместного применения AF-RA и KDE анализа для образца композита серии «А» (режим одноосного растяжения)

Из рисунка 2.42 видно, что функция \hat{f} , полученная в результате применения KDE, адекватно описывает распределение точек, при этом эффективность алгоритма не зависит от количества точек и может быть обеспечена даже при малых размерах выборки. Более того, в этом случае оказывается возможным оценка формы такого распределения, которая может указать на склонность материала к формированию трещин растяжения или сдвига, а также оценить равномерность распределения таких механизмов. На рисунке 2.43 приведены проекции функции \hat{f} на оси RA и AF.

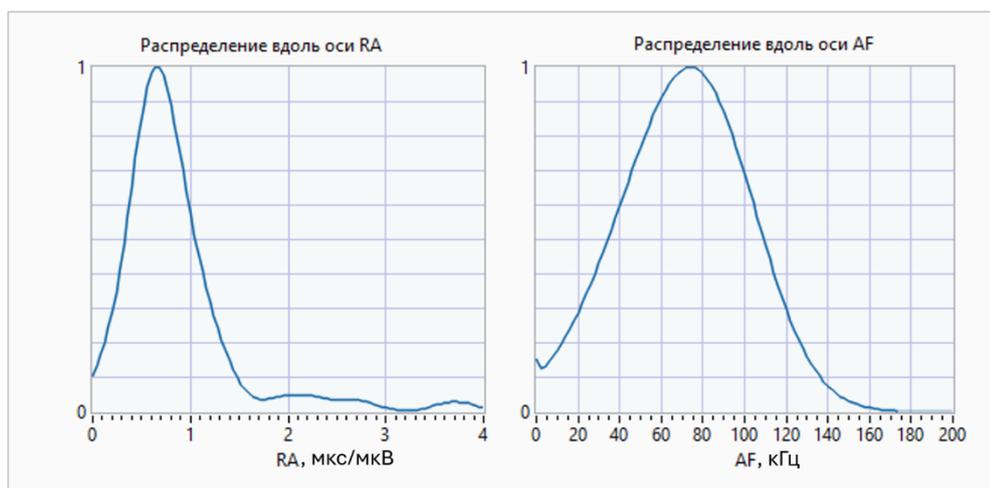


Рисунок 2.43 - Проекция функции \hat{f} на оси RA и AF для образца композита серии «А» (режим одноосного растяжения)

Из рисунка 2.43 видно, что проекция функции \hat{f} на ось RA 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

$$A_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (2.18)$$

где μ_3 – третий центральный момент случайной величины, σ – среднеквадратическое отклонение.

Низкие значения A_s означают, что в исследуемом материале доминирует один механизм дефектообразования, а увеличение A_s – об увеличении «разнообразия» механизмов дефектообразования. Таким образом, снижение A_s может свидетельствовать о более предсказуемых акустико-механических свойствах материала – качестве, важном для композиционных материалов, используемых в качестве чувствительных элементов систем контроля НДС.

2.6.3 Результаты применения AF-RA и KDE анализа для различных типов композитов и горных пород при различных режимах механического нагружения.

На рисунках 2.44–2.46 представлены результаты совместного применения AF-RA и KDE анализа для образцов композитов серий «В», «А» и «С», подвергаемых различным режимам нагружения, подробно рассмотренных в п. 2.3.3, п. 2.4 и п. 2.5.1

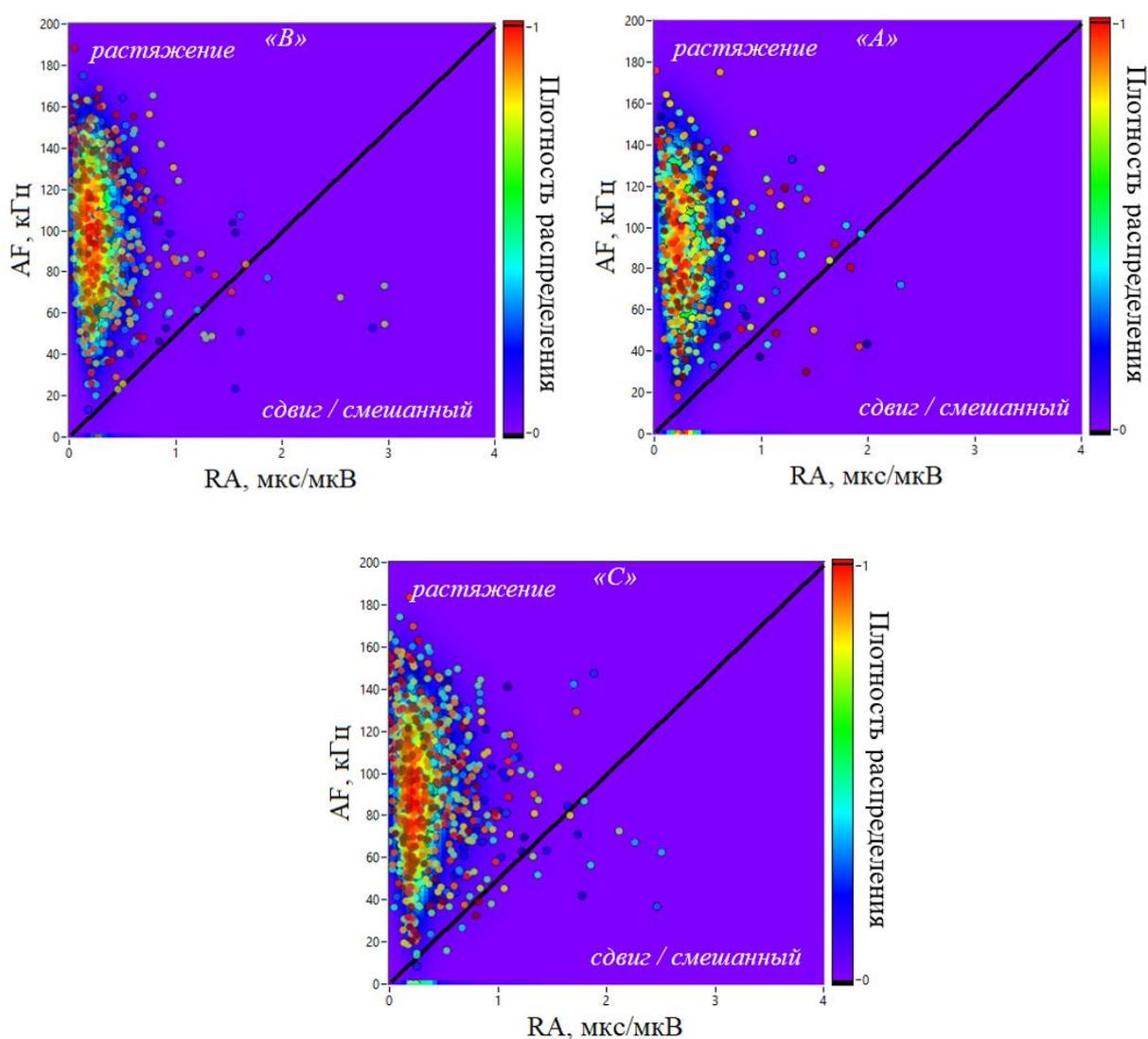


Рисунок 2.44 – Результаты применения AF-RA и KDE анализа для цилиндрических образцов композитов серий «В», «А» и «С», подвергаемых одноосному механическому нагружению

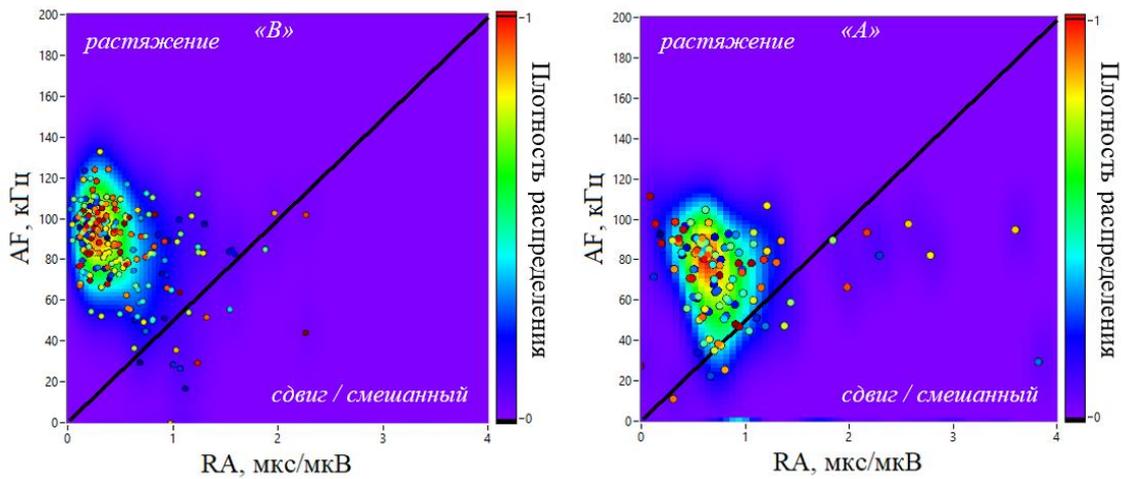


Рисунок 2.45 – Результаты применения AF-RA и KDE анализа для гантелеобразных образцов композитов серий «В», «А», подвергаемых одноосному механическому растяжению

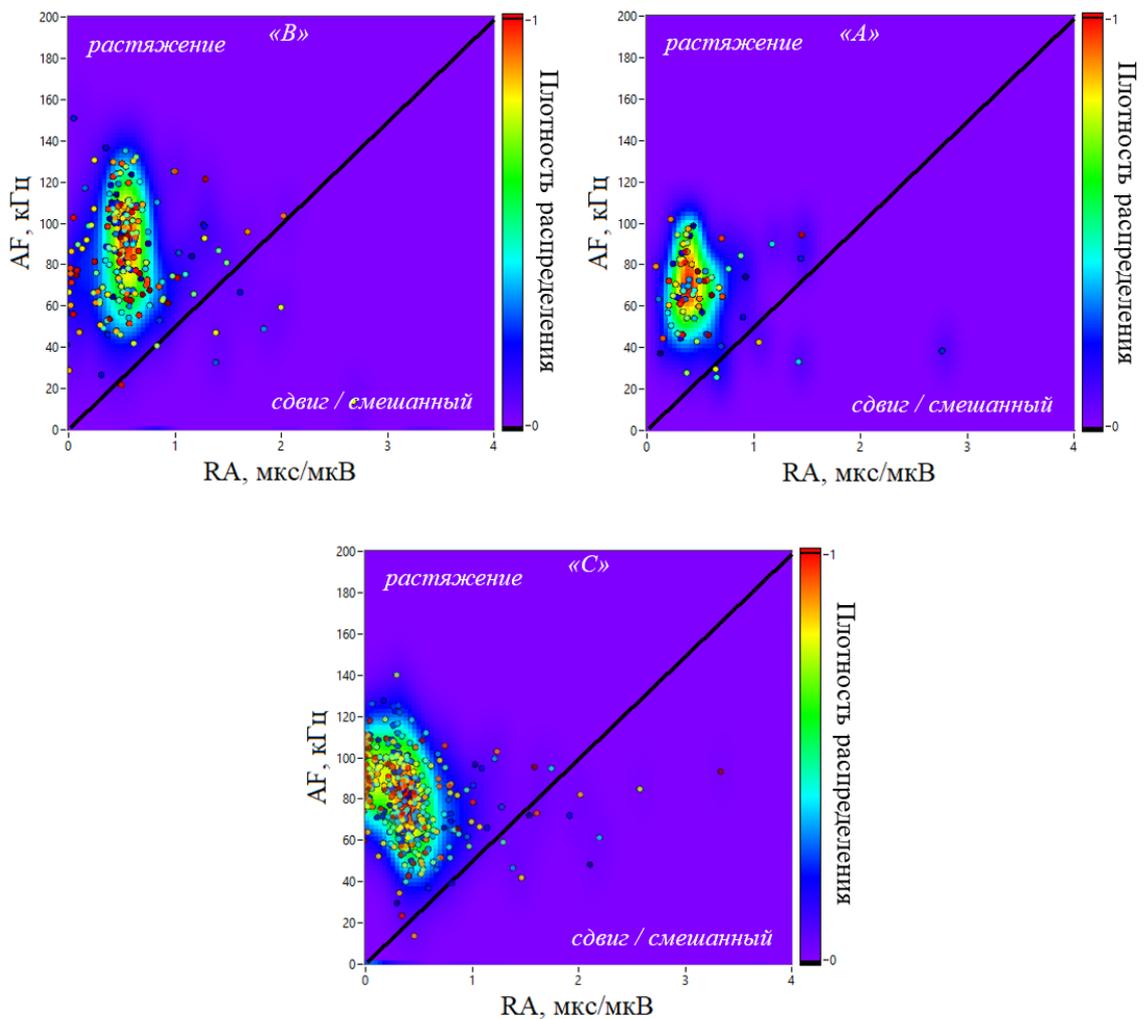


Рисунок 2.46 – Результаты применения AF-RA и KDE анализа для цилиндрических образцов композитов серий «В», «А» и «С», подвергаемых трехосному неравнокомпонентному механическому нагружению

В дополнение к исследованным композитам был также проведен комплексный AF-RA / KDE анализ сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе нагружения образцов угля пласта “Болдыревский” шахты им. С. М. Кирова и известняка Касимовского месторождения [293,294], результаты которого представлены на рисунке 2.47.

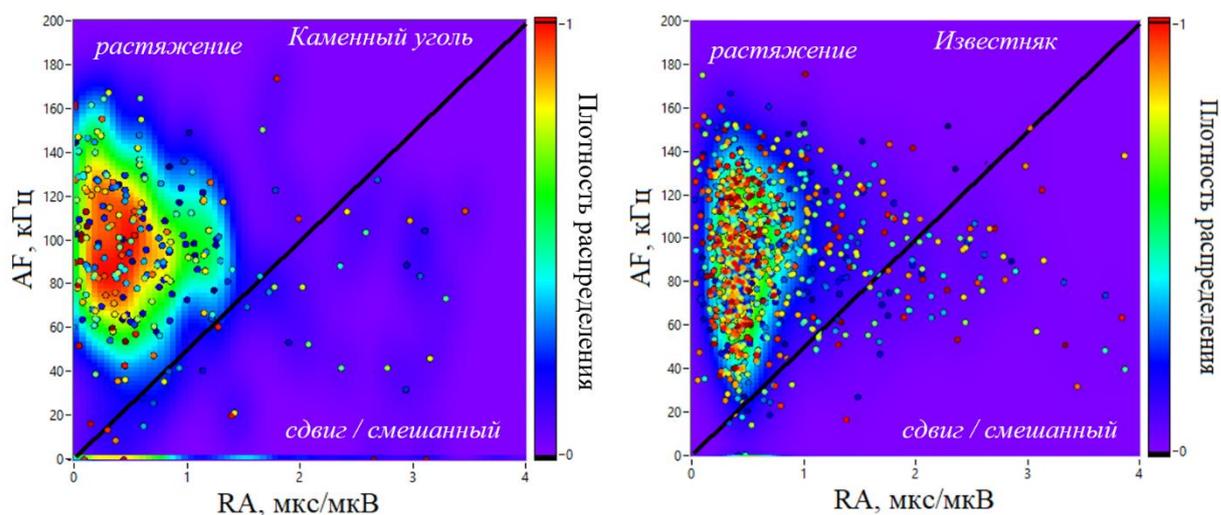


Рисунок 2.47 – Результаты применения AF-RA и KDE анализа для образцов угля пласта “Болдыревский” шахты им. С. М. Кирова и известняка Касимовского месторождения

Из рисунка 2.44 видно, что в режиме одноосного сжатия основным механизмом трещинообразования являются разрывные нарушения, сопровождаемые генерацией продольных волн с малым временем нарастания АЭ импульса. Наиболее вероятным источником таких колебания является образование разрывов на границе «армирующий компонент-матрица», поскольку сила адгезии как правило меньше, чем прочность матрицы или армирующего компонента [294].

В более сложных режимах нагружения (растяжение, трехосное неравнокомпонентное нагружение) наблюдается смещение максимума функции \hat{f} в сторону более высоких значений RA (см. рисунки 2.46 и 2.47). В этом случае начинают проявляться отдельные сдвиговые разрушения,

особенно характерные для композитов серий «В» и «С», армированных углеродными волокнами, имеющими значительную протяженность по сравнению с частицами алюминия в композитах «А». В этом случае может наблюдаться эффект «проскальзывания» на границе «матрица-армирующий компонент». Вместе с этим следует отметить, что несмотря на отдельные проявления сдвигового трещинообразования, основным механизмом дефектообразования в исследованных композитах все-таки является образование разрывных нарушений. Это становится очевидным при сравнении результатов испытания композитов и горных пород (рисунок 2.47). Акустико-эмиссионные события, зарегистрированные в процессе одноосного нагружения образцов каменного угля и известняка, характеризуются большим разбросом и смещением плотности распределения вдоль оси RA. На рисунке 2.48 представлены результаты расчета значений коэффициента асимметрии A_s функции \hat{f} для всех исследованных материалов.

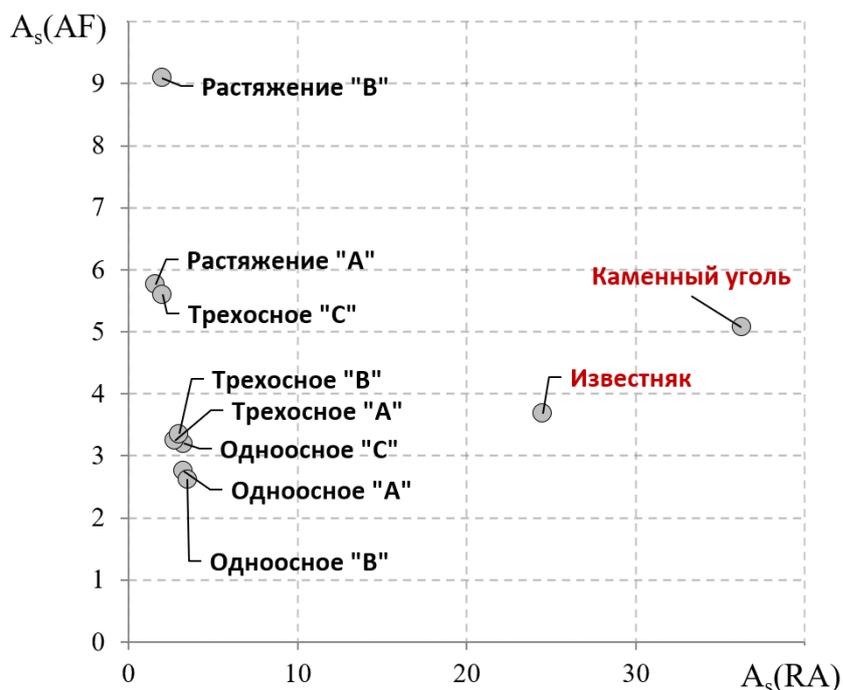


Рисунок 2.48 – Значения коэффициента асимметрии A_s , рассчитанные для проекций функций \hat{f} на оси RA и AF для всех исследованных типов материалов и горных пород

Из рисунка 2.48 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 причиной низких значений коэффициентов k , подробно описанных в п. 2.3.3.

2.7 Использование акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах для контроля параметров НДС приконтурного массива пород

Результаты проведенных экспериментальных исследований, подробно описанных в п. 2.1–2.6, в целом указывают на устойчивое формирование и проявление акустико-эмиссионного эффекта памяти в композиционных материалах на основе эпоксидной смолы при разнообразных режимах нагружения. Более детально итоги проведенных исследований представлены в сводной таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты акустико-эмиссионных исследований композиционных материалов

		Режим механического нагружения		
		Одноосное сжатие	Растяжение	Трехосное неравнокомпонентное нагружение
Тип композиционного материала	Серийно выпускаемые слоистые композиты (стеклотекстолит, текстолит, гетинакс)	<ul style="list-style-type: none"> установленное влияние угла γ между приложением нагрузки и направлением слоев на параметры проявления АЭ отчетливое проявление АЭЭП при $\gamma = 45^\circ$ 	-	-
	Композиты, армированные дисперсно распределенными углеродными волокнами (серия «В»)	<ul style="list-style-type: none"> отчетливое проявление АЭЭП в режиме одноосного сжатия проявление АЭЭП в спектрально области в виде резкого изменения спектрального состава АЭ сигналов 	<ul style="list-style-type: none"> отчетливое проявление АЭЭП в режиме растяжения проявление эффекта памяти на ветви разгрузки в виде резкого изменения спектрального состава АЭ импульсов 	<ul style="list-style-type: none"> устойчивое формирование «памяти» об уровне ранее испытанного девиатора напряжений D значение коэффициента $k = 0.03$ (коэффициентом k можно пренебречь при $D > 3$ МПа)
	Композиты, армированные алюминиевой пудрой (серия «А»)	<ul style="list-style-type: none"> отчетливое проявление АЭЭП в режиме одноосного сжатия 	<ul style="list-style-type: none"> слабое проявление АЭЭП в режиме растяжения формирование горизонтальных магистральных трещин с возможностью их локации с погрешностью до 3% 	<ul style="list-style-type: none"> устойчивое формирование «памяти» об уровне ранее испытанного девиатора напряжений D значение коэффициента $k = 0.06$ (коэффициентом k можно пренебречь при $D > 6$ МПа)
	Композиты, армированные слоями углеткани (серия «С»)	<ul style="list-style-type: none"> отчетливое проявление АЭЭП в режиме одноосного сжатия 	-	<ul style="list-style-type: none"> устойчивое формирование «памяти» об уровне ранее испытанного девиатора напряжений D значение коэффициента $k = 0.1$ (коэффициентом k можно пренебречь при $D > 10$ МПа)

Описанные выше результаты лабораторных экспериментов позволяют использовать все разнообразие исследованных композиционных материалов в качестве чувствительных элементов систем измерений различных параметров НДС приконтурного массива, таких как наблюдение за положением зоны максимума опорного давления, направлением действия максимального главного напряжения, определение величин приращений напряжений вдоль заданного направления, оценка величин девиатора напряжений и др.

Для реализации указанных подходов необходима разработка соответствующего аппаратурно-методического обеспечения и обоснования оптимальных схем проведения измерений.

2.7.1 Способы контроля параметров НДС с использованием чувствительных элементов, изготовленных из анизотропных композитов

2.7.1.1 Способ определения ориентации вектора максимального главного напряжения в окрестностях горных выработок

Установленные закономерности возможно использовать при контроле НДС в конструктивных элементах систем разработки, в первую очередь при оценке направления действия максимального напряжения в ленточных целиках [295]. Суть способа контроля заключается в следующем. В измерительном шпуре (или нескольких параллельных шпурах), пробуренном в целике в направлении перпендикулярном оси горной выработки, жестко закрепляются диски, изготовленные из стеклотекстолита. 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. Каждый из дисков снабжается акустическим пьезопреобразователем, закрепленным либо непосредственно на диске, либо связанным с ним посредством металлического волновода. С помощью коммутирующего устройства преобразователи подключаются к портативному устройству регистрации АЭ, размещенному в районе устья шпура. Схема реализации метода представлена на рисунке 2.49а.

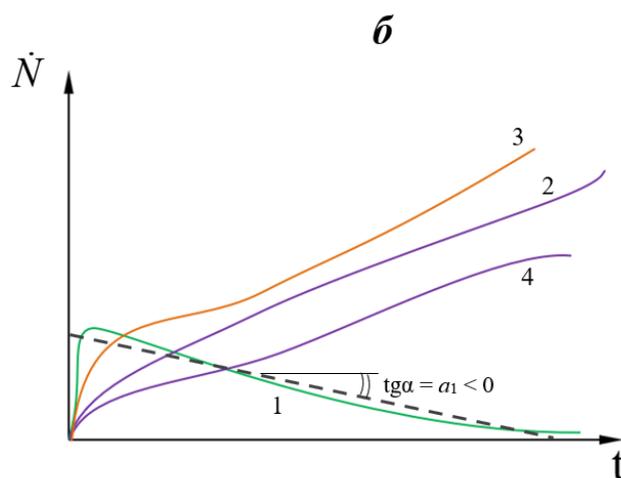
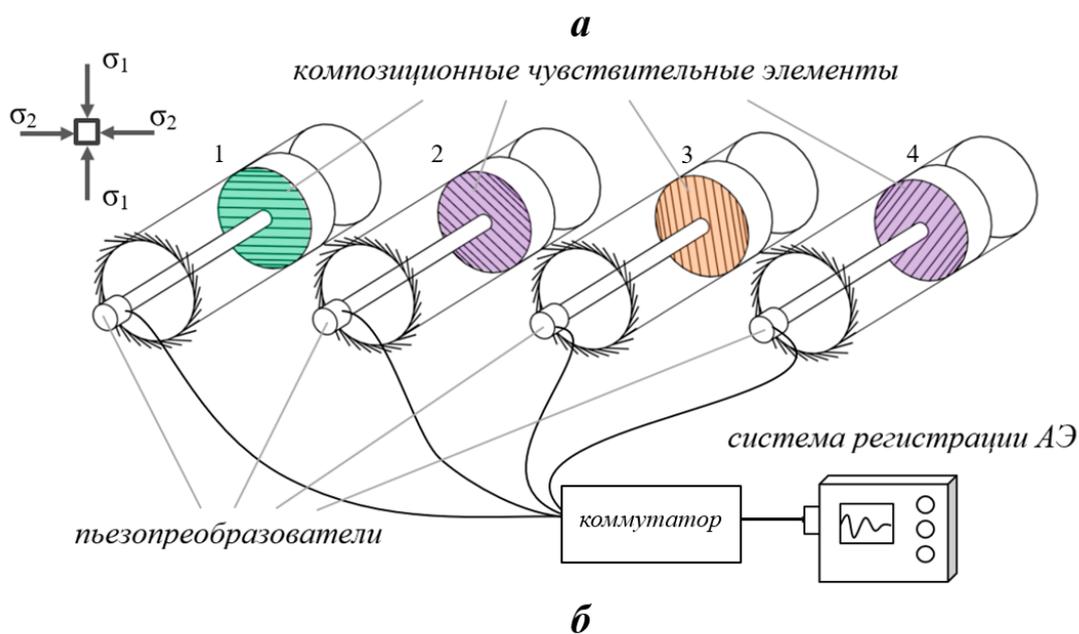


Рисунок 2.49 – Схема реализации контроля направления максимального напряжения (*а*) и получаемые в результате измерения зависимости $\dot{N}(t)$ (*б*)

Под действием напряжений в массиве размещенные в шпуре диски начинают деформироваться, что приводит к росту активности и скорости счета акустической эмиссии, регистрируемой акустико-эмиссионным измерительным комплексом. При этом характер эмиссии будет изменяться в зависимости от расположения диска. Примеры регистрируемых зависимостей $N(t)$, представлены на рисунке 2.49б. Из всех дисков выбирают тот, которому соответствует скорость счета АЭ, характеризующаяся максимальным отрицательным коэффициентом аппроксимации a_1 , и по углу между наклоном слоев в этом диске и горизонталью судят о направлении действия максимального напряжения в целике.

Описанный способ не связан с использованием АЭЭП в композите, поэтому не привязан к качеству сохранности АЭ «памяти» и может быть реализован в формате мониторинга, неограниченного по времени [296].

2.7.1.2 Способ мониторинга смещения зоны опорного давления

Одним из важнейших параметров НДС приконтурного массива является положение максимума опорного давления $\sigma_{o.d.}$. Для устойчивых выработок расстояние от контура выработки до зоны $\sigma_{o.d.}$ является неизменной величиной на всем сроке эксплуатации. Однако в результате проявления процессов физического или химического выветривания или перераспределения напряжений в массиве, связанных с ведением горных работ, указанное расстояние может увеличиваться. Особенно критичным смещение зоны опорного давления может быть в ленточных и столбчатых целиках, в которых указанное смещение может нести встречный характер, а в случае совмещения зон $\sigma_{o.d.}$ в центре целика может произойти его разрушение [133]. Для осуществления мониторинга за положением зоны $\sigma_{o.d.}$ предлагается способ, основанный на использовании акустико-эмиссионных эффектов в композиционных чувствительных элементах, размещаемых в измерительной скважине [245,297].

Суть способа заключается в следующем. В стенках выполненного в виде трубы длиной l_b металлического волновода измеряют скорость V_p распространения ультразвуковых колебаний. Затем, на волноводе на некотором расстоянии друг от друга закрепляют текстолитовые кольца, общее число которых может составлять несколько десятков и зависит от максимальной глубины, на которую необходимо осуществлять контроль смещения зоны опорного давления. Причем, между текстолитовыми кольцами и волноводом обеспечивают надежный акустический контакт за счет клеевого соединения. На противоположных торцевых поверхностях волновода закрепляют с использованием с использованием клеевого соединения, обеспечивающего надежный контакт, акустические

преобразователи. Преобразователи подключаются к акустико-эмиссионному измерительному комплексу. Подготовленный таким образом волновод размещается в измерительной скважине таким образом, чтобы одна из торцевых поверхностей волновода совпадала с устьем скважины. Схема размещения волновода показана на рисунке 2.50а.

Под действием напряжений в окрестностях выработки измерительная скважина деформируется, причем максимально в зоне опорного давления. Одновременно с деформациями стенки скважины максимальные деформации будет испытывать текстолитовое кольцо 3, расположенное в этой зоне. В результате в этом текстолитовом кольце будут возникать сигналы акустической эмиссии максимальной амплитуды, как это показано на рисунке 2.50б. Величина деформаций и, как следствие, амплитуда АЭ импульсов в остальных кольцах будет ниже.

По мере увеличения нарушенности пород приконтурного массива под влиянием природных и техногенных факторов (например выветривания) зона опорного давления будет смещаться вглубь массива. При этом в некоторый момент времени $t_2 > t_1$, зона опорного давления достигнет глубины l_2 , на которой размещается текстолитовое кольцо 4. Поскольку текстолитовое кольцо 4 станет испытывать максимальные относительно колец 3 и 5 деформации со стороны скважины, то именно в нем возникнут сигналы акустической эмиссии с амплитудой максимальной амплитуды. Последующее смещение зоны опорного давления будет приводит к последовательному «срабатыванию» оставшихся колец.

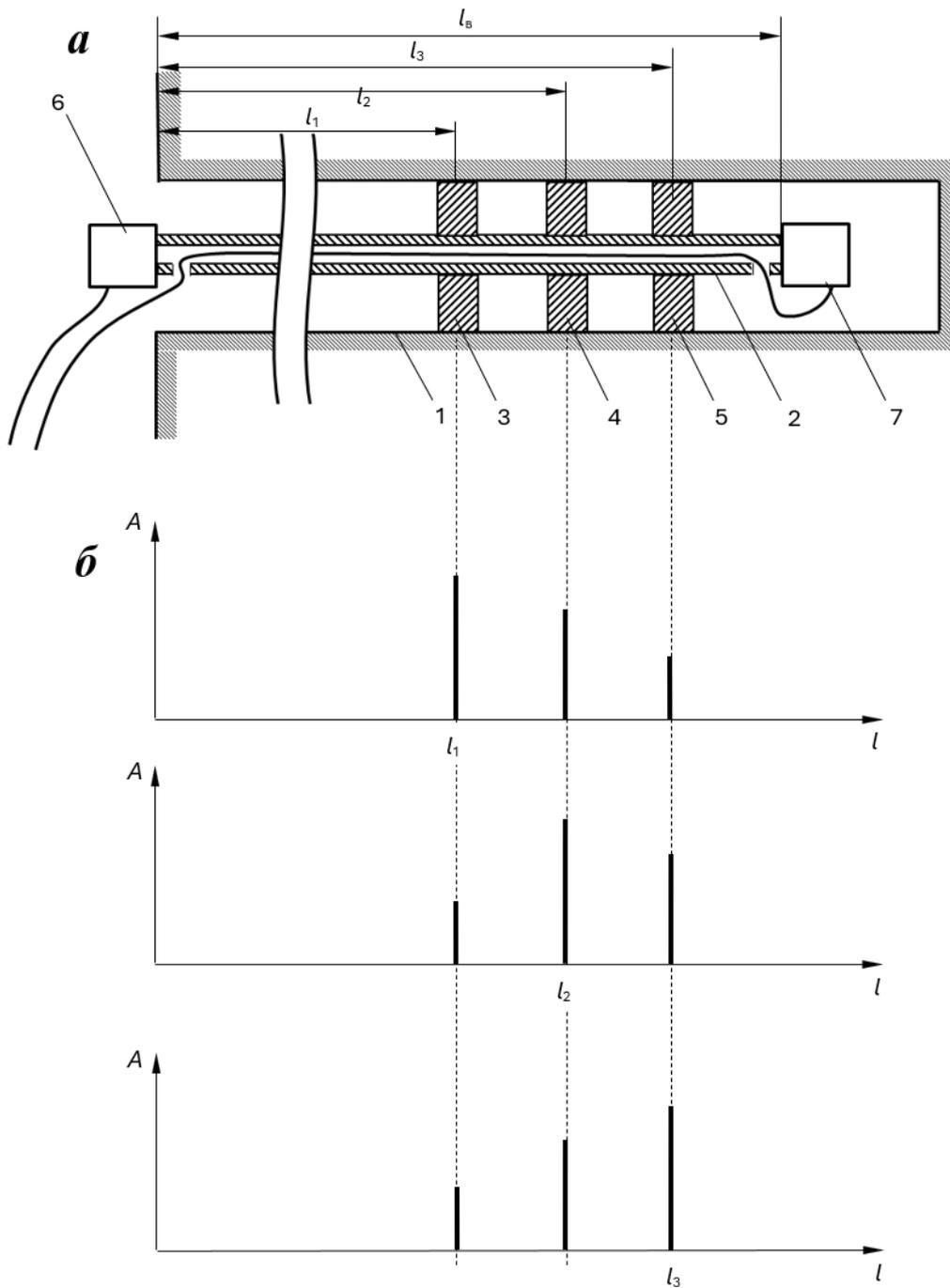


Рисунок 2.50 – Схема размещения волновода в скважине (а) и регистрируемые зависимости $A(l)$: 1 – скважина; 2 – волновод; 3-5 – текстолитовые кольца; 6,7 – акустические преобразователи

Сигналы акустической эмиссии, возникающие в текстолитовых кольцах, поступают на акустические преобразователи, далее – на отдельные входы акустико-эмиссионного измерительного комплекса, порог срабатывания которого настроен на максимальные амплитуды указанных

сигналов. Таким образом, акустико-эмиссионный измерительный комплекс принимает сигналы акустической эмиссии только того из текстолитовых колец, который в данный момент времени находится ближе всего к зоне опорного давления, генерируя, соответственно, сигнал с максимальной амплитудой. Далее измеряют разность Δt времен прихода указанного сигнала на акустические преобразователи, а расстояние L от контура выработки до местоположения зоны опорного давления определяют по формуле

$$L = \frac{l_T - \Delta t \cdot v_P}{2}. \quad (2.19)$$

При этом, если при длительных мониторинговых измерениях величина L остается постоянной, то это свидетельствует о неизменности напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестностях горной выработки. Если же величина L со временем возрастает, то это свидетельствует о смещении зоны опорного давления вглубь массива, т.е. изменении его напряженно-деформированного состояния.

2.7.1.3 Способ определения приращений напряжений вдоль заданного направления с дискретной сигнализацией

Обеспечение безопасности ведения горных работ и эксплуатации подземных сооружений неразрывно связано с необходимостью инструментального контроля параметров НДС массива в приконтурной зоне. При этом большое внимание должно уделяться массовости проводимых измерений и равномерности распределения точек контроля вдоль выработки. В этом случае использование трудоемких методов разгрузки, позволяющих определять полный тензор напряжений, оказывается затруднительным. С другой стороны, потеря устойчивости выработки связана, как правило, с превышением величины максимального главного напряжения некоторого критического уровня, превышающего предел прочности пород в конструктивном элементе системы разработки полезных ископаемых. В этом случае для обеспечения безопасности достаточно в мониторинговом режиме

наблюдать за ростом напряжений вдоль заданного направления и производить пороговую сигнализацию. Указанный подход может быть реализован на основе проявления АЭЭП в композиционных материалах.

Предлагаемый способ [298–300] базируется на использовании АЭЭП в композитных материалах, который заключается в скачкообразном увеличении крутизны суммарного счета импульсов акустической эмиссии деформируемого образца в момент, когда его нагружение достигает максимального уровня нагрузки предшествующего цикла деформирования. В частности, проведенные ранее экспериментальные исследования показали [214], что наблюдается устойчивый акустико-эмиссионный эффект памяти в текстолите в диапазоне давлений 10 – 100 МПа. При этом «память» об испытанных текстолитом давлениях сохраняется не менее двух недель. Следует отметить, что выбор текстолита в качестве «носителя памяти» обуславливается с одной стороны его высокой прочностью, что позволяет использовать данный материал для определения широкого диапазона напряжений в массиве, а с другой – простотой механической обработки, необходимой для изготовления соответствующих колец.

Способ определения изменения напряженного состояния горного массива осуществляют следующим образом: на металлическом волноводе на некотором расстоянии друг от друга закрепляют текстолитовые кольца. Причем между текстолитовыми кольцами и волноводом обеспечивают надежный акустический контакт за счет использования, например, клеевого соединения. Поочередно нагружают указанные кольца вдоль направления диаметральных отметок до заданных уровней установочных напряжений $\sigma_1^* < \sigma_2^* < \sigma_3^*$ соответственно. Затем закрепляют на торцевой поверхности волновода преобразователь акустической эмиссии. Далее размещают волновода в измерительной скважине таким образом, чтобы направление диаметральных отметок на текстолитовых кольцах совпадало с направлением, приращения напряжений вдоль которого предполагается

контролировать. Схема размещения волновода в скважине показана на рисунке 2.51а.

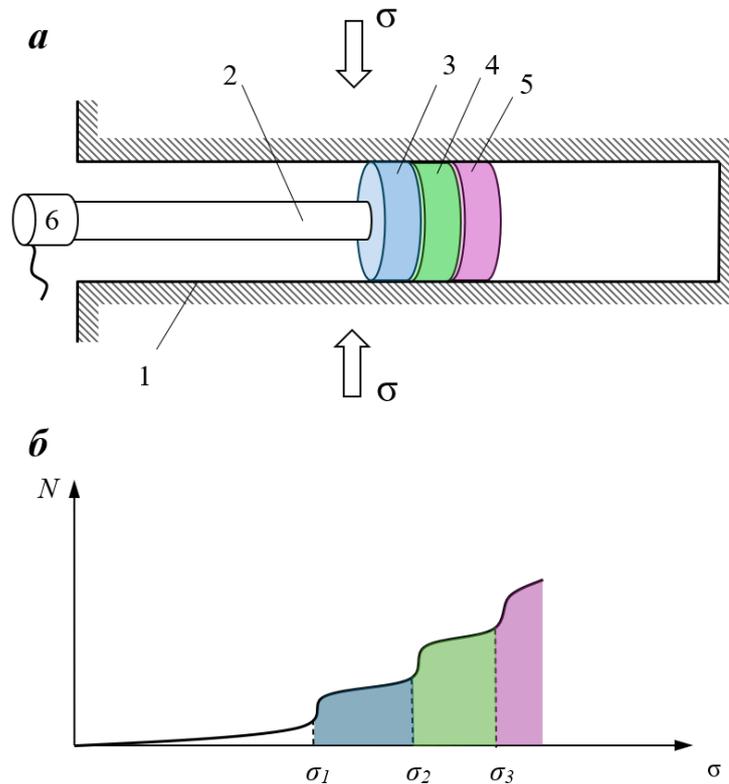


Рисунок 2.51 – Схема размещения чувствительных элементов в скважине (а) и пример получаемой зависимости $N(\sigma)$ (б): 1 – скважина; 2 – волновод; 3-5 – текстолитовые кольца; 6 – акустический преобразователь

Под действующим в массиве полем напряжений контур измерительной скважины начинает деформироваться, при этом нагрузка передается на текстолитовые кольца. При достижении в кольце уровня нагрузки σ_1 равного σ_1^* , в нем наблюдается резкое возрастание крутизны графика суммарного счета N акустической эмиссии, по которому судят о достижении в массиве уровня напряжений σ_1 . Таким же образом последовательно срабатывают кольца 4 и 5 при достижении оказываемым массивом на соответствующие текстолитовые кольца давлением значений σ_2^* и σ_3^* соответственно. При этом по заранее заданным установочным давлениям σ_1^* , σ_2^* , и σ_3^* , получают количественную оценку значений приращений напряжений вдоль контролируемого направления.

2.7.2 Аппаратурное обеспечение методов контроля НДС массива пород с применением композиционных чувствительных элементов

Способы, описанные в п. 2.7.1.1–2.7.1.3, объединяют общие требования к аппаратурному обеспечению их реализации. Основными элементами такого обеспечения являются устройства, обеспечивающие неразрывность деформаций в системе «порода-композиционный чувствительный элемент», а также портативное автономное устройство регистрации и первичного анализа импульсов АЭ.

2.7.2.1 Система фиксации композиционного чувствительного элемента

Для размещения композиционного чувствительного элемента в скважине и обеспечения неразрывности его деформаций со стенками скважины используется специально разработанная одноразовая система клеевой фиксации. Схема и принцип работы системы иллюстрируются рисунком 2.52. Устройство предназначено для использования в скважинах диаметром 42 мм.

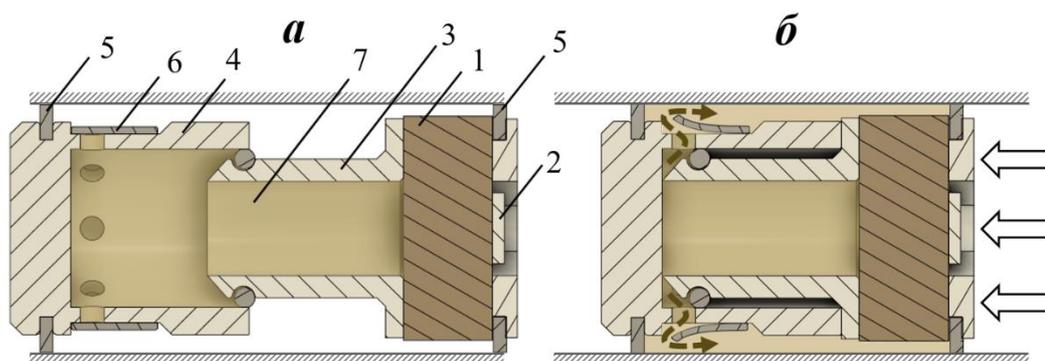


Рисунок 2.52 – Система клеевой фиксации в положении «подготовка» (а) и в положении «фиксация» (б): 1 – композитный цилиндр, 2 – пьезокерамический элемент, 3 – плунжер, 4 – стакан, 5 – уплотнительные кольца, 6 – резиновая манжета, 7 – эпоксидный клей

Принцип действия системы заключается в следующем. Подготовленный к проведению измерений композиционный цилиндр снабжается пьезоэлектрическим элементом и фронтальной накладкой с резиновым уплотнительным кольцом. В поршневую часть, состоящую из стакана и плунжера заливают эпоксидную смолу, смешанную с отвердителем, после чего с помощью быстротвердеющего клея поршневая группа герметизируется композиционным датчиком. Таким образом клеевая система приводится в состояние «подготовка» и готова к размещению в измерительной скважине.

После размещения устройства в скважине на него оказывается дополнительное давление с помощью досылочных штанг, за счет чего эпоксидная смола выдавливается плунжером через отверстия стакана и полностью заполняет пространство между стенками скважины, уплотнительными кольцами и композиционным чувствительным элементом. Внешний вид системы клеевой фиксации представлен на рисунке 2.53.



Рисунок 2.53 – Система клеевой фиксации, подготовленная к размещению в скважине

Представленная система клеевой фиксации обеспечивает жесткий контакт композита со стенкой скважины по всей образующей цилиндрического чувствительного элемента, что позволяет использовать весь потенциал анизотропных композитов для контроля не только величин, но и направлений действий напряжений в приконтурной области массива. Система

отличается чрезвычайно низкой себестоимостью изготовления из-за широкого применения 3D печати ее основных компонентов. При этом, однако, она все еще является одноразовой. Ее использование для контроля приращений напряжений без учета их направления представляется избыточным, т.к. в этом случае достаточно обеспечить только частичный контакт композиционного чувствительного элемента со стенкой скважины. Для этого может быть использована многоразовая распорная система, представленная на рисунке 2.54.

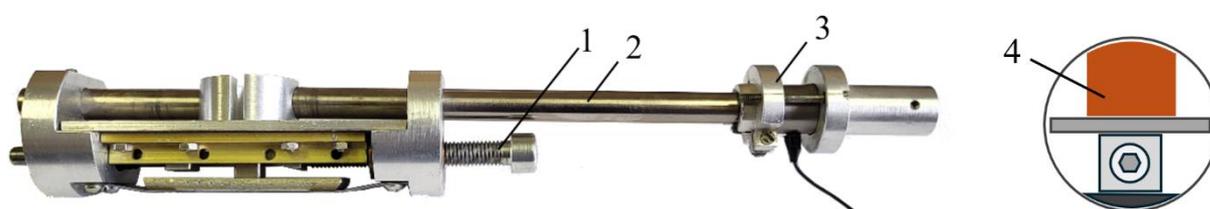


Рисунок 2.54 – Многоразовая система бесклеевой распорной фиксации композиционного чувствительного элемента: 1 – распорный винт; 2 – акустический волновод; 3 – акустический преобразователь; 4 – композиционный чувствительный элемент

Распорная система предназначена для размещения композиционных датчиков напряжений в скважинах диаметром 42 мм. Распор осуществляется вращением распорного винта с помощью специальной сборной штанги (на рисунке 2.54 не показана). Узел крепления АЭ преобразователя также является узлом крепления сборных досылочных штанг, предназначенных для размещения устройства на заданной глубине.

2.7.2.2 Электронный блок регистрации АЭ

Блок регистрации предназначен для регистрации скорости счета акустической эмиссии. Блок представляет собой портативный прибор с автономным питанием от двух батареек типа АА. Внешний вид и устройство блока представлены на рисунке 2.55.

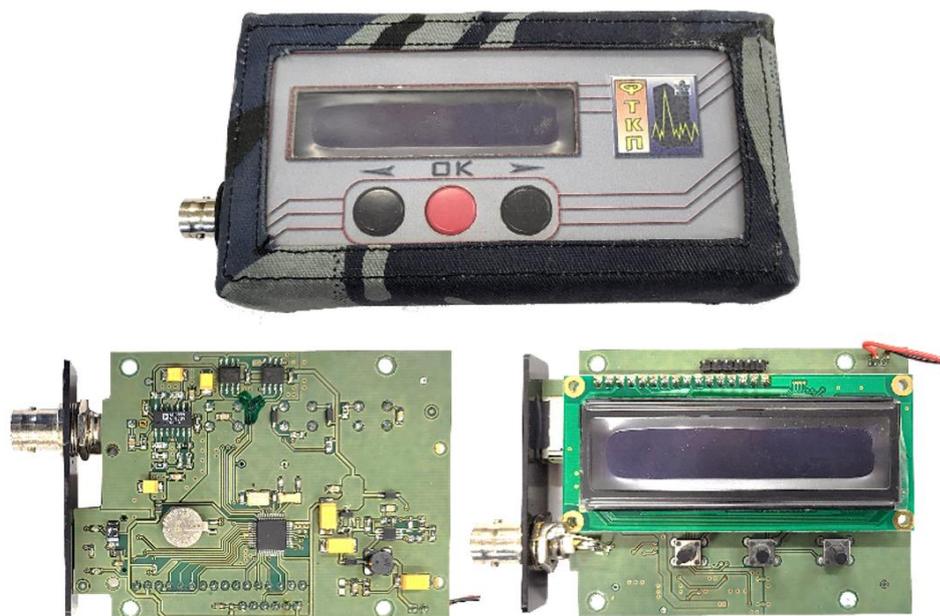


Рисунок 2.55 – Внешний вид и внутреннее устройство электронного блока регистрации АЭ

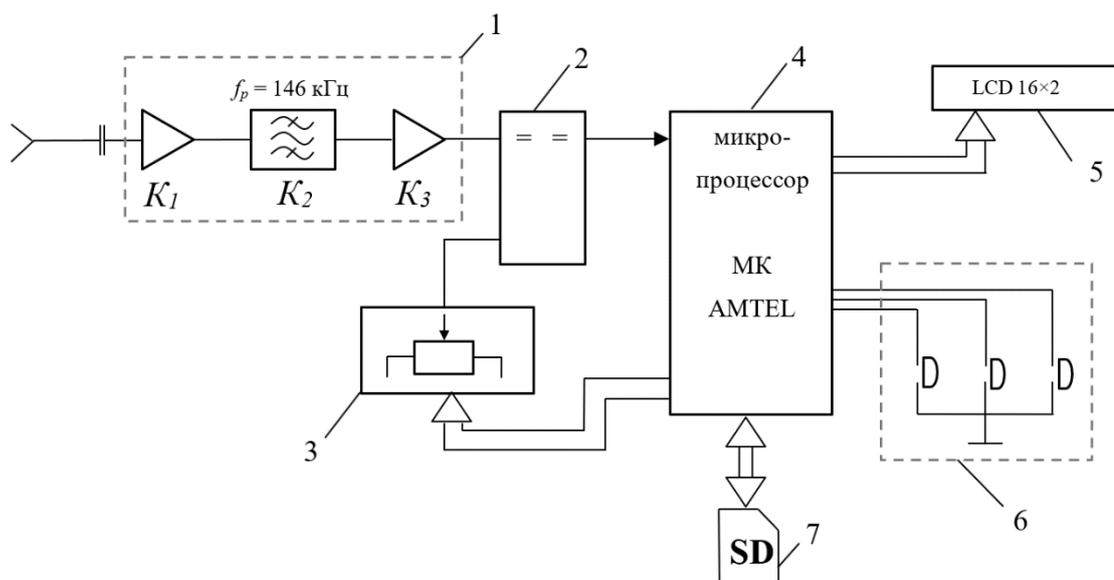


Рисунок 2.56 - Блок-схема электронного блока регистрации АЭ: 1 – узел предусиления и полосовой фильтрации, 2 – аналоговый компаратор, 3 – электронный потенциометр, 4 – микропроцессор, 5 – LCD дисплей, 6 – трехкнопочная клавиатура, 7 – внешняя флэш-память

На боковой поверхности блока расположен высокочастотный разъем BNC для подключения пьезоэлектрических преобразователей сигналов АЭ, а также разъем для SD карты памяти, предназначенной для сохранения и

последующего экспорта результатов контроля. На фронтальной поверхности блока расположен LCD дисплей и три кнопки управления и навигации: «◀», «ОК» и «▶». С помощью указанных кнопок происходит навигация по меню прибора и настройка параметров его работы. Блок-схема меню представлена на рисунке 2.57. Кнопка «ОК» также предназначена для включения и выключения прибора при ее длительном нажатии.



Рисунок 2.57 - Блок-схема меню электронного блока регистрации АЭ

Настраиваемыми параметрами являются «период опроса», «порог событий», «амплитуда событий», имя файла для сохранения, а также дата и время проведения измерений. Параметр «период опроса» определяет время в секундах, за которое происходит подсчет количества превышений порогового уровня амплитуды. Параметр «порог событий» устанавливает предельное значение скорости счета АЭ, превышение которого переводит электронный блок в режим «Порог превышен!» с мигающим LCD дисплеем. Как правило, это свидетельствует о проявлении акустико-эмиссионного эффекта памяти в попозиционном чувствительном элементе. Параметр «амплитуда событий»

позволяет настраивать пороговое значение амплитуды в у.е., превышение которого учитывается при расчете скорости счета АЭ.

Сохранение значений скорости счета АЭ осуществляется в соответствующие файлы на SD-карте памяти в формате «.txt» в виде столбца данных.

2.7.3 Контроль изменения девиатора напряжений вблизи горных выработок с использованием чувствительных элементов, изготовленных из дисперсно-наполненных композитов

2.7.3.1 Способ контроля изменения девиатора напряжений

Закономерности формирования и проявления акустико-эмиссионных эффектов в композитах, подвергаемых всестороннему неравнокомпонентному сжатию, полученные в результате экспериментальных исследований (п. 2.2.3), позволяют на их основе сформулировать способы контроля девиаторов напряжений в приконтурной области массива.

Предлагаемые способы являются модернизацией и расширением возможностей способов, ранее предложенных в [245,300]. При использовании композитов в качестве чувствительных элементов систем контроля существуют два основных подхода. Первый заключается в использовании композиционных образцов в качестве первичных датчиков-сигнализаторов о превышении в массиве заранее заданного критического уровня напряжений. Для этого композитный чувствительный элемент на предварительном этапе в лабораторных условиях подвергают установочному нагружению, формируя в нем акустико-эмиссионную «память». Далее такой датчик размещают в массиве и при достижении в массиве напряжений, равных установочным в нем проявляются АЭЭП, который может быть зарегистрирован соответствующей аппаратурой. Таким образом измерения

производятся в мониторинговом режиме с непрерывной регистрацией АЭ до «срабатывания» датчика.

Второй подход заключается в использовании композита в качестве оптимальной среды для формирования «памяти» о приращениях напряжений в самом массиве. Для этого композит без предварительной подготовки размещают в контролируемой области массива, а затем извлекают после завершения деформационных процессов. В этом случае установочный цикл происходит в измерительной скважине, а проявление АЭЭП наблюдается при повторном нагружении образца в лабораторных условиях, когда уровень и направление механических напряжений совпадают с испытанными ранее в породном массиве.

В случае реализации первого подхода для контроля превышения критических значений девиатора напряжений предлагается следующий способ. Из композиционного материала изготавливается цилиндрический образец, 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 и будут подробнее обсуждены в п. 2.7.2.2. 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 в стадии полимеризации. Электрические выводы с преобразователя подключают к входу электронного блока регистрации АЭ. Схема размещения композиционного чувствительного элемента в скважине представлена на рисунке 2.58.

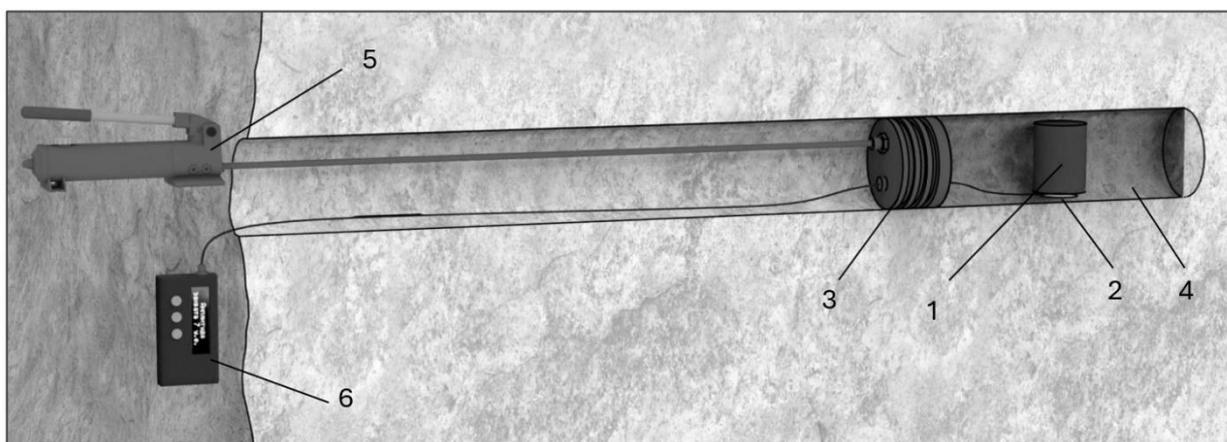


Рисунок 2.58 – Схема реализации метода контроля критических значений D :
 1 – композитный цилиндр; 2 – преобразователь; 3 – пакер; 4 – эпоксидная смола; 5 – компрессор для нагнетания смолы; 6 – электронный блок регистрации АЭ

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, а значения скорости счета АЭ будут записаны в память прибора для последующего экспорта и проверки. На рисунке 2.59 представлен алгоритм реализации метода.



Рисунок 2.59 – Алгоритм проведения измерений

Для реализации второго описанного подхода предлагается способ определения приращений девиатора напряжений в окрестностях горных выработок. Способ состоит в следующем. На определенной глубине бурится измерительная скважина, расположенная перпендикулярно направлению оси горной выработки, в которой устанавливается пакер. Затем в скважину закачивается эпоксидная смола с отвердителем и наполнителем из углеводородного волокна (композит серии «В» рисунок 2.6). Вид наполнителя был выбран экспериментальным путем, по сравнению значений коэффициента k (учитывающий тип неоднородности материала) трех различных видов композитов. После завершения процесса полимеризации смолы и перераспределения напряжений в массиве в процессе ведения горных работ, колонковым бурением обустраивается измерительная скважина и из неё извлекается керн. Из извлеченного из скважины керна, в перпендикулярном ему направлении, вырезается цилиндр, ось которого совпадет с ожидаемым направлением главного действующего напряжения. Схема реализации метода представлена на рисунке 2.60.

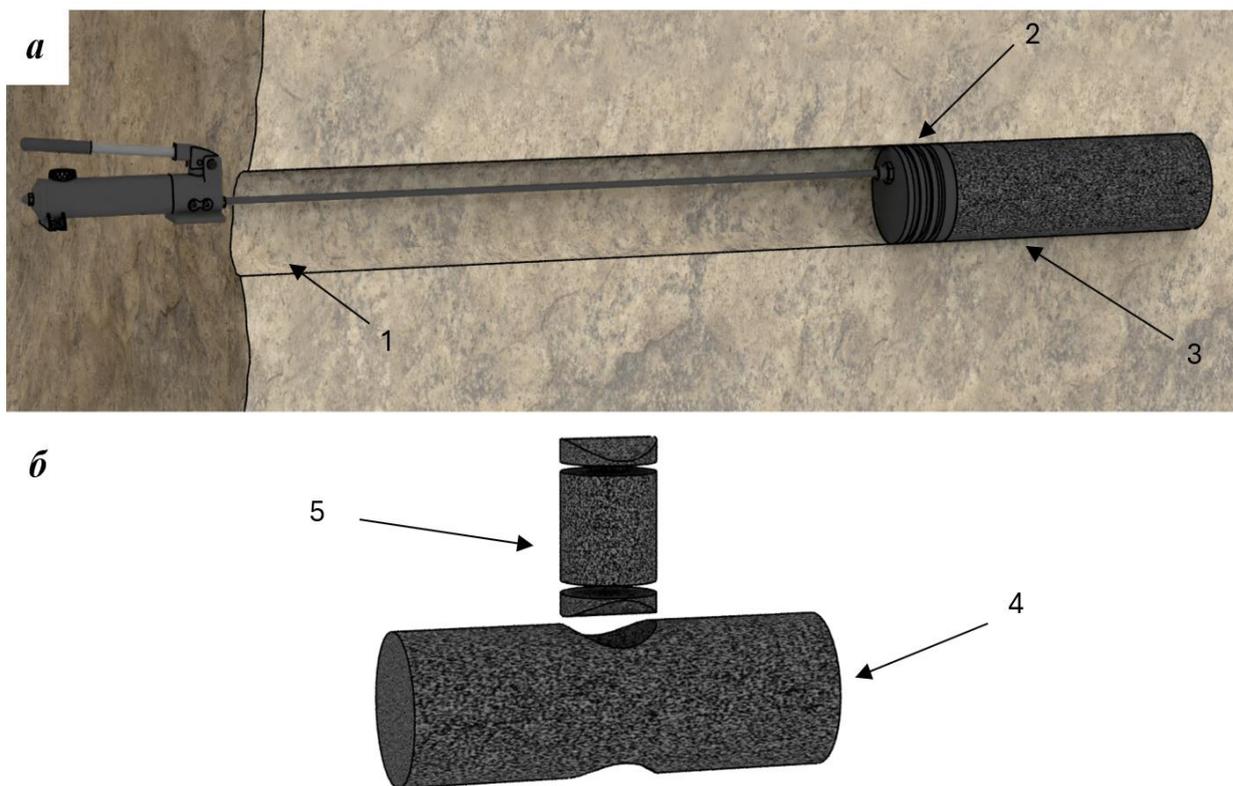


Рисунок 2.60– Схема закачки композиционного материала в измерительную скважину (а) и вырезание цилиндра для проведения дальнейших испытаний (б): 1 – измерительная скважина; 2 – пакер; 3 – эпоксидный состав с наполнителем и отвердителем; 4 – извлеченный керн; 5 – полученный образец

Затем в лабораторных условиях проводятся испытания образца по схеме Кармана. Для этого сначала значения осевого напряжения σ_1 и бокового $\sigma_{2,3}$ доводят до уровня гидростатического давления, определяемого как $\gamma \cdot h$ (γ – удельный вес вышележащих пород, h – глубина расположения). Затем, постепенно увеличивая значение σ_1 , наблюдают за изменением активности акустической эмиссии. По резкому всплеску активности можно судить о действующем напряжении в массиве по значению возникшего девиатора напряжений D

В том случае, когда оказывается возможным из композиционного цилиндра изготовить два образца, один из них испытывается по одноосной схеме, при этом определяется значение приращений σ_1 в массиве. Второй образец испытывается по описанной выше осесимметричной схеме, при этом

определяется значение D . Таким образом, оказывается возможным определить значения приращений как σ_1 , так и $\sigma_{2,3}$. На рисунке 2.61 представлена последовательность операций при реализации метода.



Рисунок 2.61 – Последовательность действий при реализации способа определения приращений девиатора напряжений в массиве

2.7.3.2 Обоснование методических аспектов контроля изменения девиатора напряжений на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов

Для успешной реализации предлагаемых способов контроля требуется установить, при каких условиях «носитель памяти», размещенный в измерительной скважине, в полном объеме будет воспринимать напряжения в массиве, ориентированные по оси скважины. Также необходимо установить типовые и критические значения девиаторов напряжений для рассматриваемых систем разработки полезных ископаемых.

Для решения поставленных задач в настоящей работе предлагается использовать компьютерное моделирование в среде Comsol Multiphysics, основанное на применении метода конечных элементов [301]. Для оценки необходимой длины композиционного цилиндра создавалась модель, представляющая собой кубический участок горной породы (каменной соли)

со стороной 2 м. В центре куба моделировалась скважина диаметром 50 мм, в торце которой размещался цилиндр из композиционного материала длиной l . Массив нагружался равнокомпонентной сжимающей нагрузкой в 10 МПа. Задача решалась для цилиндров разной длины и соотношений l/d , равных 2, 4 и 8. Физические свойства элементов модели задавались следующим образом: массив каменной соли – $E = 12$ ГПа, $\mu = 0,3$, $\rho = 2180$ кг/м³; композиционный цилиндр – $E = 15$ ГПа, $\mu = 0,33$, $\rho = 1600$ кг/м³ [302]. Схема компьютерной модели и результаты вычислений представлены на рисунке 2.62.

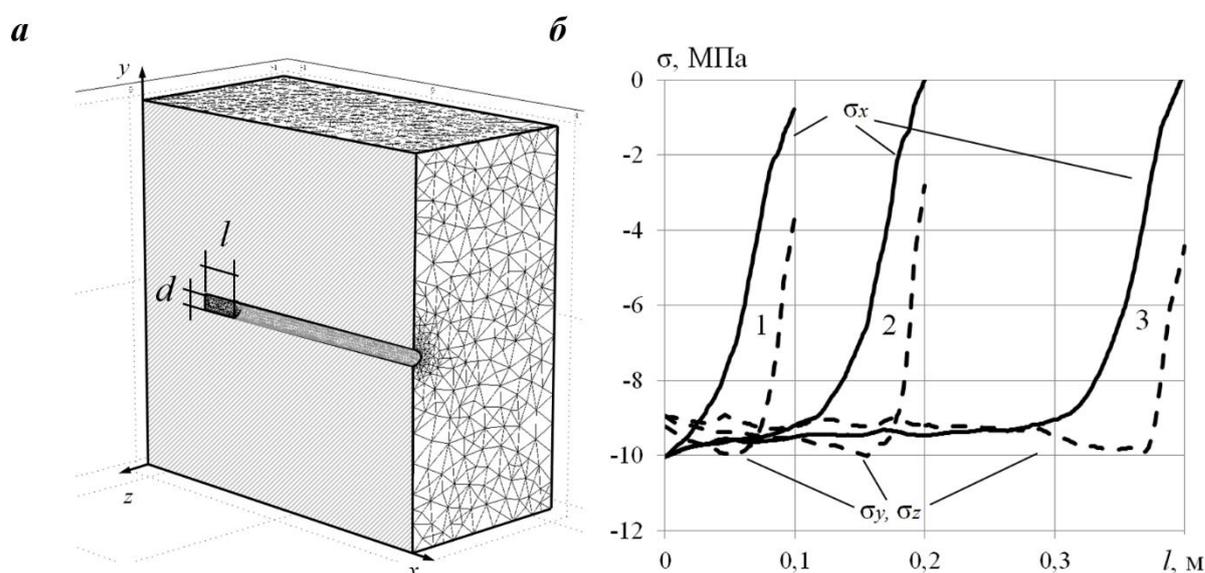


Рисунок 2.62 - Разрез модели, разбитой на сетку конечных элементов (а) и распределение вертикальных напряжений в композитном цилиндре вдоль оси x (б) (1 – $l/d = 2$; 2 – $l/d = 4$; 3 – $l/d = 8$)

Из рисунка 2.62(б) видно, что при соотношении $l/d = 2$ напряжения в цилиндре, возникающие вдоль его оси, испытывают значительные искажения вблизи свободного торца. При этом величина σ_x в упругом включении оказывается близкой к σ_x в массиве только в торцевой части измерительной скважины. При увеличении l зона влияния свободного торца композитного цилиндра остается постоянной и составляет примерно $2d$. При этом в оставшемся объеме цилиндра наблюдается поле напряжений, близких к напряжениям в массиве. Таким образом, при реализации контроля в

измерительной скважине необходимо формировать упругое композиционное включение с соотношением $l/d > 4$, при этом крайняя часть цилиндра, равная $2d$ должна отбрасываться.

Вторая модель составлялась для оценки возникающих в процессе отработки девиаторов напряжений. Для примера был выбран соляной рудник СКРУ-3 ОАО «Уралкалий». Отработка пласта КрII комбайном Урал 20Р производится в три этапа с центральным заходом шириной 5,3 м и дополнительными заходами, увеличивающими ширину камеры до 8 м. Модель представляла собой участок массива в виде параллелепипеда со сторонами $10 \times 15 \times 20$ м в которой сооружен забой, геометрические параметры которого соответствуют реальным параметрам на руднике. На верхнюю грань параллелепипеда прикладывалась нагрузка, равная весу вышележащего столба пород ($\sigma = 8$ МПа [203]), при этом на все остальные грани, граничащие с массивом, накладывался запрет на перемещение. Задача решалась для случаев, когда забой находится на $L = 3$ м и $L = 10$ м от края модели. Измерения напряжений производились в виртуальной измерительной скважине, оборудованной на расстоянии $L_{ск} = 1,5$ м от края модели. В качестве основного информативного параметра выступал девиатор напряжений D – разность между вертикальными (σ_z) и горизонтальными (σ_x и σ_y) напряжениями. Разрез модели и значения D в функции от глубины скважины $l_{ск}$ приведены на рисунке 2.8. Дополнительно к изменению положения забоя моделировалась ситуация потери устойчивости межкамерным целиком (МКЦ). В этом случае пролет камеры увеличивался на ширину МКЦ и второй камеры и составлял 25 м. Схема компьютерной модели и результаты вычислений представлены на рисунке 2.63.

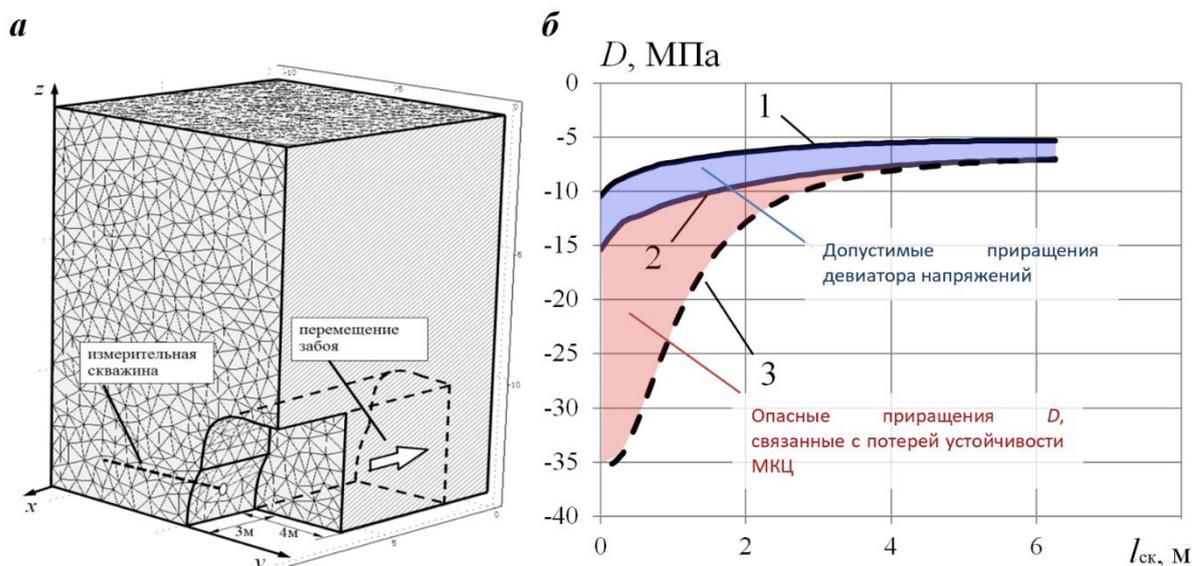


Рисунок 2.63 - Разрез модели (а) и значения $D(l_{ск})$ (б): 1 – $L = 3$ м; 2 – $L = 10$ м; 3 – для случая потери устойчивости МКЦ

Из рисунка 2.63б видно, что наибольших значений D достигает на поверхности обнажения выработки (при $l_{ск} = 0$), при этом перемещение забоя увеличивает девиатор на 50%. Потеря устойчивости МКЦ приводит к значительному увеличению значений D , при этом в массиве возникают напряжения, превышающие предел прочности рассматриваемой горной породы.

2.7.4 Контроль растягивающих напряжений в кровле горной выработки с использованием композиционных чувствительных элементов

На основе экспериментально определенных закономерностей проявления акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах, подробно описанных в п. 2.5, предложены два способа контроля растягивающих напряжений в кровле горных выработок 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 рисунке 2.64а.

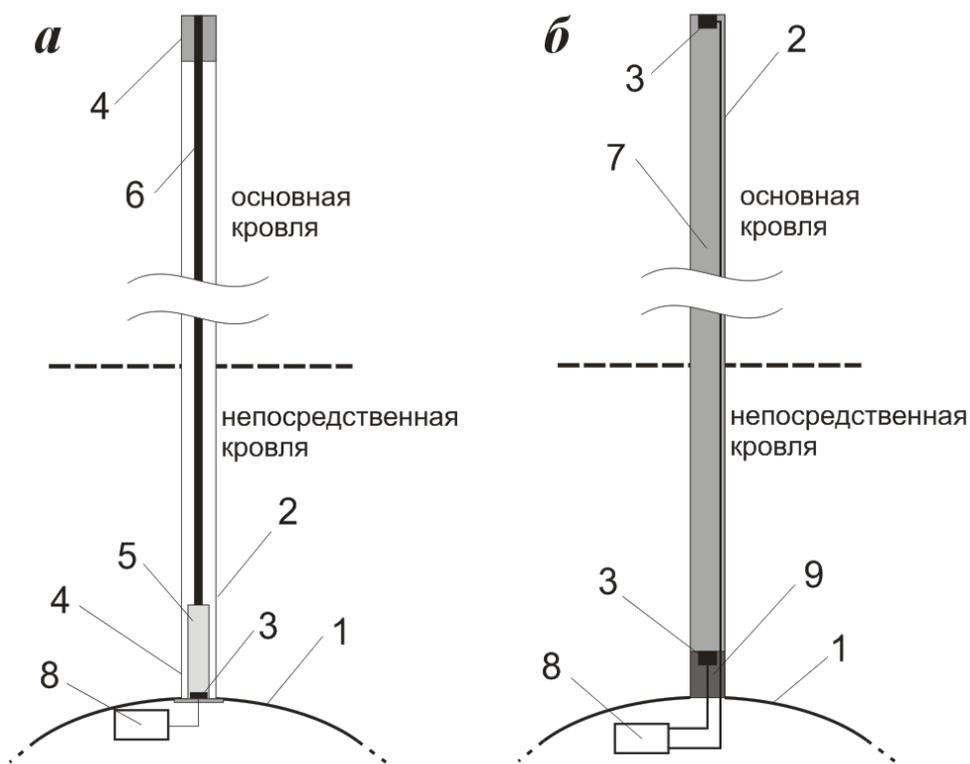


Рисунок 2.64 – Схема контроля напряжений (а) и расслоений в кровле (б): 1 – кровля; 2 – измерительная скважина; 3 – приемные преобразователи; 4 – полимерное клеевое соединение; 5 – композитный чувствительный элемент; 6 – стальной анкер; 7 – композиционный волновод; 8 – прибор регистрации акустической 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 (например, может быть использован электронный блок, описанный в п. 2.7.2.2). Композитный цилиндр предварительно в лабораторных условиях нагружают в условиях одноосного растяжения до уровня $\sigma_{крит}$, близкого к значению σ_p (например, до $0,85\sigma_p$), 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, композиционный стержень выполняет функции датчика-сигнализатора превышения критических напряжений.

Второй метод направлен на выявление хрупких нарушений в кровле (расслоений) и определение их местоположения. Схема его реализации представлена на рисунке 2.64б. Из горной выработки бурят шпур малого диаметра, в торце и устье которого закрепляют акустические преобразователи, подключенные к электронному блоку регистрации. Устье шпура перекрывают пакером, в котором через штуцер нагнетают жидкий композит в свободное пространство. После полимеризации последнего в шпуре 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 (серия «В»). 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 (серия «А»).

Выводы к главе 2

Сформирована коллекция образцов композиционных материалов для проведения совместных механических и акустико-эмиссионных измерений. Коллекция включает образцы, изготовленные из промышленно выпускаемых слоистых композитов, таких как гетинакс, текстолит и стеклотекстолит, а также специально синтезированных в лабораторных условиях композитов на

основе эпоксидной смолы и армирующих компонентов в виде частиц алюминия (серия «А»), углеродных волокон (серия «В») и слоев углеткани (серия «С»).

Показано, что угол между приложением нагрузки и направлением слоев в анизотропных композитах существенно влияет на акустико-эмиссионную тензочувствительность материалов и особенности проявления в них АЭЭП.

Для синтезированных композитов изучены особенности формирования и проявления АЭЭП в условиях трехосного неравнокомпонентного нагружения. Показано, что во всех исследованных материалах устойчиво формируется «память» о ранее испытанных значениях девиатора напряжений, при этом в отличие от горных пород не требуется определение дополнительного коэффициента k , связанного с неоднородностью свойств горных пород.

На основе спектрального анализа импульсов АЭ показано, что для композитов серии «В» характерно проявление АЭЭП не только в виде всплеска активности акустической эмиссии, но и в виде резкого изменения спектрального состава АЭ импульсов. Подобный эффект не характерен для горных пород. Для указанного типа композита также показано проявление «обратного» эффекта АЭЭП, проявляющегося в виде резкого изменения спектрального состава АЭ сигналов в режиме растягивающих напряжений в момент, когда при сбросе нагрузки ее величина оказывается равной ранее испытанной максимальной нагрузке.

На основе комплексного AF-RA и KDE анализа показано, что в отличие от горных пород, преобладающим механизмом трещинообразования в исследованных композитах является разрыв под действие растягивающих напряжений. Вероятно, это объясняет низкие значения определенного ранее коэффициента k , а также в целом более постоянные акустико-механические свойства композитов.

На основе проведенных комплексных лабораторных исследований проявления акустико-эмиссионных эффектов в широком спектре

композиционных материалов предложен ряд способов геоконтроля. Разработанные методы контроля позволяют производить контроль за направлением действия максимального главного напряжения, производить мониторинг смещения зоны опорного давления, а также осуществлять сигнализацию о превышении в массиве заранее заданных критических уровней напряжений, в том числе в условии трехосного наравнокомпонентного нагружения. Для предложенных способов разработано соответствующее аппаратное обеспечения, а также решен ряд методических вопросов их применения.

Глава 3. Принципы обеспечения помехозащиты акустико-эмиссионных измерений при реализации методов контроля НДС массива

Использование АЭЭП в композиционных материалах, применяемых в качестве чувствительных элементов систем измерений НДС, подробно описанных во второй главе, тесно связано с необходимостью учитывать весь спектр возможных помеховых факторов [303]. 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.

3.1 Оценка влияния влаги как помехового фактора при контроле НДС массива с применением композиционных чувствительных элементов систем измерений

Для оценки степени влияния влаги на параметры проявления АЭЭП в композиционных материалах был проведен ряд лабораторных экспериментов. Объектом исследования стали цилиндрические образцы текстолита марки ПТК, ранее исследованные в [245], диаметром 42 мм и толщиной 15 мм.

Суть экспериментов сводилась к следующему. Образцы текстолита подвергались одноосному нагружению до уровня $\sigma_{уст} = 15$ МПа вдоль диаметра с использованием стальных пуансонов, повторяющих геометрию образца. Установочное нагружение производилось под углом 45° к направлению слоев в композите. После выдержки под нагрузкой в течение 1 часа образцы взвешивались и помещались в воду на срок 5 мин, 15 мин, 1 час и 24 часа. По истечении указанного срока образцы извлекались из воды и взвешивались повторно для оценки массовой доли водопоглощения. Далее они подвергались тестовому нагружению до уровня $\sigma_{тест} = 25$ МПа с одновременной регистрацией значений \dot{N}_Σ . Угол наклона слоев соблюдался равным углу наклона при тестовом нагружении. Все измерения производились на специализированном лабораторном стенде [246]. В

качестве основных информативных параметров выступали массовая доля водопоглощения ρ образцов и отношение средних амплитуд A_{cp} акустико-эмиссионных событий в тестовом и установочном циклах нагружения. Также определялась относительная погрешность $\Delta_{ЭП}$ воспроизведения АЭЭП, определяемая с использованием алгоритма, подробно описанного в [304]. Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментальных исследований

Время выдержки в воде	Массовая доля водопоглощения, %	A_{cp}	$\Delta_{ЭП}$, %
5 мин	3,2	0,40	41,1
15 мин	3,4	0,41	44,8
1 час	3,6	0,36	50,2
24 часа	3,7	0,21	59,8

Анализ результатов, приведенных в таблице 3.1 показывает, что величина ρ для текстолита марки ПТК составляет 3,7%, при этом практически 90% массовой доли водопоглощения происходит в первые 5 минут контакта с водой. Также значительно снижается величина A_{cp} и увеличивается погрешность $\Delta_{ЭП}$, что приводит к снижению эффективности контроля напряжений в породном массиве с использованием АЭЭП в текстолите. Таким образом, можно утверждать, что присутствие воды в зоне контроля можно рассматривать как помеховый фактор, оказывающий значительное влияние на точность контроля и способный исключить возможность его проведения. Очевидно, что для минимизации влияния влажности достаточно покрывать образцы любыми гидрофобными составами, предотвращающими непосредственный контакт текстолита с водой.

3.2 Применение корреляционной фильтрации сигналов АЭ для повышения помехозащищенности контроля напряженного состояния *in-situ*

Другим существенным помеховым фактором являются акустические шумы, возникающие как при ведении горных работ.. Подобные шумы могут иметь различную природу и, как следствие, совершенно разнообразные амплитудные и частотные характеристики. В этом случае полоса частот помеховой составляющей может пересечься с довольно широкой полосой регистрации полезного сигнала акустической эмиссии (30-500 кГц). Это приведет к невозможности выделения отдельных АЭ событий в момент проявления АЭЭП в композиционном чувствительном элементе. Для противодействия помеховому влиянию техногенных шумов могут быть реализованы два подхода, заключающиеся либо в априорной аналоговой, либо апостериорной цифровой фильтрации. Последний вариант обладает рядом преимуществ, т.к. не подразумевает создание дополнительных аналоговых устройств, а также пригоден для обработки уже зарегистрированных АЭ сигналов.

Для обоснования принципов цифровой фильтрации АЭ импульсов был проведен ряд исследований в лабораторных условиях. Цилиндрические образцы из текстолита ПТК подвергались двухцикловому нагружению до уровней $\sigma_{уст} = 20$ МПа и $\sigma_{тест} > 30$ МПа. Первый образец являлся контрольным. При нагружении второго образца в начале второго цикла на образец параллельно с нагружением с помощью виброакустического преобразователя подавался акустический шум так, чтобы соотношение модулей амплитуд АЭ событий и шума равнялось 1:1. При формировании шумового сигнала производилось сложение компоненты белого шума с периодической компонентой с $f = 14$ Гц, которая соответствует частоте вращения буровой коронки при бурении скважин [305]. Примеры контрольного и тестовых испытаний приведены на рисунке 3.1.

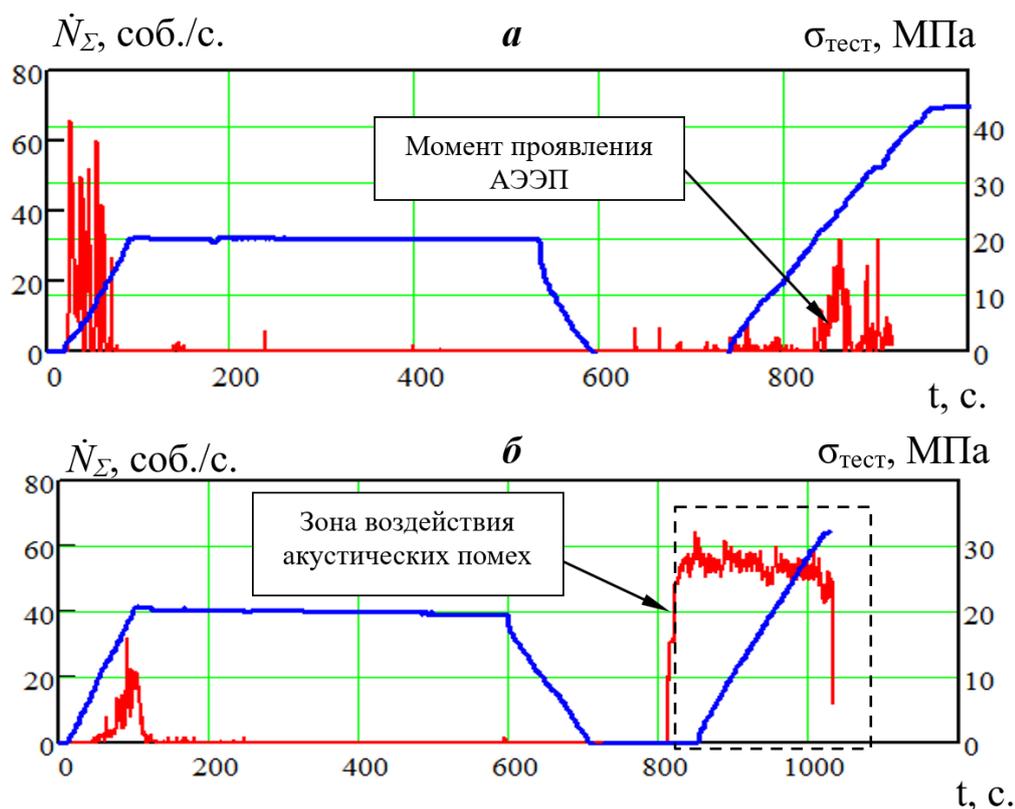


Рисунок 3.1 – Пример зависимостей \dot{N}_Σ и $\sigma_{\text{тест}}$ от времени нагружения t для контрольного (а) и тестового (б) испытания

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3.1, показывает, что при циклическом нагружении в контрольном образце наблюдается отчетливое проявление АЭЭП, выражающееся в резком возрастании \dot{N}_Σ в момент достижения тестовой нагрузкой значения $\sigma_{\text{уст}}$ (рисунок 3.1а). При нагружении тестового образца (рисунок 3.1б) в момент включения виброакустического преобразователя на регистрирующей аппаратуре начинается непрерывная регистрация АЭ событий, поскольку пиковые амплитуды шумового сигнала значительно превосходят установленный амплитудный порог регистрации. Таким образом, значение \dot{N}_Σ оказывается сильно искаженным и по характеру его изменения становится невозможно судить о проявлении АЭЭП в исследуемом образце.

С целью повышения помехозащиты акустико-эмиссионного контроля НДС массива предлагается алгоритм корреляционной фильтрации, цель которого – выявить присутствие АЭ событий на фоне стационарного

акустического шума и по характеру изменения \dot{N}_Σ определить момент проявления АЭЭП в исследуемом образце. Ранее корреляционный подход использовался в [306,307] при оценке пространственно-временной корреляции параметров АЭ на разных стадиях деформирования образцов горных пород, однако применение подобного механизма для фильтрации АЭ сигналов производится впервые. 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

$$B(T) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y_i(t - \tau) dt, \quad (3.1)$$

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 $P_{баз}$, соответствующая максимальному значению 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 $P_{баз-n}$ и $P_{баз+n}$ соответственно, суммируются, образуя параметр S который характеризует ширину пика $B(\tau)$

$$S = B(P_{баз} - n) + B(P_{баз} + n). \quad (3.2)$$

Малое значение параметра S свидетельствует о быстром спадании функции $B(\tau)$ и, соответственно, о высокой степени корреляции между сигналом-эталонном и текущим рассматриваемым сигналом АЭ. Метод оценки

ширины пика взаимной корреляционной функции иллюстрируется рисунком 3.2.

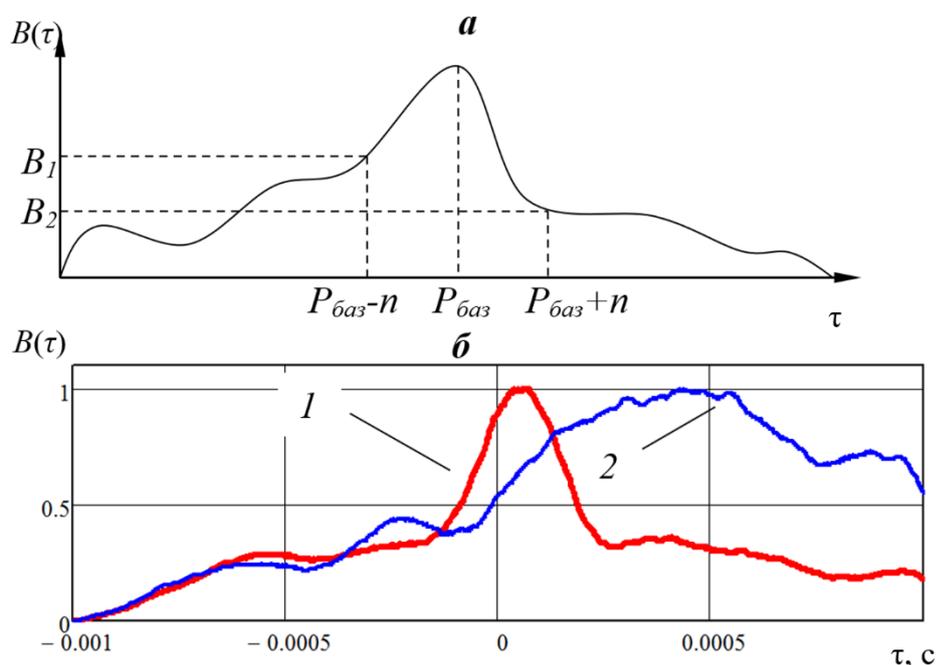


Рисунок 3.2 – Графическая иллюстрация оценки ширины пика функции $B(\tau)$ (а) и примеры реальных функций $B(\tau)$ (б); 1 – сигнал содержит АЭ событие, 2 – сигнал не содержит АЭ событие

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, в $B(\tau)$ появляется максимум. 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, пример которой приведен на рисунке 3.3.

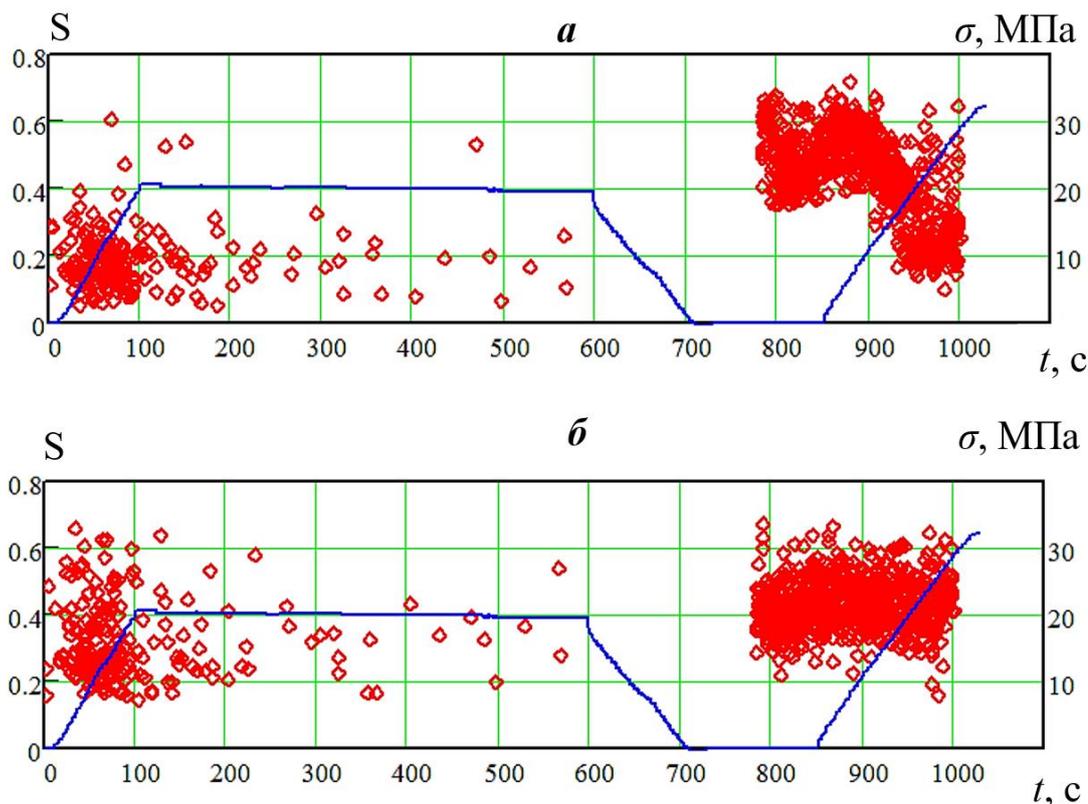


Рисунок 3.3 – Примеры диаграмм рассеяния параметра S в функции от времени t и нагрузки σ для эталона в виде АЭ сигнала (*а*) и виде шумового сигнала (*б*)

Из рисунка 3.3*а* видно, что на отрезке $0 \div 600$ с, где в записанных реализациях присутствует только АЭ-события, величины S имеют малые значения. Источник шума включается на 790-й секунде, при этом значения S заметно возрастают. При приближении к моменту времени, когда нагрузка тестового цикла начинает достигать порога $\sigma_{уст}$, значения S начинают снижаться. Наконец в тот момент, когда $\sigma_{тест} \geq \sigma_{уст}$, низкие значения S начинают преобладать, индицируя возросшую активность АЭ и, следовательно, проявление АЭЭП в исследуемом образце.

Для сравнения на рисунке 3.3*б* 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 $\sigma_{уст}$, 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 была цензурирована 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 была исследована на тип распределения, а пороги были установлены таким образом, чтобы они отсекали 90% площади кривой распределения. Другими словами, S -значения, связанные с АЭ событиями, с вероятностью 90% оставались в цензурированной выборке и с 10% вероятностью отбрасывались. Далее эти пороги были применены к временному участку, где источник шума был включён. В результате удалось отбросить большинство записей, содержащих только шум и оставить те записи, которые содержат АЭ события. Результат цензурирования представлен на рисунке 3.4.

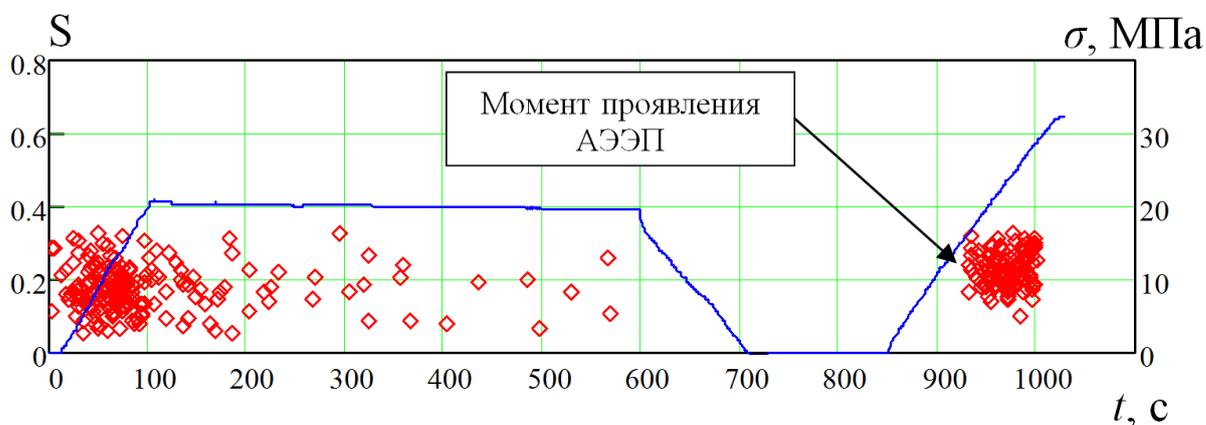


Рисунок 3.4 – Цензурированная выборка значений S в функции от времени нагружения t и нагрузки σ

Из рисунка 3.4 видно, что после обработки во втором цикле нагружения наблюдается отчетливый всплеск параметра S , свидетельствующий о проявлении АЭЭП в исследуемом образце. При этом значение параметра $\Delta_{ЭП}$

не превышает 15%. На рисунке 3.5 представлена блок-схема алгоритма корреляционной фильтрации.

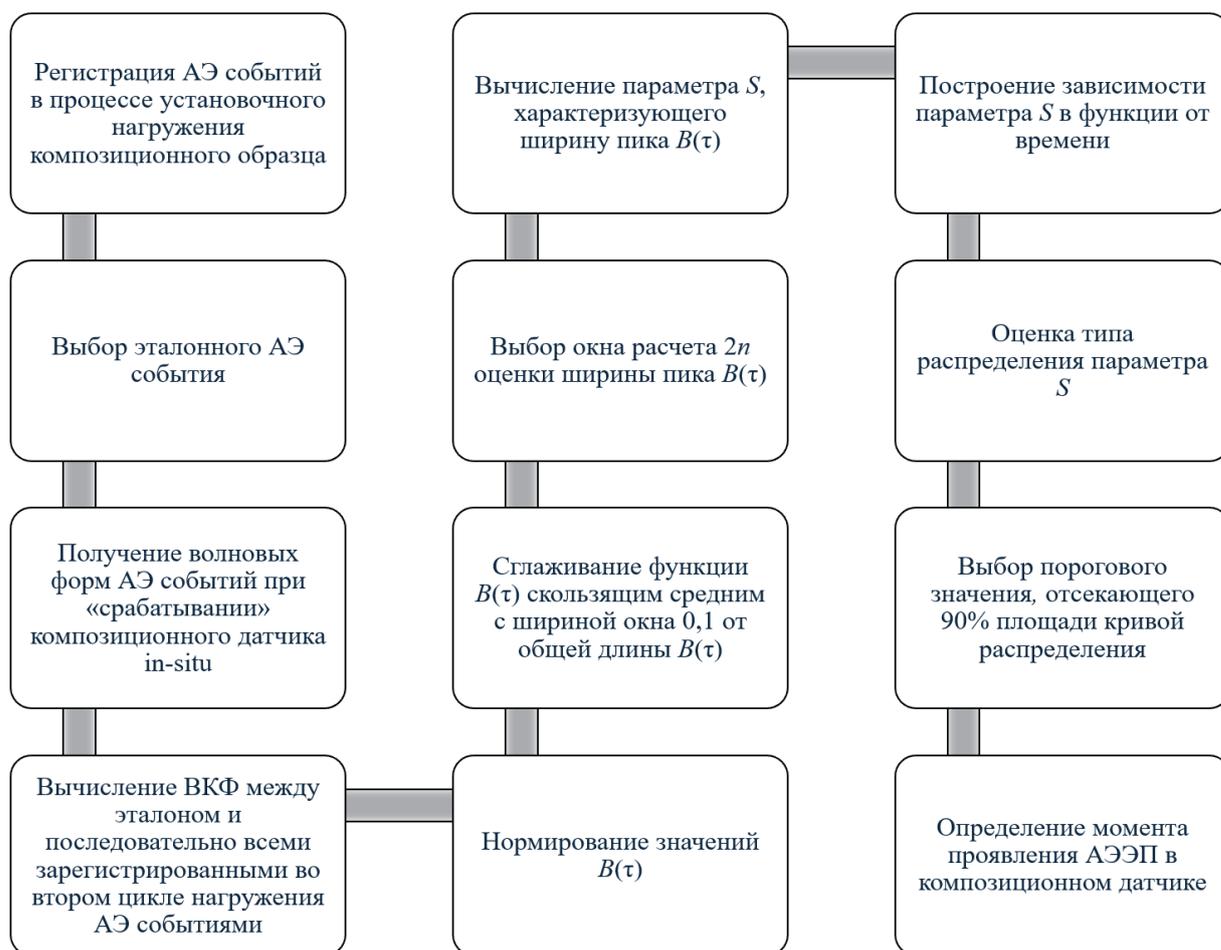


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма корреляционной фильтрации АЭ сигналов

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 позволяет значительно повысить помехозащищенность и достоверность мониторинга НДС в окрестностях горных выработок.

3.3 Использование спектральных особенностей проявлений АЭЭП в дисперсно-наполненных композитах для повышения помехозащищенности контроля НДС

Как было описано в п. 3.2, одним из направлений помехозащиты АЭ измерений с участием композиционных чувствительных элементов является использование апостериорной цифровой фильтрации сигналов АЭ. Несмотря на удобство подобного алгоритма, его аппаратной независимости, существует важное ограничение его применения. Алгоритм корреляционной фильтрации применим только после завершения измерений и экспорта сохраненных данных для их последующей камеральной обработки. Подобный подход принципиально не применим для реализации мониторинговых измерений, описанных в п.2.7.1.3 и п.2.7.2.1, предполагающих обработку сигналов in-situ с помощью портативного регистратора АЭ. В этом случае единственным вариантом существенного повышения помехозащиты является совместное использование описанного в п.2.4 спектрального проявления АЭЭП в дисперсно-наполненном композите серии «В» и аналоговой полосовой фильтрации.

На рисунке 3.6 приведен пример проявления АЭЭП во временной и спектральной области в композите серии «В», наполненного дисперсно-распределенными углеродными волокнами.

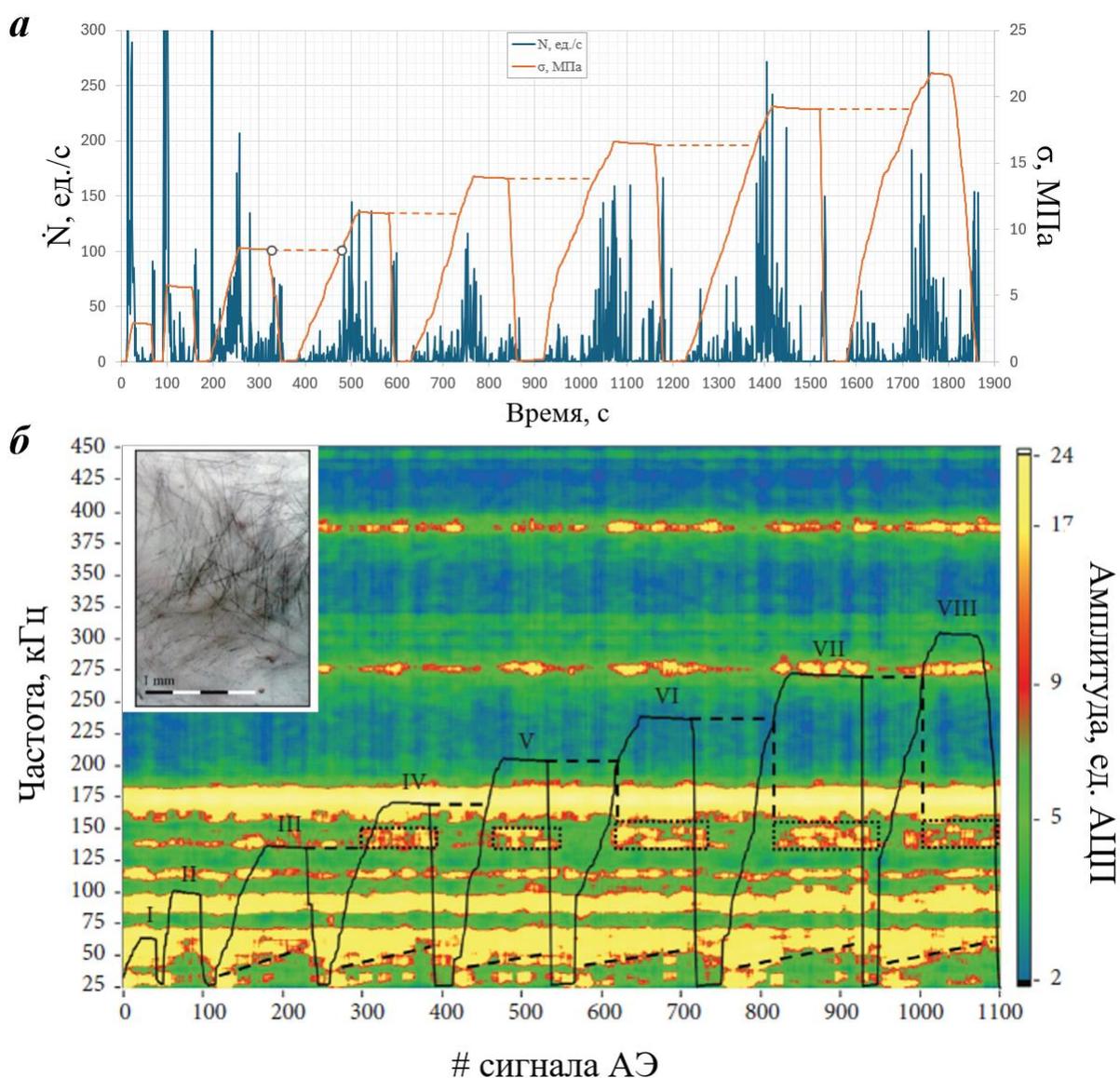


Рисунок 3.6 – Пример проявления АЭЭП во временной (а) и спектральной (б) области при циклическом нагружении образца серии «В»

На рисунке 3.6а показано проявление АЭЭП на примере резкого всплеска скорости счета акустической эмиссии \dot{N} , при достижении нагрузкой уровня максимальной нагрузки предшествующего цикла. Информативный параметр \dot{N} , заключающийся в количестве превышений сигналами АЭ заданного порогового уровня в единицу времени, выбран в качестве основного из-за относительной простоты его регистрации. Измерение этого параметра реализовано в портативном блоке регистрации АЭ, описанном в п.2.7.2.2.

Одновременно с резкими всплесками параметра \dot{N} в исследуемом материале наблюдается не менее резкое изменение спектрального состава АЭ импульсов в довольно узком диапазоне частот 130-150кГц, как это показано на рисунке 3.6б. Продемонстрированная особенность может быть использована в качестве основания для применения узкополосной фильтрации в указанном диапазоне частот с целью значительного повышения устойчивости полезного АЭ сигнала к акустическим помехам. Для успешного применения подобного подхода при мониторинге параметров НДС приконтурного массива, фильтрация должна производиться до вычисления параметра \dot{N} с помощью портативного регистратора АЭ. В этом случае необходимо использовать аналоговый фильтр на основе операционных усилителей, электронная схема и амплитудно-частотная характеристика которого представлены на рисунке 3.7, а общая схема измерительного комплекса – на рисунке 3.8.

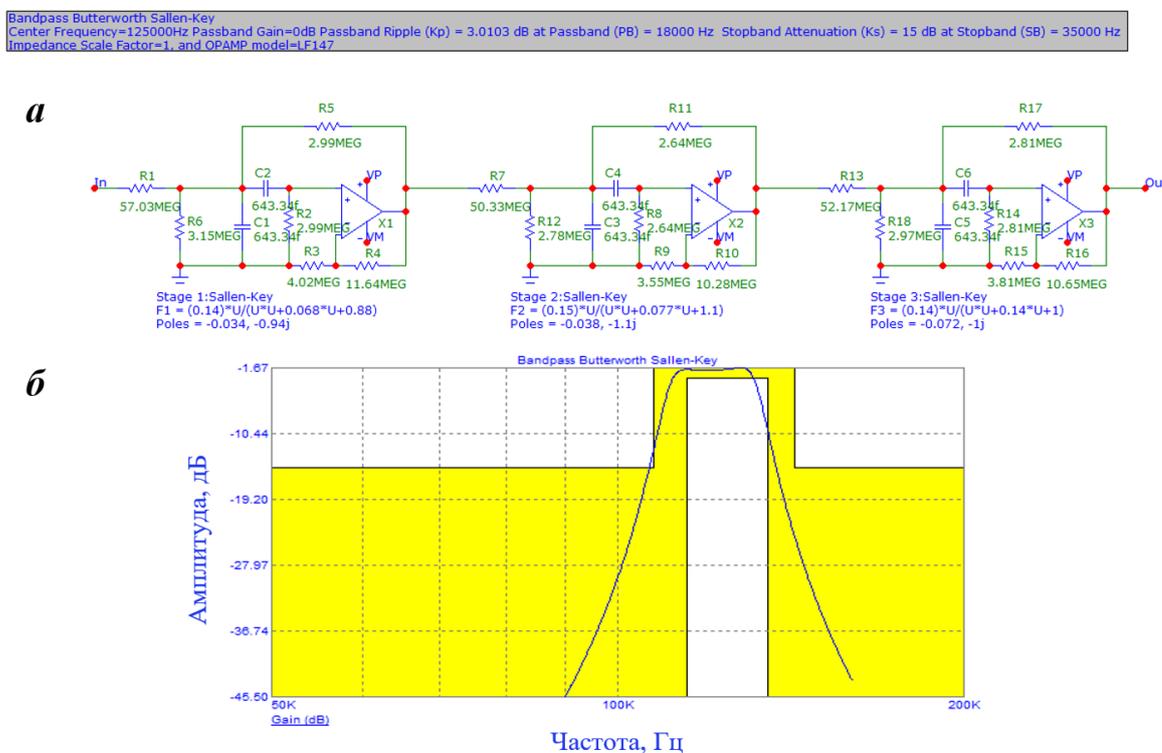


Рисунок 3.7 – Электронная схема (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) аналогового фильтра

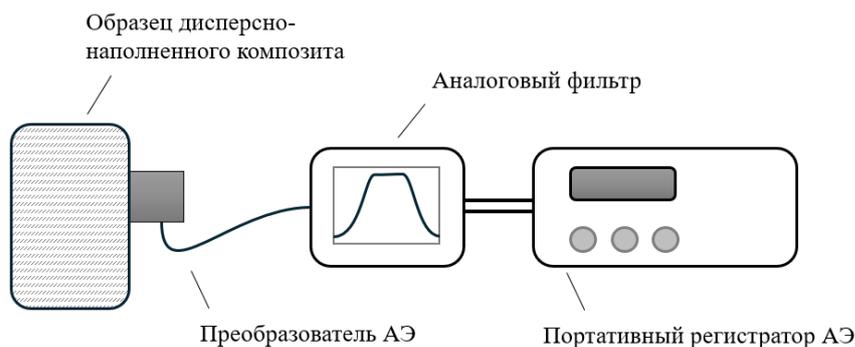


Рисунок 3.8 – Общая схема измерительного комплекса с применением аналоговой фильтрации

В результате применения аналогового полосового фильтра ко всем зарегистрированным АЭ сигналам оказывается вырезанной полоса частот, в которой проявление АЭЭП сопровождается не только всплеском активности АЭ, но и резким увеличением амплитуды событий (см. рисунок 3.9). Это, в свою очередь, приводит к еще более контрастному росту значений \dot{N} , приуроченных к моменту проявления эффекта памяти. На рисунке 3.10 представлен результат регистрации АЭЭП в образце серии «В» с применением полосовой фильтрации.

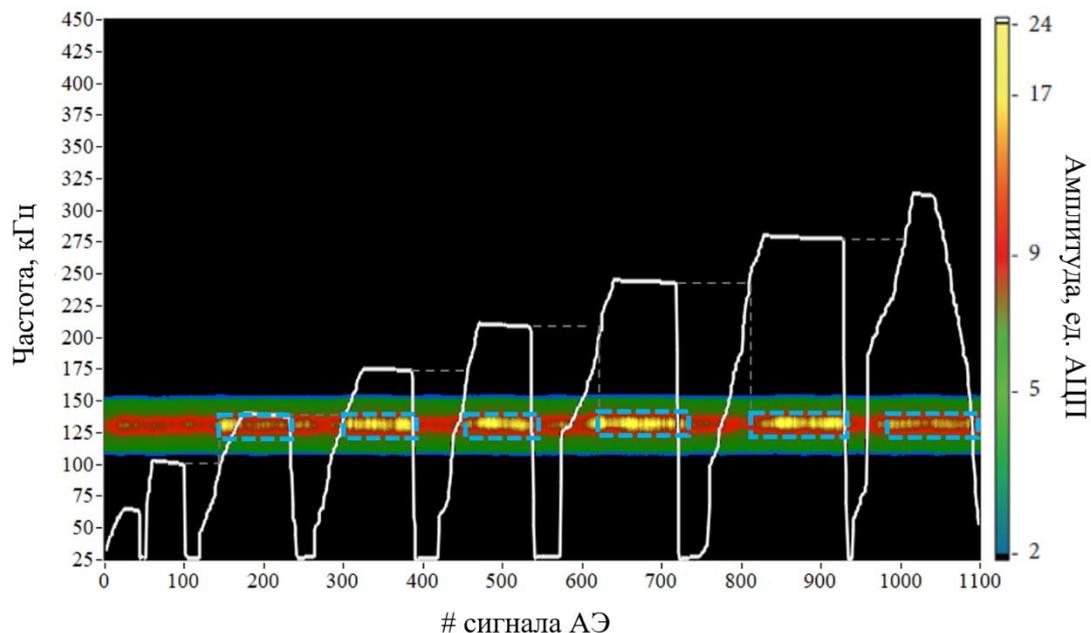


Рисунок 3.9 – Результат применения полосовой фильтрации

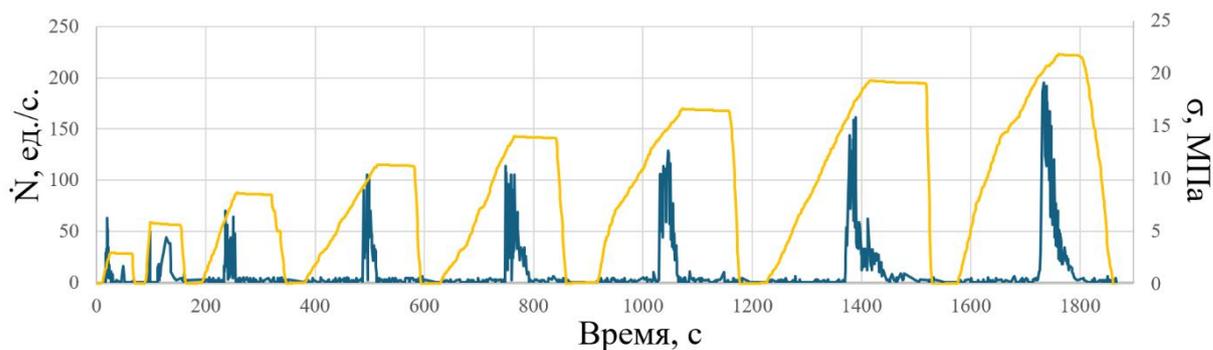


Рисунок 3.10 – Пример проявления АЭЭП в образце серии «В» с применением плюсовой фильтрации.

Рисунок 3.10 демонстрирует более контрастное проявление АЭЭП в дисперсно-наполненном композите после применения полосовой фильтрации. По сравнению с исходной зависимостью, полученной без предварительной фильтрации (рисунок 3.6а), всплески скорости счета АЭ, сопровождающие проявление эффекта памяти, легко выделяются по пороговому принципу. При этом уровень порога можно изменять в широких пределах без ущерба для точного определения момента проявления АЭЭП.

Выводы к главе 3

Описанные во второй главе методы контроля различных параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива основаны на регистрации и последующей интерпретации сигналов акустической эмиссии, возникающих в размещаемых в измерительных скважинах композиционных чувствительных элементах. При этом регистрация АЭ, относясь к пассивным методам измерений, из-за малой энергии сигналов крайне чувствительна к различным помеховым факторам, в частности к техногенным и природным шумам, а также влажности. Повышение надежности результатов контроля НДС возможно на основе учета и снижения влияния указанных помеховых факторов.

Экспериментальные исследования показали, что наличие влаги существенно влияет на отчетливость проявления АЭЭП, однако ее помеховое

влияние можно нивелировать с помощью герметизации композитных чувствительных элементов с помощью различных гидрофобных или водонепроницаемых составов.

Акустические шумы техногенного или природного происхождения могут также выступать в качестве существенных помеховых факторов. На основе ряда экспериментальных исследований предложены алгоритмы априорной аналоговой полосовой фильтрации, а также апостериорной цифровой фильтрации, основанной на корреляционном анализе сигналов АЭ. Первый подход основан на специфических особенностях проявления АЭЭП в дисперсно-наполненных композитах серии «В» и может быть использован при реализации мониторинговых измерений критических уровней напряжений в конструктивных элементах систем разработки. Второй подход предназначен для повышения надежности способов контроля, в которых «память» в композиционных чувствительных элементах формируется в массиве *in-situ*, а проявляется при тестовых испытаниях извлеченных образцов в лабораторных условиях.

Следует понимать, что применение любого из предложенных алгоритмов помехозащиты связано с дополнительными трудозатратами или применением дополнительных технических устройств. Поэтому решение о применении помехозащитных мероприятий должно приниматься на основе проведенных предварительных исследований и анализа условий проведения измерений (близости к зонам ведения горных работ, гидрогеологических особенностей массива и пр.).

Глава 4. Особенности использования активного ультразвукового прозвучивания при изучении напряженно-деформированного состояния горных пород

Опыт применения ультразвуковых скважинных методов изучения НДС приконтурного массива пород, подробно описанный в первой главе, указывает на ряд принципиальных ограничений их развития. Проведение УЗ измерений в сухих скважинах с использованием сухого акустического контакта делает невозможным применение динамических информативных параметров, как правило более чувствительных к изменению напряженного состояния. При этом возможности использования базовых кинематических характеристик (скоростей продольных и поперечных волн) оказываются весьма ограниченными из-за их сравнительно низкой чувствительности к малым изменениям напряжений.

Одним из направлений повышения надежности использования УЗ методов может быть более глубокое изучение параметров распространения упругих волн в породах с сильно выраженной анизотропией механических свойств, к которым относятся каменные угли. Установление возможности выделения стадий деформирования каменных углей, подвергаемых различным режимам механического нагружения, по результатам анализа скоростных характеристик может лечь в основу увеличения надежности контроля НДС в углепородных массивах.

Другим направлением повышения надежности и чувствительности УЗ методов контроля и мониторинга параметров НДС приконтурного массива является переход к более сложным алгоритмам обработки, учитывающим изменение скоростей упругих волн, испытавших многократное Рэлеевское рассеяние. Информация о таких волнах содержится в коде регистрируемых волновых форм и может быть получена с применением алгоритмов ультразвуковой интерферометрии.

4.1 Закономерности распространения ультразвуковых колебаний в сильно анизотропных породах при различных режимах механического нагружения

Накопленный опыт в области изучения акустических свойств образцов горных пород при различных режимах нагружения [308–311] свидетельствует как о высокой информативности таких исследований, так и о высокой степени проработки методического и аппаратного обеспечения лабораторных экспериментов. При этом важно отметить, что для ископаемых углей характерна высокая неоднородность структуры и петрофизических свойств, которые во многом индивидуальны не только для конкретного месторождения и пласта, но и конкретного участка последнего. В связи с этим, несмотря на имеющиеся работы, посвященные изучению акустических свойств угля на образцах в условиях одноосного и сложного напряженного состояния [312–318] соответствующие исследования должны быть продолжены.

Результаты измерений акустических характеристик углей в условиях одноосного и трехосного нагружения описаны в работах [321–324]. Объектом исследований в рамках настоящей работы являлись образцы каменного угля марки Г Кузнецкого бассейна, отобранные из Болдыревского пласта в очистном забое шахты им. С.М. Кирова на глубине 220 м. В табл. 4.1 представлены усредненные результаты экспериментального определения следующих физико-механических свойств указанного угля в ненагруженном состоянии: плотности ρ ; скорости распространения продольных V_P и поперечных V_S упругих волн; статического E и динамического E_d модулей упругости; статического μ и динамического μ_d коэффициентов Пуассона; предела прочности при сжатии σ_c ; общей пористости Π и коэффициента крепости по М.М. Протодьяконову f .

Таблица 4.1 – Основные физико-механические свойства угля марки Г
Болдыревского пласта шахты им. С.М. Кирова

ρ , кг/м ³	V_P , м/с	V_S , м/с	E , ГПа	E_d , ГПа	μ	μ_d	σ_c , МПа	Π , %	f
1400	2310	1400	6,0	6,7	0,20	0,21	15,1	3,5	1,5

Для проведения испытаний было использовано 25 образцов цилиндрической формы диаметром 50 мм и высотой 100 мм с плоскопараллельными торцевыми поверхностями. Известно, что получение таких образцов представляет собой серьезную проблему из-за неоднородности, относительно низкой прочности, разномасштабной поврежденности и слоистости угля. В связи с этим применительно к конкретному исследуемому типу угля были предварительно опробованы различные рассмотренные в [321] технологии изготовления образцов. Установлено, что технология, предполагающая высокоскоростное резание исходного куска угля вдоль слоистости с помощью алмазного дискового инструмента, обеспечивает минимум привнесенной нарушенности и изменений физико-механических свойств. При этом изготовление образца осуществляют в три этапа. На первом и втором из них получают резанием четырехгранную а затем восьмигранную призмы соответственно. На третьем этапе ступенчатым шлифованием доводят призматический образец до цилиндрической формы заданных размеров с достаточно ровными и параллельными торцевыми поверхностями.

Первая серия испытаний проводилась с целью установления влияния одноосного нагружения на информативные параметры принятого сигнала. Группа из 5 однотипных образцов подвергалась одноосному нагружению вплоть до разрушения с помощью прессового оборудования INSTRON 300DX с максимальным усилием сжатия до 300 кН. Одновременно с нагружением велось измерение скорости V_P распространения продольных

упругих волн и амплитуды A_P первого вступления принятого импульсного сигнала с помощью низкочастотного УЗ дефектоскопа УД2Н-ПМ на рабочей частоте пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) 200 кГц. Прозвучивание каждого из образцов осуществлялось как вдоль его оси (совпадающей с направлением механического нагружения и слоистости), так и в перпендикулярном направлении. При этом в первом случае излучающий и приемный ПЭП размещались в металлических стаканах, через которые нагрузка передавалась на образец, а во втором – на диаметрально противоположных сторонах образца в центральном его сечении [322]. Примеры характерных зависимостей V_P и A_P от осевой нагрузки σ (в долях от предела прочности σ_c) приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

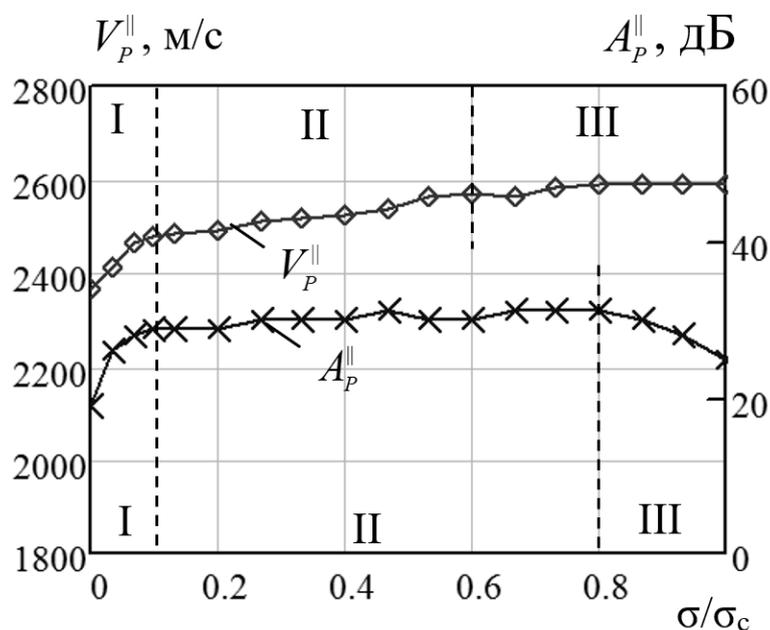


Рисунок 4.1 – Зависимости V_P и A_P от осевой нагрузки σ при прозвучивания образца угля вдоль слоистости

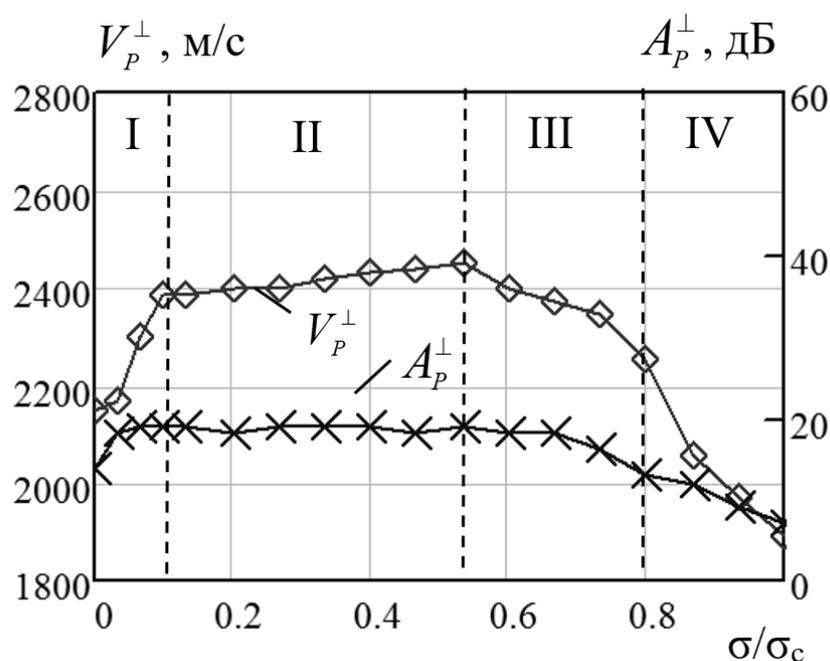


Рисунок 4.2 – Зависимости V_p и A_p от осевой нагрузки σ при прозвучивания образца угля ортогонально слоистости

В дополнение к описанным выше исследованиям было проведено одноосное нагружение призматического образца угля с основанием 40*40 мм и высотой 80 мм с одновременной фотофиксацией боковой грани на различных стадиях нагружения, результаты которой приведены на рисунке 4.3.

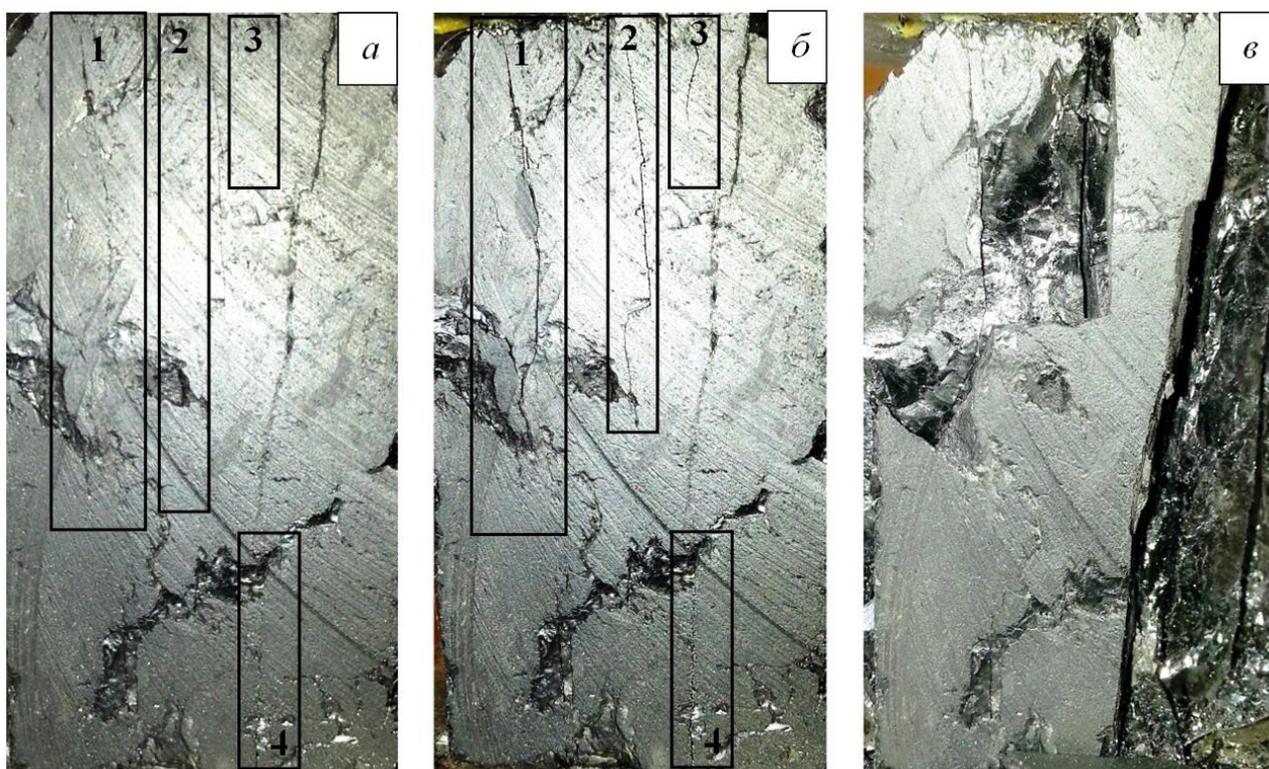


Рисунок 4.3 – Фотофиксация поверхности образца угля при осевой нагрузке $0.6\sigma_c$ (а), $0.8\sigma_c$ (б), $1.0\sigma_c$ (в) (прямоугольниками выделено образование новых и рост существующих трещин)

Вторая серия испытаний проводилась с целью установления влияния сложного напряженного состояния на скорость распространения продольной волны и амплитудные характеристики сигнала.

Трехосное неравнокомпонентное нагружение по схеме Кармана производилось на установке УДС 65/80, позволяющей проводить испытания при осевом напряжении до 80 МПа и боковом напряжении до 50 МПа. Как и при одноосном нагружении, давление на образец передавалось через стальные стаканы, в которых были размещены ПЭП.

Всего было испытано 20 образцов, разбитых на 4 группы. Образцы каждой из групп подвергались одинаковому первоначальному гидростатическому боковому обжатию σ_2 до уровней 2, 4.5, 7.5 и 10 МПа соответственно. Все образцы доводились до разрушения. Полученные в процессе описанных испытаний характерные зависимости величин V_p и A_p представлены на рисунках 4.4 и 4.5.

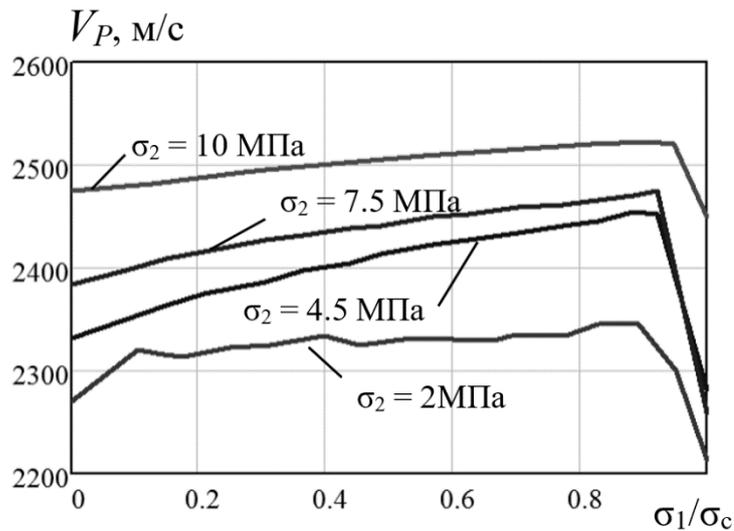


Рисунок 4.4 – Зависимость V_P от осевой нагрузки σ_1 при различных значениях σ_2

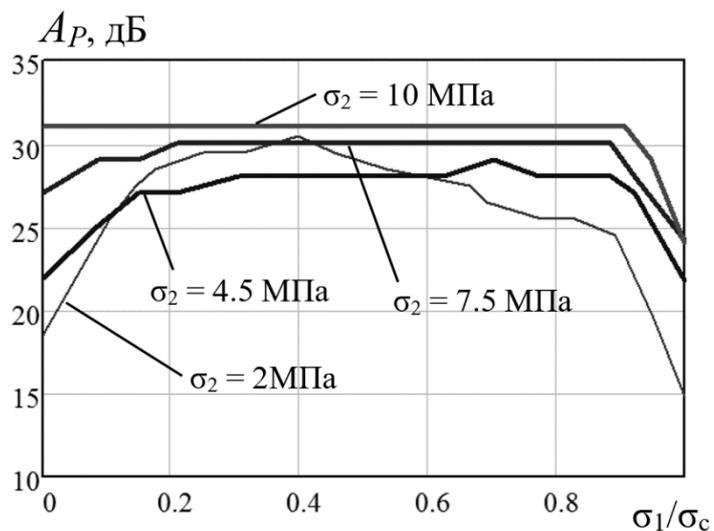


Рисунок 4.5 – Зависимость A_P от осевой нагрузки σ_1 при различных значениях σ_2

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунке 4.1, свидетельствует, что изменения величин V_P^{\parallel} и A_P^{\parallel} с различной чувствительностью отражают структурные изменения в образце при его одноосном нагружении. На первой стадии деформирования (I) до уровня $0,1\sigma_c$ происходит наиболее резкое и нелинейное изменение V_P^{\parallel} и A_P^{\parallel} , что связано с закрытием существующих микротрещин и пустот вдоль волнового

измерительного канала. При этом значение V_p^{\parallel} изменяется примерно на 5%, а значение A_p^{\parallel} - примерно на 10 дБ.

На второй стадии деформирования (II) происходит уплотнение геоматериала, что приводит к относительно линейным изменениям V_p^{\parallel} и A_p^{\parallel} . Причем верхняя граница указанной стадии по измерениям V_p^{\parallel} составляет $0.6\sigma_c$, а по измерениям A_p^{\parallel} - $0.8\sigma_c$. Начиная от $0.6\sigma_{сж}$, с увеличением σ изменения V_p^{\parallel} практически прекращаются, т.е. достигается стадия максимального уплотнения. В конце этой стадии при $\sigma \approx \sigma_c$ происходит настолько быстрое разуплотнение геоматериала, а затем и его разрушение, что зафиксировать происходящее при этом падение скорости V_p^{\parallel} , учитывая ее малую информативность, практически не удастся. Указанное разуплотнение, которое начинается при $0.8\sigma_c$, четко фиксируется по уменьшению A_p^{\parallel} и свидетельствует о начале процессов дезинтеграции образца на третьей стадии нагружения (III), что может служить предвестником приближающегося разрушения.

При прозвучивании образца угля (рисунок 4.2), т.е. в направлении ортогональном слоистости и направлению механического нагружения на всех стадиях деформирования выполняются соотношения $V_p^{\perp} < V_p^{\parallel}$ и $A_p^{\perp} < A_p^{\parallel}$. Такой результат представляется достаточно очевидным, если учесть чувствительность параметров V_p и A_p к ориентации возникающих при нагружении трещин. Указанная высокая чувствительность позволяет выделить четыре стадии деформирования образца. Первые две стадии соответствуют первичному закрытию существующих трещин и уплотнению образца и совпадают со стадиями, выделяемыми при прозвучивании вдоль слоистости. На III стадии происходит образование новых и рост существующих микротрещин, что приводит к снижению как V_p^{\perp} , так и A_p^{\perp} . Четвертая стадия характеризуется резким падением обоих информативных параметров на фоне слияния микротрещин в макронарушения. Важно

отметить, что трещинообразование в образце происходит преимущественно вдоль направления нагружения и слоистости, что, в частности, подтверждается фотографиями на рисунке 4.3. При этом, как показано теоретически и экспериментально в [164] параметр V_P обладает максимальной чувствительностью к трещинам, ортогональным направлению распространения продольных волн, что обуславливает низкую информативность прозвучивания вдоль слоев и, одновременно с этим, высокую информативность прозвучивания в направлении, ортогональном слоистости.

Анализ представленных на рисунках 4.4 и 4.5 результатов изменений V_P и A_P в образцах каменного угля при их трехосном осесимметричном нагружении свидетельствует о следующем. Увеличение бокового давления σ_2 препятствует процессам дезинтеграции образцов и снижает возможность выявления их стадий деформирования. Так, если при $\sigma_2 = 2$ МПа, по зависимости $V_P = f(\sigma_1/\sigma_c)$ выделяются три упомянутые выше стадии деформирования, то уже начиная с $\sigma_2 \geq 4.5$ МПа только две: постепенного уплотнения образца и соответствующего увеличения V_P , а также разрушения, при котором знак производной V_P резко меняется на противоположный. Причем следует отметить, что с увеличением σ_2 , начиная со значения 4.5 МПа, изменения V_P на стадии уплотнения становятся все более линейными.

Аналогичные закономерности наблюдаются и при анализе зависимостей $A_P = f(\sigma_1/\sigma_c)$, представленных на рисунке 4.5. При малых значениях σ_2 удается выделить четыре стадии деформирования: быстрое нарастание A_P вплоть до уровня $0.2\sigma_c$; плавный рост A_P на фоне консолидации образца до $0.4\sigma_c$, начало разрушения образца с плавным спадом A_P до $0.9\sigma_c$ и последующее разрушение, сопровождающееся резким уменьшением амплитуды зондирующего УЗ сигнала. Однако при росте σ_2 информация о стадиях деформирования теряется, позволяя выделить лишь две при $\sigma_2 = 10$ МПа.

4.2 Экспериментальное исследование влияния трещин на напряженно-деформированное состояние пород с использованием ультразвуковой интерферометрии

Элементы теории акустоупругости широко используются для контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) пород, при этом чаще всего на образцах в лабораторных условиях [323,324]. В этом случае направление прозвучивания, как правило, совпадает с направлением приложения механического нагружения. Для получения информации о напряженно-деформированном состоянии массива *in-situ* применяются акустические методы в вариантах межскважинного прозвучивания и каротажа [325]. В качестве зондирующих сигналов традиционно используют ультразвуковые (УЗ) импульсы, а в качестве информативного параметра — скорость V_p распространения продольных упругих волн в прискважинной области массива [326–328]. В [320] показано, что рост механических напряжений приводит к росту скоростей продольных волн на упругой и упруго-пластичной стадиях деформирования. Однако, подобные результаты получены на ненарушенных образцах относительно пластичных каменных углей путем сквозного прозвучивания (оси акустических преобразователей совпадают с направлением приложения давления). Особенностью проведения каротажных измерений является невозможность соосного расположения акустических преобразователей. К тому же в большинстве случаев измерительные скважины не заполнены водой, поэтому для передачи энергии УЗ колебаний в исследуемую среду применяется сухой акустический контакт с использованием пневматических прижимающих устройств. Такой контакт обладает низкой повторяемостью и препятствует использованию более информативных параметров контроля, таких как амплитуды первых вступлений [320,329] и спектральные характеристики сигналов [330,331]. Повысить надежность и повторяемость контактных условий могло бы опережающее лазерное сканирование стенок скважины [332], однако

необходимое оборудование только находится в разработке. Кроме того при каротаже реального массива на пути прозвучивания могут встречаться различные неоднородности, в том числе трещины, оказывающие существенное влияние на параметры УЗ сигналов в различных условиях НДС [333–335]. Таким образом, повышение эффективности ультразвукового каротажа для контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива лежит в совершенствовании принципов использования кинематических характеристик акустических сигналов, а также в учете влияния естественных неоднородностей массива.

Одним из перспективных направлений повышения чувствительности кинематических характеристик УЗ сигналов к изменениям НДС пород является применение принципов обработки сигналов, основанных 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 и иллюстрируется рисунком 4.6. При этом в коде волны содержится больше информации о различных неоднородностях, возникающих в исследуемой среде, чем в «головной» части сигнала.

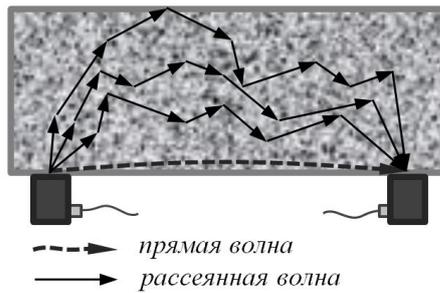


Рисунок 4.6 – Распространение упругих волн в гетерогенной среде

Для изучения коды ультразвуковых колебаний на данный момент применяется специальный комплекс методических приемов, называемый интерферометрией на кодах волн (*coda wave interferometry*, CWI). Суть подхода заключается в следующем. На фиксированной базе производится прозвучивание участка объекта исследования, при этом записанная волновая форма S_0 несет информацию об исходном состоянии среды. Повторное прозвучивание производят после механического или температурного воздействия, при этом регистрируется волновая форма S_1 . Взаимосвязь между двумя волновыми формами может быть описана выражением [336]

$$S_1(t) = S_0(t(1 + \theta) + n(t)), \quad (4.1)$$

где θ – параметр растяжения волновой формы, $n(t)$ – шумовая компонента. В случае $\theta \ll 1$ влиянием шумовой компоненты можно пренебречь.

Параметр θ (также известный как «относительное изменение скорости» [337]) фактически описывает отношение между временем первого вступления продольных волн t_0 в ненарушенном состоянии и аналогичным параметром t_1 для среды с дефектами

$$\theta = \frac{t_0 - t_1}{t_0} = \frac{dt}{t_0}. \quad (4.2)$$

С учетом взаимоотношений скоростей V и времени t распространения УЗ колебаний при фиксированной базе распространения l параметр θ также можно записать в виде

$$\theta = \frac{l/V_0 - l/v_1}{l/V_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \approx \frac{\Delta V}{V_{cp}}, \quad (4.3)$$

где V_0 и V_1 – скорости распространения УЗ колебаний до и после возникновения дефекта, $V_{cp} = (V_0 + V_1)/2$ [336].

Суть применения CWI сводится к совместной обработке сигналов, полученных до и после воздействия. На рисунке 4.7 представлен пример волновых форм сигналов, зарегистрированных на образце железистого кварцита, подвергаемого одноосному нагружению.

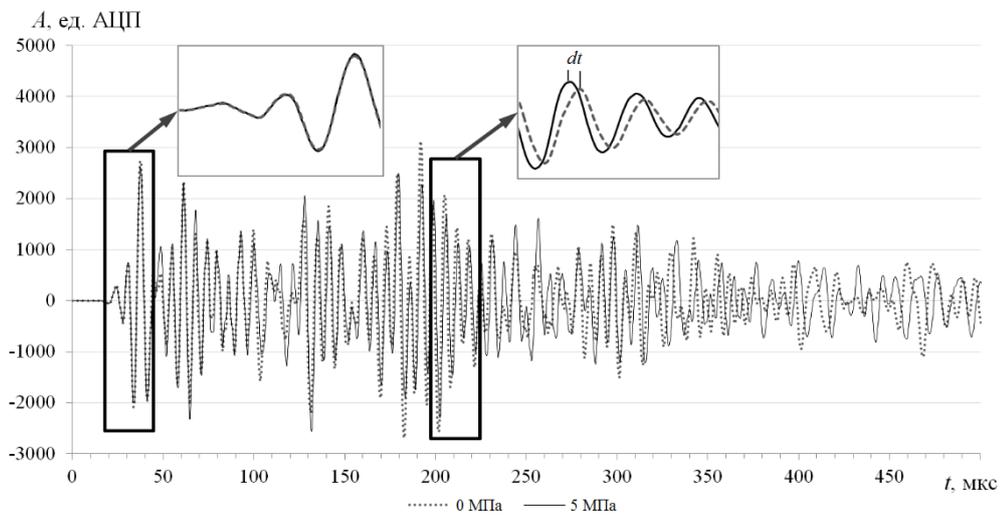


Рисунок 4.7 – Волновые формы зарегистрированных на образце железистого кварцита импульсов при уровнях осевой нагрузки 0 и 5 МПа

Из рисунка 4.7 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

$$CC(\theta) = \frac{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} S_1[t(1 + \theta)] S_0(t) dt}{\sqrt{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} S_1^2[t(1 + \theta)] dt \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} S_0^2(t) dt}}, \quad (4.4)$$

где 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. При реализации CWI используется два методических приема определения dt – дублетная техника (*doublet technique*, DT) [338–340] и техника растягивания волновой формы (*stretching technique*, ST) [341,342]. В методе DT выбирают несколько малых временных окон, находят временную задержку Δt для каждого временного окна, а затем принимают среднее значение этих временных задержек за истинное значение dt . Очевидно, что выбор нескольких дискретных окон для вычисления лага задержки не обеспечивает достаточно высокого временного разрешения, поэтому в последнее время большее распространение получил метод ST. В данном случае в расчете участвуют не отдельные части сигнала, а волновая форма целиком. При этом один сигнал плавно растягивается относительно другого за счет интерполяции. Для этого для волновой формы, зарегистрированной с

фиксированным интервалом дискретизации Δt , задают новый интервал дискретизации $\Delta t^* = \Delta t - dt$. В точках Δt_i^* определяют значения амплитуды сигнала A_i^* с применением линейной интерполяции в соответствии с

$$A_i^* = A_i + \frac{(A_{i+1} - A_i) \cdot (\Delta t_i^* - t_i)}{(t_{i+1} - t_i)}. \quad (4.5)$$

В полученной волновой форме интервал дискретизации Δt^* приравнивают к исходному интервалу дискретизации Δt , что приводит к растяжению волновой формы вдоль оси t , как это показано на рисунке 4.8.

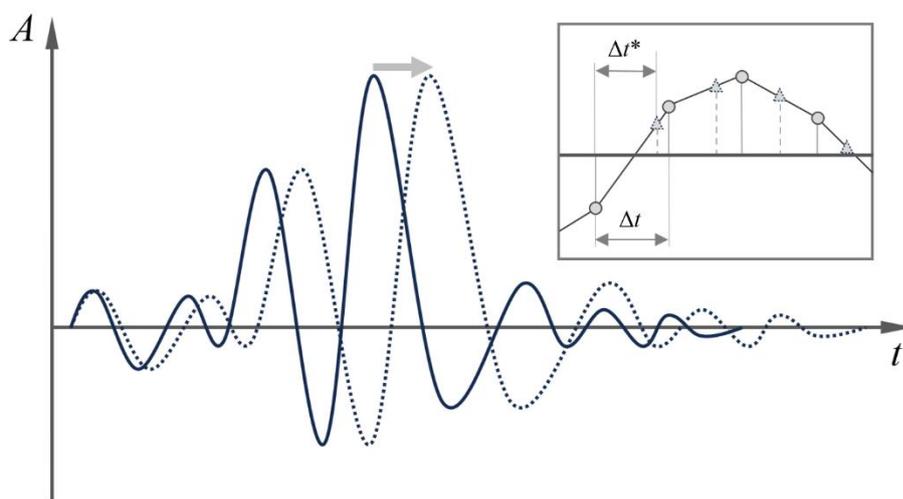


Рисунок 4.8 – Растяжение волновой формы за счет интерполяции

При достаточной дискретизации сигнала (10 и более отсчетов на период) вполне допустимо использовать кусочно-линейную интерполяцию. По сравнению с DT метод ST обладает более высокой точностью, а также более обоснован с физической точки зрения, т.к. предполагает линейный рост смещения сигналов с увеличением времени распространения упругих волн.

С целью установления особенностей применения CWI на образцах пород различных генотипов по действием одноосного нагружения, а также оценка влияния трещин в образцах на результаты ультразвукового прозвучивания был проведен ряд лабораторных исследований [343].

В исследовании участвовали три группы образцов горных пород различных генотипов: группа «ЖК», представленная образцами железистого кварцита КМА, группа «Д», представленная доломитами Данковского месторождения и группа «Г», представленная образцами гранита Мансуровского месторождения. Для каждой группы было подготовлено по 5 образцов в виде прямоугольных параллелепипедов со сторонами 40×40×80 мм. Усредненные по группам физико-механические свойства образцов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Свойства пород

Группа	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	V_p , м/с	П, %
«ЖК»	3300	220	4700	1.4
«Д»	2280	100	3340	14.1
«Г»	2640	126	3845	5.2

ρ – плотность; $\sigma_{сж}$ – прочность на одноосное сжатие; $K_{п}$ – коэффициент пористости

Лабораторные исследования производились на лабораторном стенде, состоящем из электромеханического прессы ГТ 2.0.8-2 для одноосного нагружения образцов, а также комплекса для ультразвуковых измерений, состоящего из генератора УЗ импульсов, двух преобразователей с центральной частотой 200 кГц, предусилителя ПАЭФ-014 и аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Прозвучивание производилось с боковой поверхности образца, тем самым эмитировался процесс каротажных измерений в необводненной скважине. Схема лабораторного стенда представлена на рисунке 4.9.

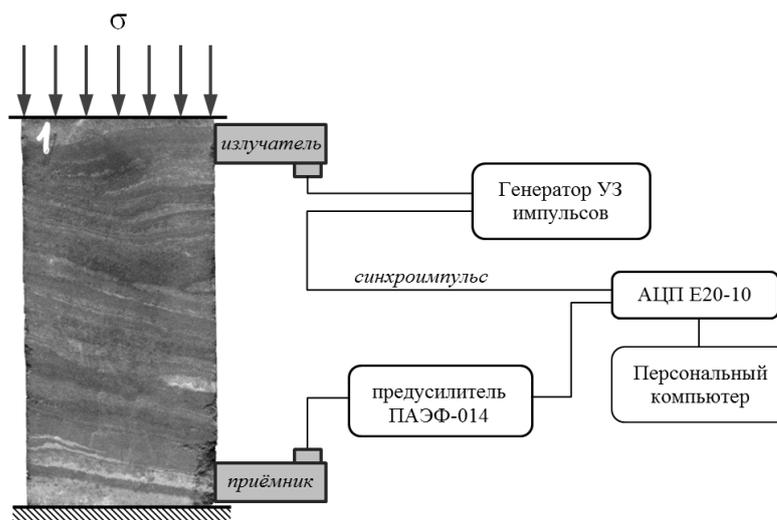


Рисунок 4.9 – Схема лабораторного стенда

Породы испытывались по трехэтапной схеме. На первом этапе образец подвергался одноосному нагружению с линейной скоростью 0,1 МПа/с. Одновременно с нагрузкой регистрировались волновые формы длительностью 4096 отсчетов с шагом 1 с. Таким образом, в результате испытания одного образца формировался массив из 200 волновых форм. После завершения первого этапа образец раскалывался по трехточечной схеме на две половины в рамках второго этапа нагружения. На третьем этапе испытаний половины составлялись, и образец с сформированной горизонтальной трещиной повторно испытывался по описанному выше алгоритму. Общий вид образцов до и после раскола представлен на рисунке 4.10.

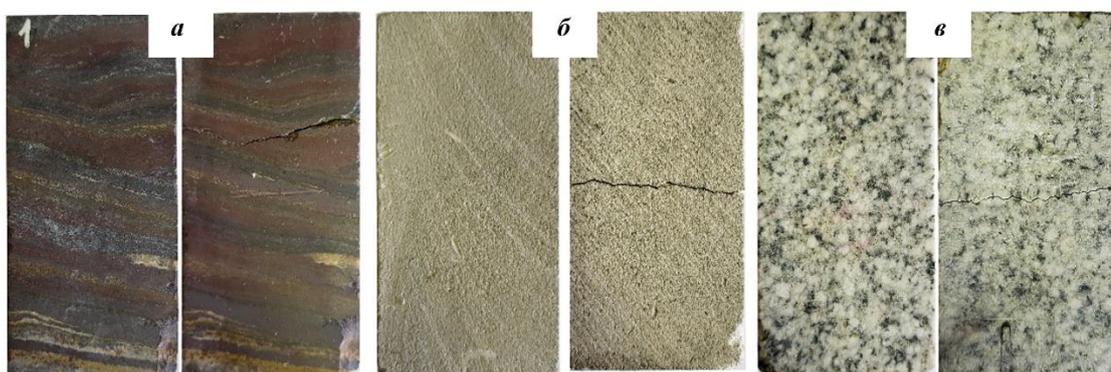


Рисунок 4.10 – Примеры поверхностей образцов группы «ЖК» (а), «Д» (б) и «Г» (в) до и после раскола по трехточечной схеме

Первым этапом обработки стало определение времен первого вступления продольной волны t_p и расчет на их основе скоростей продольных волн V_p . Усредненные по группам значения скоростей продольных волн в функции от осевого давления для образцов до и после образования трещины представлены на рисунке 4.11.

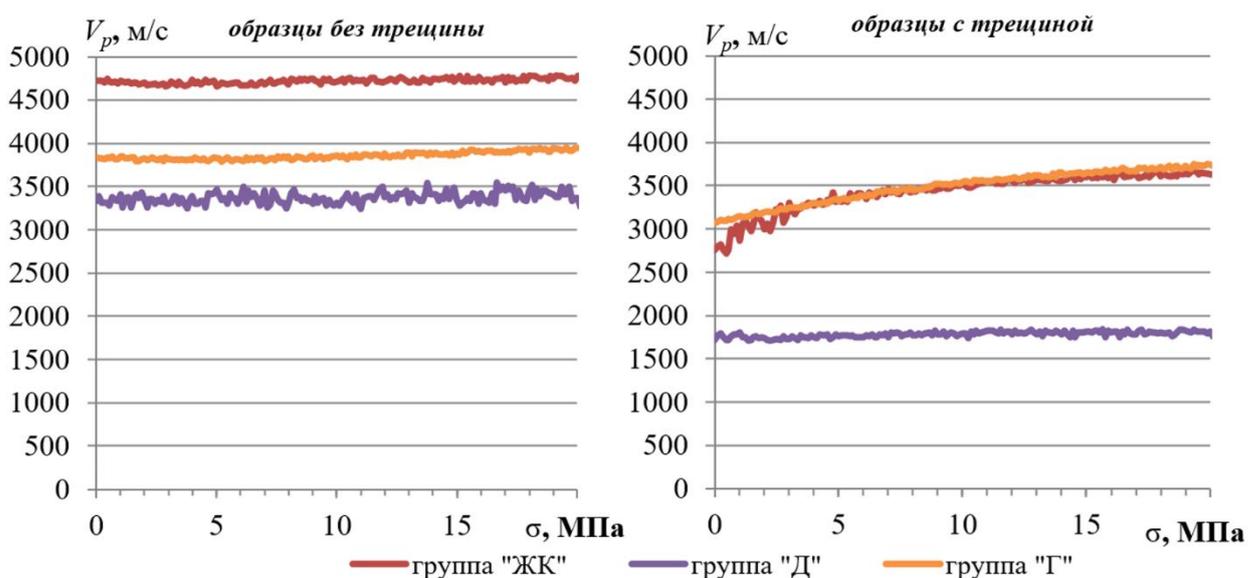


Рисунок 4.11 – Значения V_p в образцах при увеличении осевого давления до (а) и после образования трещины (б)

Из рисунка 4.11а 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 (рисунок 4.11б). Рост осевого давления очевидным образом повышает V_p за счет сближения берегов трещины, при этом приращения скорости оказываются различными для пород разного генезиса. На диапазоне $0 \div 20$ 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 доломита 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.

В дополнение к скоростям первого вступления была произведена оценка эффективной ширины спектра $\Delta\omega_{эф}$:

$$\Delta\omega_{эф} = \frac{1}{F_{max} \int_0^{+\infty} F(\omega)} \quad (4.6)$$

где $F(\omega)$ – амплитудный спектр сигнала, F_{max} – амплитуда спектрального максимума. Результаты расчета $\Delta\omega_{эф}$ представлены на рисунке 4.12.

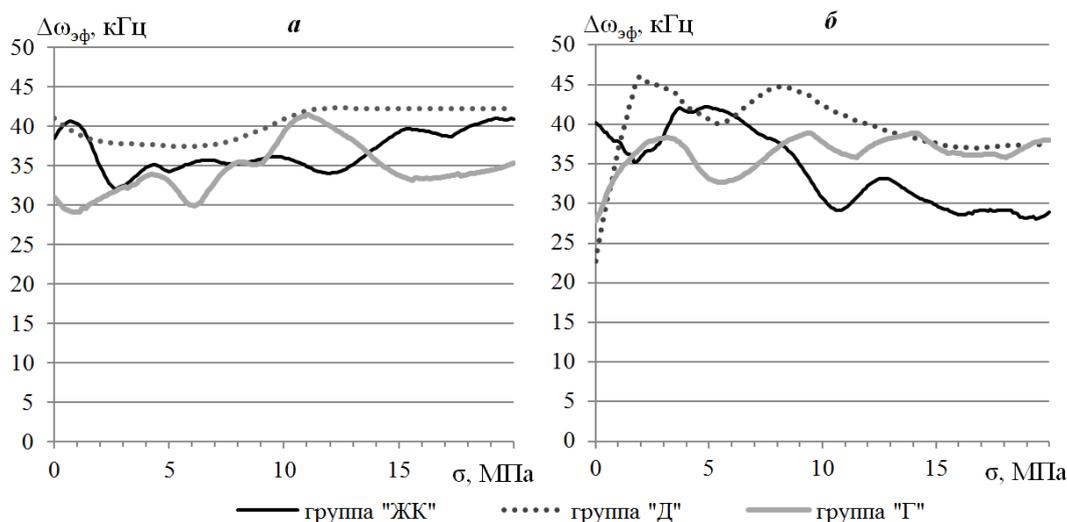


Рисунок 4.12. Результаты расчета эффективной ширины спектра до (а) и после (б) образования трещины

Для всех исследованных пород значения $\Delta\omega_{эф}$ колеблются в пределах 30 – 45 кГц. В образцах групп «Д» и «Г», содержащих трещины (рисунок 4.12а), наблюдается увеличение ширины спектра сигнала на фоне смыкания берегов трещины в диапазоне осевого давления до 4 МПа. В целом показатель $\Delta\omega_{эф}$

нельзя считать информативным из-за значительного разброса значений (усредненное значение коэффициента вариации составляет 8,4%).

Следующим этапом обработки являлась реализация алгоритма CWI. Для вычисления значений dt использовался ранее описанный метод ST.

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 рассеянных 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 рисунке 4.13.

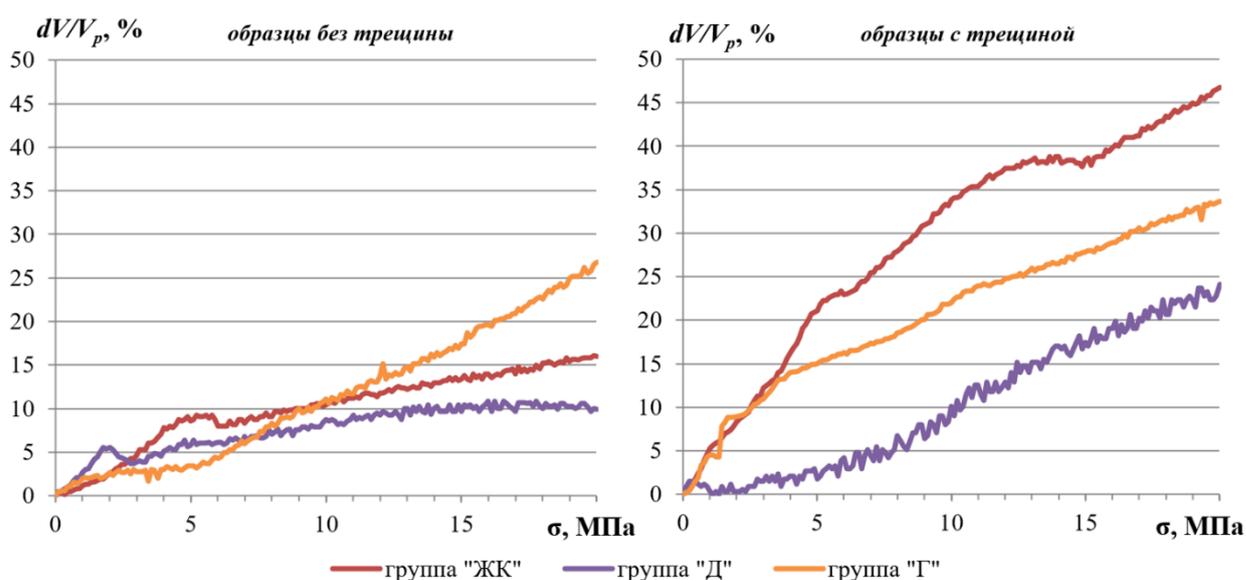


Рисунок 4.13 – Результаты расчета значений dV/V_p методом CWI для образцов до (а) и после образования трещины (б)

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. 4.13а 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 [25]. 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 подходит 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 по методике, описанной в настоящей работе. 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. Метод также может дополнять результаты разработанного ранее метода структурной диагностики пород кровли на основе корреляционного прозвучивания [344]. К основным достоинствам метода также можно отнести отсутствие необходимости прибегать к использованию динамических информативных характеристик сигналов, которые правомерно применять только при условии гарантированной повторяемости контактных условий «преобразователь-порода». Несмотря на различные подходы к минимизации негативного влияния последних [345], полностью нивелировать влияние «сухого» акустического контакта как правило не удастся.

4.3 Аппаратурное и методическое обеспечение проведения ультразвукового контроля НДС в приконтурном массиве пород

4.3.1. Модульный ультразвуковой каротажный комплекс

Для проведения ультразвуковых измерений в измерительных скважинах был разработан специализированный каротажный комплекс [346], внешний вид которого представлен на рисунке 4.14.

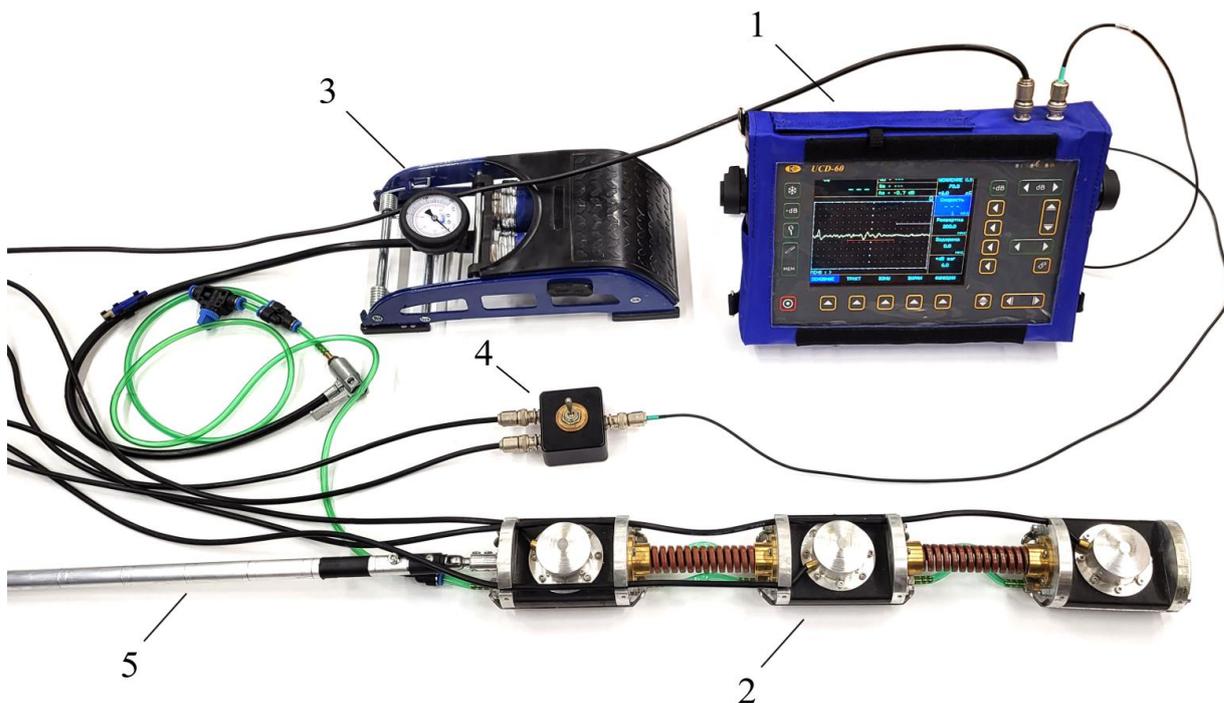


Рисунок 4.14 – Ультразвуковой каротажный комплекс: 1 – Низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н; 2 – модульный ультразвуковой зонд; 3 – насос системы пневмоприжима; 4 – коммутирующее устройство; 5 – сборные досыльные штанги

Основу каротажного комплекса составляет специально разработанный модульный скважинный ультразвуковой зонд. Каждый из трех модулей является автономной единицей и состоит из корпуса, сменного пьезоэлектрического преобразователя и системы прижима преобразователей на основе технологии пневматических искусственных мышц [347,348], исключающей возможность заклинивания зонда в скважине после сброса давления в системе. Соединение модулей происходит с помощью сменных акустических развязок, изменение длины которых позволяет регулировать базу прозвучивания.

Генерация зондирующего импульса и регистрация УЗ колебаний производится с помощью низкочастотного ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н, позволяющего регистрировать весь спектр информативных параметров УЗ контроля, а также производить запись полных волновых форм

для их последующей обработки на компьютере. Основные технические характеристики разработанного каротажного комплекса приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Основные технические характеристики модульного каротажного комплекса

Характеристика	Значение
Глубина зондирования, м	< 15
Диаметр скважины, мм	76
Резонансная частота пьезопреобразователей, кГц	80
Количество УЗ модулей	3
База прозвучивания между соседними УЗ модулями, мм	200
Амплитуда зондирующего импульса, В	200
Рабочее давление системы прижима, атм.	3
Скорость УЗК, м/с	от 100 до 10 000
Максимальная длина контролируемого материала (сталь)	до 18 000 мм (эхо-режим), 36 000 мм (теневой режим)
Задержка, мкс	от 0 до 5900
Задержка в призме	0 - 1000 мкс с шагом 0,01 / 0,1/ 1 и 10мкс
Частота повторений ЗИ, Гц	15 или 30
Усилитель широкополосный	0.02-2,5 МГц (-6 дБ) с регулируемыми полосовыми фильтрами
Время работы, ч	6-8
Аккумулятор	Li-ion 8 А/ч

Модульная конструкция зонда позволяет адаптировать его для решения различных задач в разнообразных геотехнических условиях. Например, при измерениях на скальных малотрещиноватых породах можно использовать более высокочастотный преобразователи и большие базы прозвучивания. При переходе к более нарушенным породам (например, к изучению каменного угля при его добыче подземным способом) из-за возросшего затухания можно заменить преобразователи на более низкочастотные, одновременно с этим

сократив базу прозвучивания. Кроме того, автономность модулей позволяет использовать их в качестве отдельных зондов для осуществления межскважинного прозвучивания.

4.3.2 Способ контроля вертикальной компоненты напряжений в кровле горной выработки с использованием ультразвуковой интерферометрии

Результаты экспериментальных исследований, а также разработанное аппаратное обеспечение проведения каротажных измерений позволяют сформулировать новый способ контроля вертикальных напряжений в кровле горных выработок, отличающийся высокой степенью надежности и возможностью учета магистральных трещин, пересекающих ось измерительной скважины.

Реализация предлагаемого способа производится в три этапа – подготовительный, лабораторный и полевой.

Подготовительные операции заключаются в бурении вертикальной скважины $d = 76$ мм в кровле горной выработки буровым инструментом в соответствии на глубину, превышающую мощность непосредственной кровли. При этом из скважины извлекается керн и производится его упаковка и документация в соответствии с ГОСТ 12071-2014 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов». Отдельно в журнал заносятся координаты горизонтальных трещин естественного происхождения, пересекающих колонну керна.

В лабораторных условиях производится исследование изменения акустических свойств монолитных образцов в функции от величины осевого давления. Из извлеченного керна изготавливают цилиндрический образец, который размещают в прессе, снабжая акустическими преобразователями, подключенными к низкочастотному дефектоскопу. Ступенчато нагружают образец до разрушения, при этом на каждой ступени нагружения регистрируют полную волновую форму ультразвуковых колебаний с

сохранением в отдельный файл. Рекомендуемая величина ступени – не более 1 МПа.

Также в лабораторных условиях производится исследование изменения акустических свойств образцов, содержащих магистральную горизонтальную трещину в функции от величины осевого давления. В извлеченном керне выбирают участок, содержащий единичную магистральную трещину, ортогональную оси керна. Из этого участка изготавливают цилиндрический образец так, чтобы трещина располагалась на равных расстояниях от торцов образца. Размещают образец в прессе и закрепляют на нем акустические преобразователи, подключенные к низкочастотному дефектоскопу. Ступенчато нагружают образец до разрушения, при этом на каждой ступени нагружения регистрируют полную волновую форму

В полевых условиях собирают ультразвуковой каротажный комплекс, состоящий из каротажного зонда и дефектоскопа и производят измерения в следующей последовательности:

С помощью досылочных штанг размещают зонд на требуемой глубине в скважине так, чтобы горизонтальная трещина (выявленная на этапе исследования керна), располагалась между центральным излучающим преобразователем и одним из приемных, как это показано на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Схема расположения каротажного зонда в скважине

Точную глубину расположения зонда и номер (идентификатор) скважины фиксируют в журнале наблюдений. С помощью устройства пневматического прижима обеспечивают надежный контакт акустических преобразователей с массивом пород. Производят регистрацию волновых форм сигналов, распространяющихся от излучающего преобразователя к первому и второму приёмному преобразователю, и сохраняют полученные записи в отдельные файлы. Повторяют скважинные измерения через равные промежутки времени. Длительность указанных промежутков определяется технологическими параметрами эксплуатации контролируемой выработки и определяет временной шаг мониторинга.

Основным этапом обработки является вычисление приращений времени dt в коде волны в процессе изменения НДС горной породы с применением метода CWI, для этого:

- 1) зарегистрированные волновые формы экспортируются на жесткий диск персонального компьютера;
- 2) волновая форма, зарегистрированная на нулевой ступени при нагрузке 0 МПа, принимается за эталонную;
- 3) волновая форма, зарегистрированная на первой ступени, подвергается растягиванию по алгоритму ST, при этом на каждой ступени растяжения вычисляется значение СС с использованием выражения (4.4);
- 4) из всего массива вычисленных значений СС выбирают максимальное значение, а лаг τ , при котором наблюдается это максимальное значение, принимают за значение dt_1 (где нижний индекс означает номер ступени нагружения);
- 5) повторяют вычисления п. 1–4 для волновых форм остальных ступеней нагружения формируя массив $dt_i(\sigma)$, где σ – абсолютное значение осевого механического напряжения;

Пункты 1–5 вычислений повторяют и для образца, содержащего магистральную трещину. Таким образом формируется две зависимости $dt_i(\sigma)$ для монолитного образца и образца, содержащего трещину, пример которых приведен на рисунке 4.15.

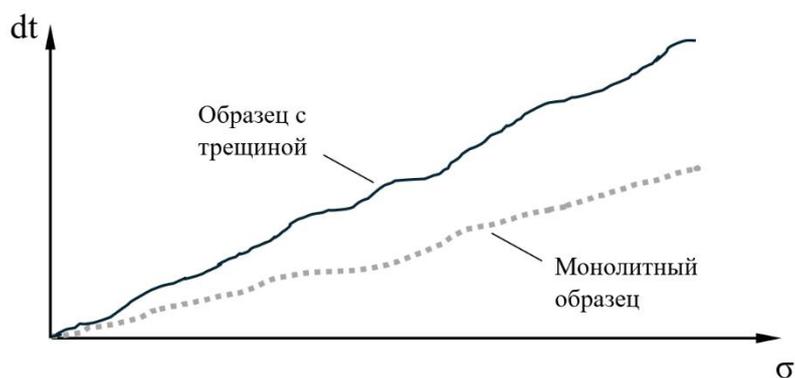


Рисунок 4.15 – Пример зависимостей $dt_i(\sigma)$ для монолитного образца и образца, содержащего трещину

Обработка результатов скважинных измерений также производится в описанной выше последовательности, однако при этом формируются

массивы значений $dt_i(n)$ для участка пород, содержащих трещину, и монолитного участка пород (n – номер цикла мониторинга).

Вычисление абсолютных значений приращений вертикальной компоненты напряжений в кровле горной выработки производится на основе сопоставления зависимостей $dt_i(\sigma)$, полученных в рамках лабораторного этапа, и $dt_i(n)$, полученных при каротажных измерениях в скважине, и иллюстрируется рисунком 4.16.

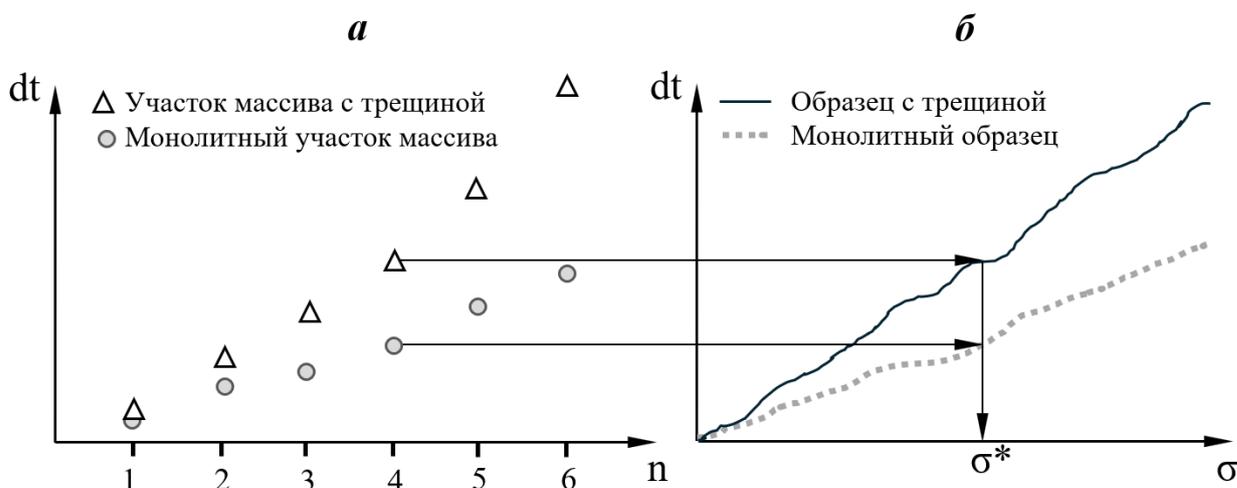


Рисунок 4.16 – Сопоставление зависимостей $dt_i(n)$ (а) и $dt_i(\sigma)$ (б)

Для каждого цикла мониторинговых измерений n определяют точное значение dt для монолитного участка пород и участка, содержащего трещину. Пользуясь полученной ранее тарировочной зависимостью $dt_i(\sigma)$, измеренные значения dt переводят в значения σ^* , которые и принимаются за абсолютные значения приращений напряжений вдоль оси скважины на указанном цикле мониторинга по сравнению с начальными значениями, зафиксированными в нулевой цикл. Использование двух пар зависимостей $dt_i(n) - dt_i(\sigma)$ (для монолитного и трещиноватого участков) повышает надежность определения значений σ^* . В случае, если в точке измерений трещины отсутствуют, то для определения σ^* используют только одну пару зависимостей $dt_i(n) - dt_i(\sigma)$, получаемую на монолитных образцах и монолитном участке пород вблизи

измерительной скважины. В этом случае измерения на образце, содержащем магистральную трещину, не производятся.

Выводы к главе 4

Повышение эффективности применения УЗ инструментов для изучения параметров напряженно-деформированного состояния горных пород лежит как в области учета уникальных особенностей строения таких сильно анизотропных пород как каменные угли, так и в области применения нестандартных методов прозвучивания и обработки результатов, в частности применения приемов интерферометрии.

Проведенное экспериментальное исследование влияния различных режимов одноосного и трехосного нагружения образцов каменного угля на кинематические и динамические параметры импульсного ультразвукового сигнала позволяют оценить их информативность при выявлении различных стадий деформирования. Показано влияние на указанную информативность ориентации акустического измерительного канала относительно направлений одноосного механического нагружения и слоистой структуры образца. Установлено, что увеличение величины статической осесимметричной боковой нагрузки на образец уменьшает степень его дезинтеграции под влиянием осевого механического нагружения и, как следствие, не позволяет выявлять все основные стадии деформирования угля с использованием акустических информативных параметров контроля.

При механических испытаниях образцов железистого кварцита, доломита и гранита было показано, что одноосное нагружение ненарушенных образцов до уровня $\sigma = 20$ МПа не приводит к существенному изменению времен первого вступления продольных волн при боковом прозвучивании. Заметное изменение значений V_p происходит только в присутствии горизонтальной магистральной трещины в породах относительно высокой твердости. Существенного изменения ширины спектра акустических колебаний с ростом осевого давления также не наблюдается.

В результате обработки сигналов с применением алгоритма интерферометрии на кодах волн было установлено, что рост одноосного нагружения приводит к практически линейному росту приращений скорости многократно рассеянных волн даже в ненарушенных образцах. В образцах с магистральной трещиной изменение скоростей рассеянных волн оказывается еще более значительным, в том числе превышающим изменение V_p . Таким образом, применение алгоритма интерферометрии на кодах волн позволяет, используя исключительно кинематические характеристики ультразвуковых сигналов, производить оценку изменения НДС приконтурного массива. Полученные данные легли в основу совершенствования методов акустического каротажа приконтурного массива пород в случаях, когда использование динамических и спектральных критериев невозможно из-за использования сухого контакта на границе «преобразователь-порода». Предложен новый способ контроля вертикальных напряжений в кровле горных выработок и разработан модульный каротажный комплекс для его реализации.

Глава 5. Исследование акустических эффектов в горных породах в условиях термобарического нагружения для повышения надежности контроля НДС массива

5.1. Лабораторная установка для термобарических и ультразвуковых исследований на образцах горных пород

В настоящее время исследование акустических свойств пород под одновременным воздействием высоких давлений и температур производится на установках, описанных в [239,349–351]. Как правило, они достаточно сложны, характеризуются значительными габаритами, относительно высокими акустическими помехами, инерционностью термического воздействия и влиянием такого воздействия не только на сам исследуемый образец, но и на элементы, обеспечивающие механическое нагружение, а также элементы электроакустического измерительного тракта. В связи с этим в рамках настоящей работы предлагается описание принципов построения и технических характеристик установки для УЗ измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий, которая во многом лишена указанных недостатков [352]. Последнее достигается за счёт использования для термического воздействия на образец термоэлектрических преобразователей (ТЭП) на основе эффекта Пельтье, сущность которого заключается в выделении или поглощении тепла в местах контактов (спаях) разнородных проводников и полупроводников при протекании через образуемую ими цепь постоянного тока [353]. Указанные ТЭП имеют сравнительно небольшие габариты и инерционность, возможность работы на нагревание и охлаждение образцов, не создают акустических шумов. Их главные недостатки – низкий КПД и относительно большая потребляемая мощность для рассматриваемой установки принципиального значения не имеют.

Разработанная установка, внешний вид которой представлен на рисунке 5.1, состоит из трех блоков: блока нагрева, предназначенного для термического нагружения и поддержания заданной температуры исследуемого образца, блока одноосного механического нагружения образца и блока УЗ измерений в нём.

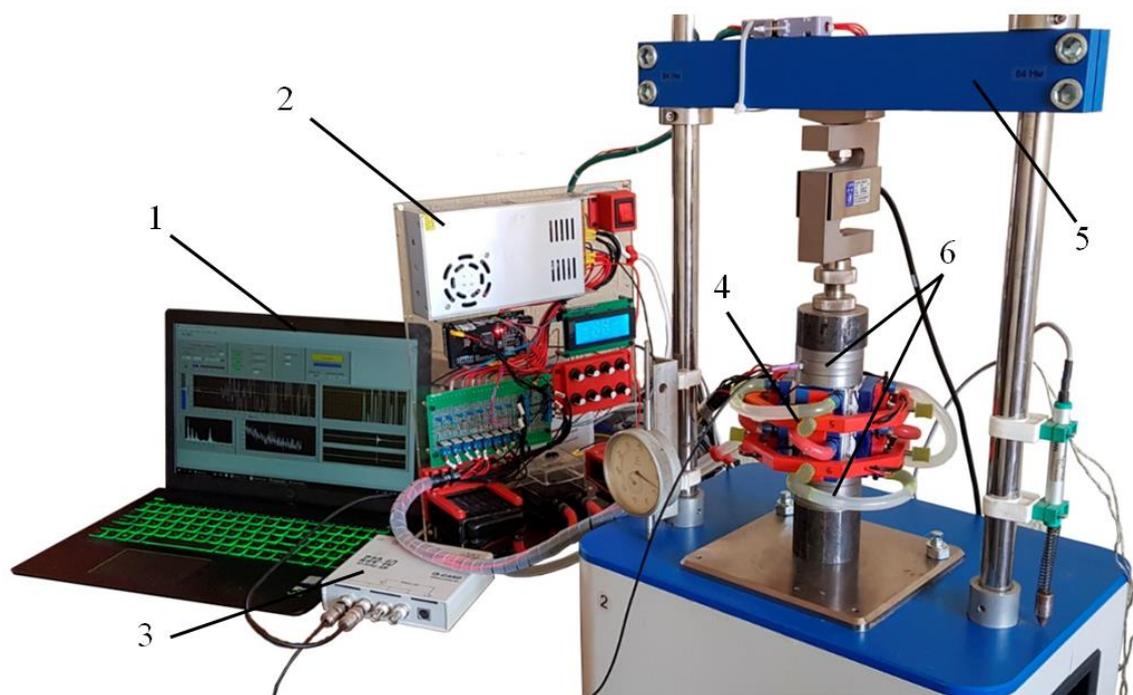


Рисунок 5.1 – Лабораторная установка: 1 – управляющий компьютер; 2 – электронный блок управления нагревом; 3 – АЦП; 4 – блок нагрева образца; 5 – устройство одноосного нагружения; 6 – акустические преобразователи

Термический блок, функциональная схема которого приведена на рисунке 5.2, состоит из двух несвязанных контуров – контура электронного управления температурой и контура водяного теплообмена с окружающей средой.

Основными элементами первого контура являются восемь полупроводниковых термоэлектрических преобразователей (ТЭП), работающих на основе эффекта Пельтье. Мощность каждого достигает 60 Вт при напряжении питания 12 В. Управление каждым ТЭП осуществляется индивидуально посредством низкочастотных широтно-импульсно модулированных сигналов, задаваемых микроконтроллером. При этом для

передачи сигналов большой мощности используется блок из полевых транзисторов. Для контроля температуры ТЭП под каждым из них в алюминиевом протекторе закреплен термистор, входящий в цепь делителя напряжения. Переменное и зависящее от температуры напряжение с выхода делителя измеряется встроенными в микроконтроллер 10-bit вольтметрами. Измеренное напряжение конвертируется в температуру на основе тарировочных зависимостей. Таким образом, происходит замыкание петли обратной связи в контуре и обеспечивается возможность поддержания заданной температуры.

Одной из особенностей использования ТЭП на основе эффекта Пельтье является то, что при подаче на него разности потенциалов на его противоположных сторонах образуется разность температур. При этом для работы ТЭП крайне важно обеспечивать для противоположной от «рабочей» стороны ТЭП эффективный теплообмен с окружающей средой. На практике для этого, как правило, используют пассивные и активные системы воздушного охлаждения. В рамках создания лабораторного стенда ставилась задача сделать блок температурного нагружения образца как можно компактнее, поэтому была сконструирована система активного водно-воздушного охлаждения, состоящая из восьми водяных радиаторов (по одному для каждого из ТЭП), соединенных в единую систему с электрической помпой и двумя высокопроизводительными кулерами. Таким образом, вне зависимости от режима работы установки (нагрева или охлаждения) без изменения ее конструкции происходит эффективный теплообмен с окружающей средой и повышается КПД ТЭП.

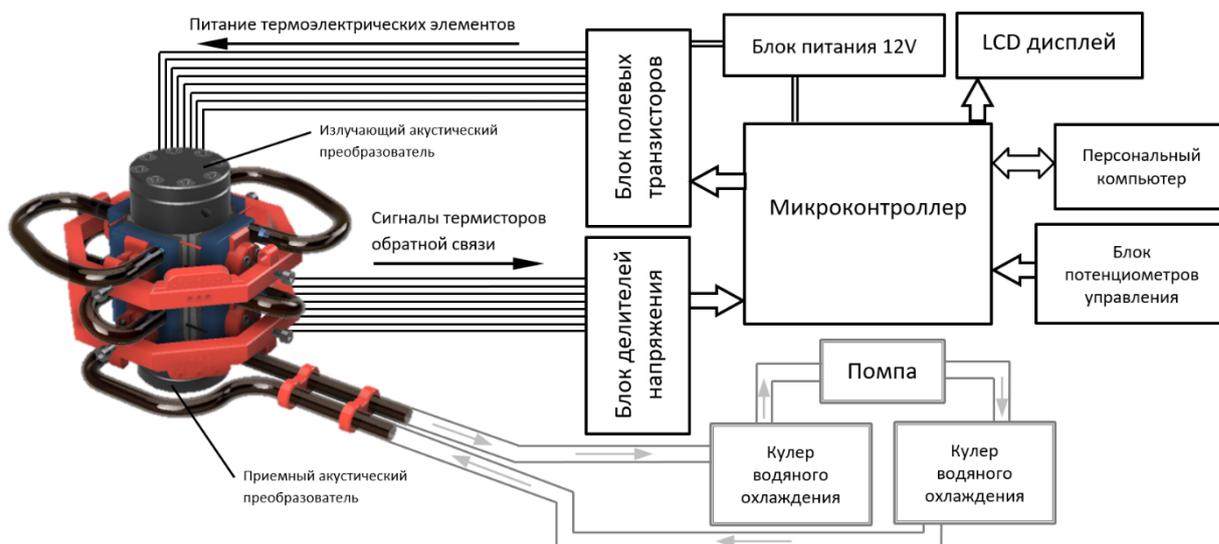


Рисунок 5.2 – Функциональная схема термического блока

В качестве блока механического нагружения потенциально может быть использовано любое подходящее прессовое оборудование. В данном случае был использован малогабаритный пресс ГТ 2.0.8-2.

Блок УЗ измерений позволяет получать значения измеряемых информативных параметров контроля и фиксировать их изменения в процессе термобарических испытаний образцов. Он состоит из генератора возбуждающих импульсов (ГВИ), пары специально сконструированных силопередающих акустических преобразователей, позволяющих работать в режиме продольных и поперечных волн [354,355], аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации до 10 МГц и персонального компьютера. Принципиальная схема блока представлена на рисунке 5.3.

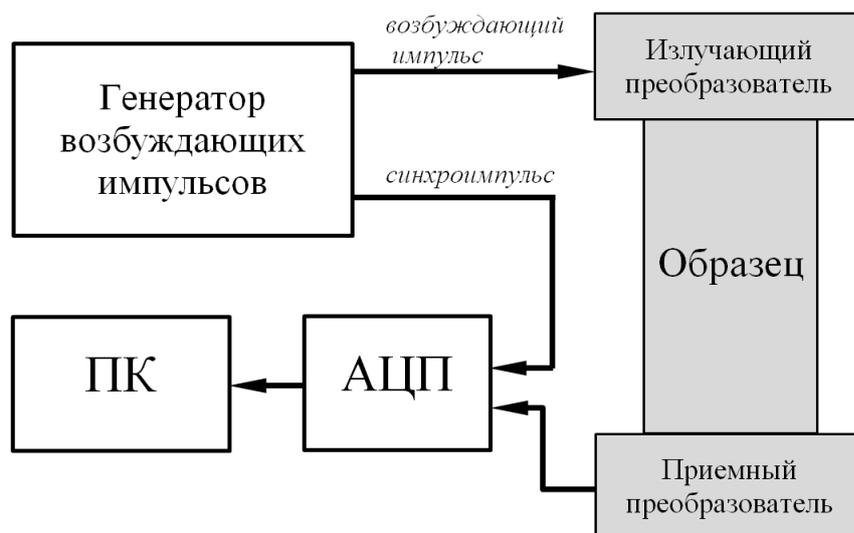


Рисунок 5.3 – Функциональная схема блока ультразвуковых измерений

Принцип работы блока следующий. ГВИ генерирует электрический сигнал в виде меандра с максимальной амплитудой до 300В, который подается на излучающий преобразователь и одновременно на вход АЦП, выполняя роль синхроимпульса. Выходная цепь приемного преобразователя также подключена к входу АЦП, что позволяет по разности прихода синхроимпульса и первого вступления принятого акустического сигнала определять время распространения продольной волны с точностью до 0,2 мкс. Выделение первого вступления производится в автоматизированном режиме. После фильтрации шумов по пороговому принципу, определяется положение первого максимума зарегистрированного сигнала. Для получения времени первого вступления от этой величины отнимается 1/4 длительности первого периода. На рисунке 5.4 представлены пример регистрируемой волновой формы УЗ сигнала и его нормированный спектр. Соотношение сигнал/шум при выделении первого вступления составляет не менее 4 к 1.

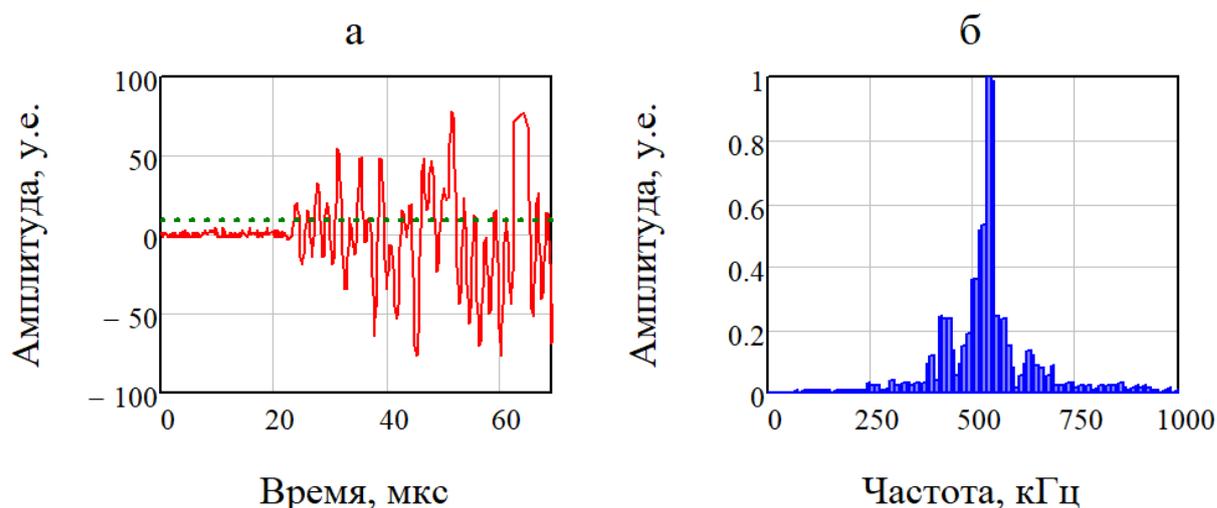


Рис. 5.4 – Волновая форма (а) и нормированный спектр (б) регистрируемого ультразвукового сигнала (пунктиром показан пороговый уровень фильтрации шумов)

Помимо определения времени распространения УЗ сигнала (а значит и его скорости на известной базе) блок реализует возможность сохранения полных волновых форм зарегистрированных импульсов для их дальнейшей спектральной, корреляционной и др. обработки.

Основные технические характеристики установки представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Основные технические характеристики установки

Характеристика	Значение
Диапазон температур	-15°C ... +130°C
Скорость нагрева	до 20 град./с.
Скорость охлаждения	до 5 град./с.
Максимальное усилие пресса	до 50 кН
Точность определения времени первого вступления продольной волны	$\pm 0,2$ мкс
Длина записи одной волновой формы	до 4096 отсчетов (820 мкс)
Разрядность АЦП	14 бит

5.2. Методические аспекты установления влияния температуры на скорости распространения ультразвуковых колебаний в образцах

Зависимость $V_p = f(\sigma, T)$ является функцией двух переменных и ее определение возможно с использованием двух подходов [356].

Первый подход заключается в установлении фиксированного значения $T = T_0$ и последовательном увеличении σ до заданного уровня с одновременной регистрацией V_p . Таким образом устанавливается зависимость $V_p(\sigma)$ при T_0 . Далее температуру образца поднимают до $T = T_1$ и процедуру определения $V_p(\sigma)$ повторяют. При достижении $T = T_i$ формируется матрица значений V_p при всех возможных значениях T и σ . Описанный подход характеризуется высокой производительностью измерений – время на нагрев образца тратится только при переходе от T_i к T_{i+1} . Однако при этом проявляется и существенный недостаток – образец подвергается циклическому механическому нагружению. Даже при условии работы в линейной зоне диаграммы деформирования возможно накопление микродефектов и изменение механических свойств образца, что может исказить зависимость $V_p = f(\sigma, T)$.

Другой подход заключается в измерении $V_p(T)$ при фиксированных дискретных значениях σ . Ему не свойственен указанный выше недостаток (увеличение нагрузки происходит нециклично), однако на первый план выходит вопрос производительности измерений, связанный с инерциальностью нагрева образца.

При реализации второго подхода важным аспектом является выявление момента достижения термического равновесия в образце, т.е. момента, когда температуры в центре и на поверхности равны. До достижения этого момента производить измерения акустических характеристик исследуемого материала нельзя. Для определения температуры в центре образца можно воспользоваться прямым методом – разместить термопарный датчик температуры в просверленном в образце глухом отверстии. При этом

нарушается целостность образца, а отверстие начинает выступать в качестве концентратора механических напряжений.

В разработанной установке используется косвенный метод оценки термического равновесия между центром и поверхностью образца. Он заключается в следующем. В процессе нагрева производится прозвучивание образца импульсными УЗ сигналами. При этом в режиме реального времени вычисляется скорость распространения продольных волн. Для этого в преобразованном в цифровую форму сигнале по пороговому принципу удаляется шумовая компонента. После этого вычисляется время перехода первой полуволны через нулевую отметку t_0 . Затем определяется положение максимума первого вступления t_{\max} . Таким образом время первого вступления t_p определяется из выражения $t_p = t_{\max} - t_0$. Дальнейшее вычисление времени распространения УЗ импульса между излучающим и приемным преобразователями сводится к вычислению временного интервала между приходом на АЦП синхроимпульса и определенным ранее значением t_p . Переход к скорости продольных волн осуществляется с учетом базы прозвучивания. На рисунке 5.5 представлены зарегистрированные в процессе нагрева временные зависимости температуры нагрева поверхности образца известняка T (данные получены с термисторов обратной связи) и скорости продольных волн V_p . Из рисунка видно, что нагрев поверхности достигает максимума значительно раньше выполаживания зависимости $V_p(t)$. Дальнейшее снижение скорости после достижения постоянной температуры на поверхности очевидно связано с постепенным распространением тепла к центру образца и, как следствие, интегральным изменением его упругих характеристик. Таким образом можно косвенно оценить время распространения теплового потока от краев к центру образца. На примере, представленном на рисунке 5.5, оно составляет примерно 280 с. Следует отметить, что регистрировать истинные значения V_p можно только с момента времени $t_{\text{изм}} = 350$ с., когда скорость перестает изменяться.

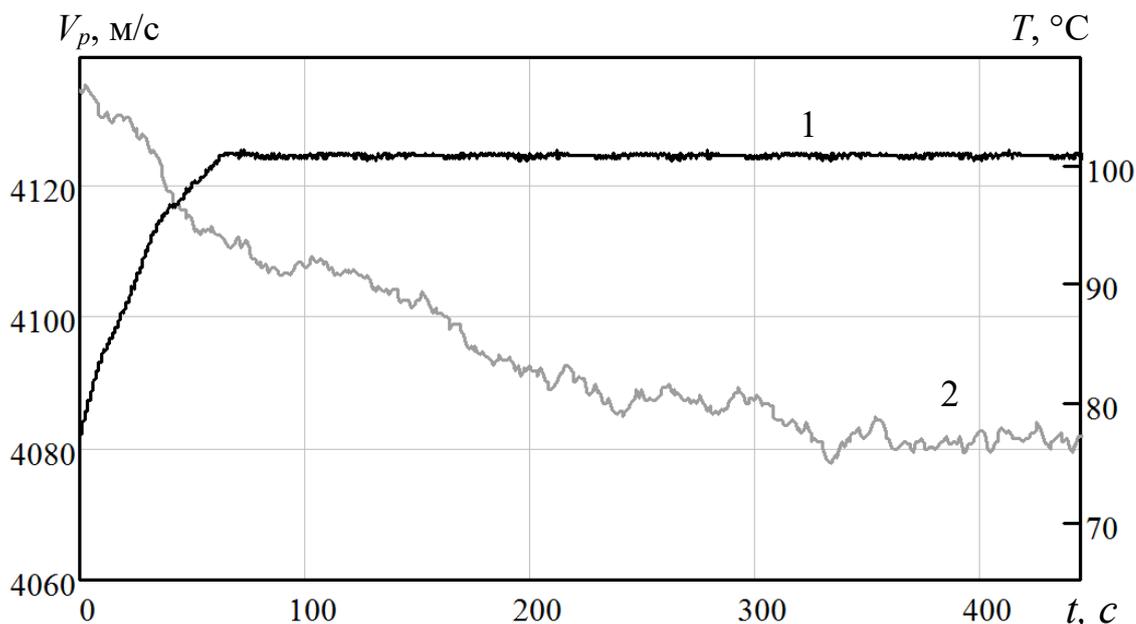


Рисунок 5.5 – Зависимости $T(t)$ (1), $V_p(t)$ (2)

Более детально вопрос косвенной оценки времени достижения термического равновесия по зависимостям $V_p(t)$ был рассмотрен с применением компьютерного моделирования методом конечных элементов в системе Comsol Multiphysics.

Модель решалась двумерной постановке. Образец породы представлялся в виде пластины шириной 42мм и высотой 82мм. Отличительной особенностью компьютерной модели было наличие приемного и излучающего преобразователей, закрепленных на торцах образца породы. Указанные преобразователи находятся в массивных стальных корпусах, выдерживающих, при необходимости, высокие давления. Но с термодинамической точки зрения такие преобразователи являются радиаторами, на которых рассеивается часть тепла, передаваемого образцу нагревательными элементами лабораторного стенда.

Задача решалась для разных типов пород. При моделировании учитывались объемный вес породы ρ , теплопроводность λ , удельная

теплоемкость c . Основные характеристики используемых в модели материалов представлены в таблице 5.2 [357].

Таблица 5.2 – Основные характеристики материалов модели

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)
Плотный известняк	2260	2.56	920
Мрамор	2700	1.28	420
Ракушечник	1400	0.46	836
Гипс	2350	1.16	1470
Сталь (корпуса преобразователей)	7800	55	460

Расчет производился для 1000 секунд с шагом 1 секунда. При этом в качестве начальных условий задавалась начальная температура образца и преобразователей $T_{init} = 20^\circ\text{C}$. В качестве граничных условий задавалась температура на боковых гранях образца, равная 100°C . На свободных гранях акустических преобразователей задавалось условие излучения температуры в окружающую среду (конвекционное охлаждение не учитывалось). Схема компьютерной модели и пример разбиения на сетку конечных элементов представлен на рисунке 5.6.

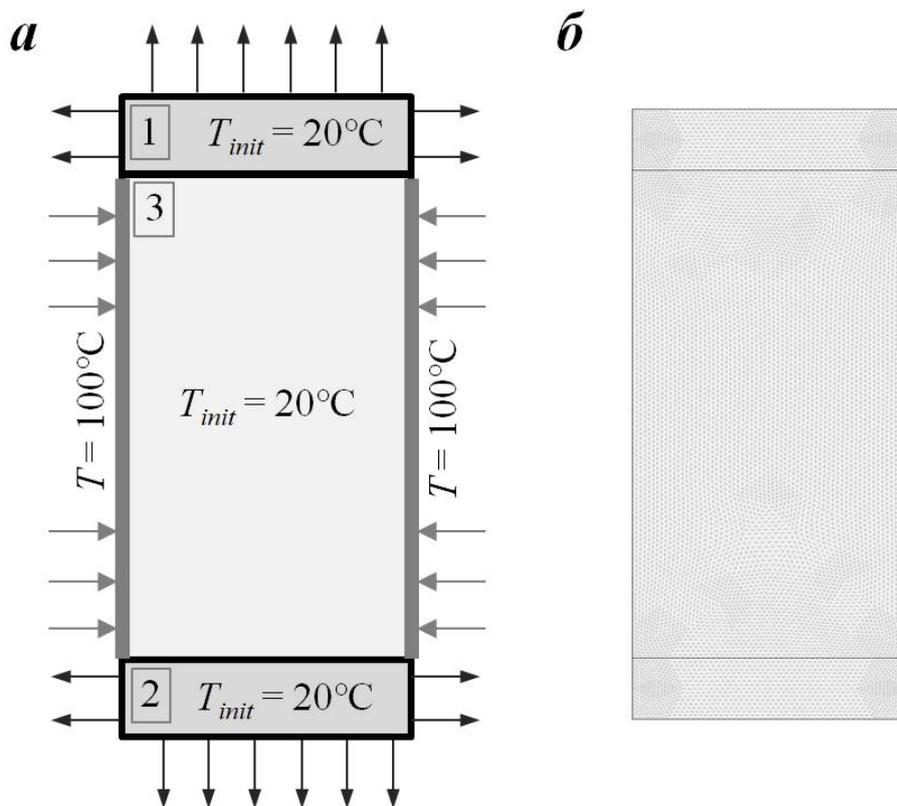


Рисунок 5.6 – Общая схема компьютерной модели с граничными и начальными условиями (а) и модель, разбитая на сетку конечных элементов (б) (1,2 – акустические преобразователи, 3 – образец горной породы)

На рисунке 5.7 представлены значения температуры для центральной зоны образца, полученные в результате компьютерного моделирования. Также на зависимости $T(t)$ наложена реальная зависимость $V_p(t)$, полученная в результате нагрева тестового образца известняка.

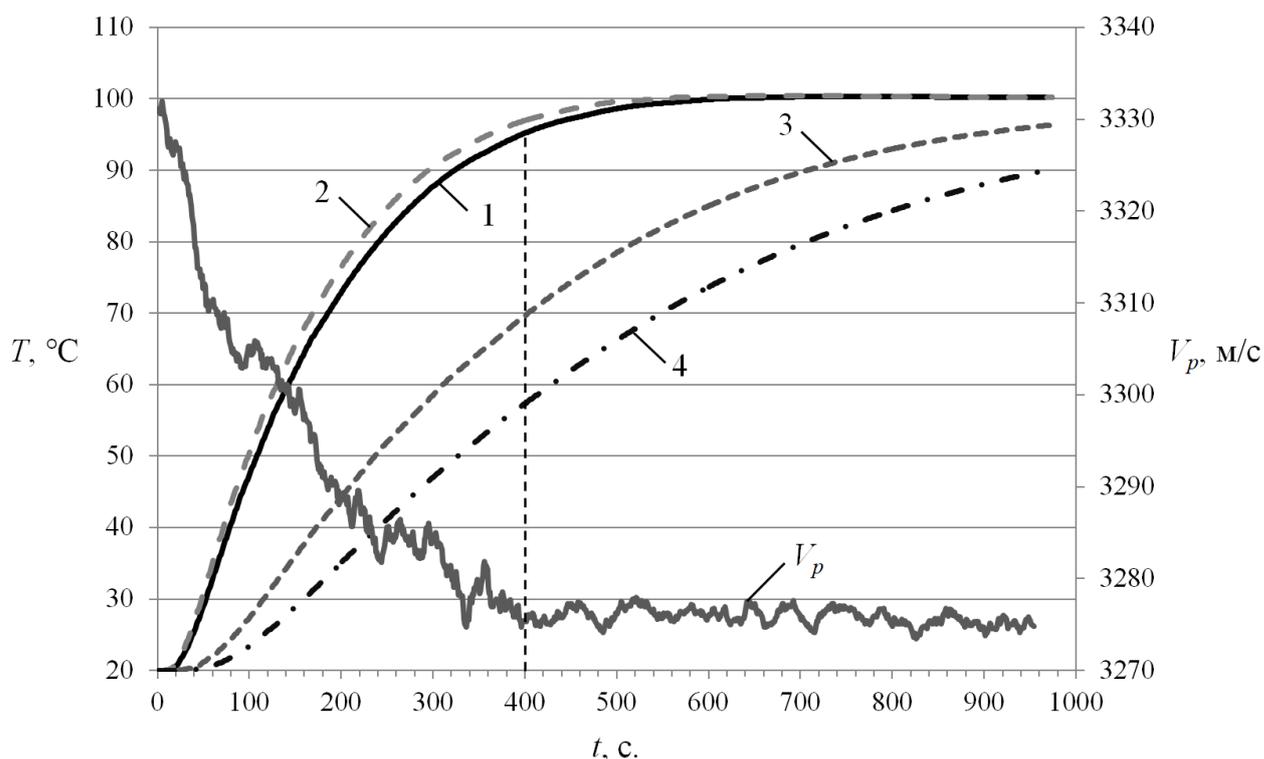


Рисунок 5.7 – Расчетные зависимости $T(t)$ для разных типов пород и определенная экспериментально зависимость $V_p(t)$ для образца известняка группы А (1 – плотный известняк, 2 – мрамор, 3 – ракушечник, 4 - гипс)

Из рисунка 5.7 видно, что формы зависимостей $T(t)$ для плотного известняка и $V_p(t)$ для известняка группы А условно совпадают. При этом выполаживание графика $V_p(t)$ начинается на 150–200 секунд раньше расчётного графика $T(t)$, что соответствует температуре 95°C. Таким образом, метод оценки степени полного прогрева образца по анализу экспериментальной зависимости $V_p(t)$ можно считать работоспособным при уровне абсолютной погрешности $\pm 5^\circ\text{C}$. Для достижения более надежных результатов следует продолжать нагрев образца дополнительно 150–200 секунд после выполаживания зависимости $V_p(t)$.

Отдельного внимания заслуживает форма представления полученных зависимостей $V_p = f(\sigma, T)$. Наиболее подходящими для подобной функции можно считать формы представления в виде семейств кривых (рисунки 5.8a и 5.8b), в виде трехмерной поверхности (рисунок 5.8c) или карты изолинии (рисунок 5.8d).

Представление в виде семейства кривых возможно без дополнительной обработки сразу после реализации первого (рисунок 5.8*a*) или второго (рисунок 5.8*b*) из описанных ранее подходов. Переход к трехмерным поверхностям возможен с применением различных типов интерполяции. Для установления общего тренда зависимости $V_p = f(\sigma, T)$ наиболее подходящей будет интерполяция, основанная на полиномиальной регрессии. Для более детального анализа $V_p = f(\sigma, T)$ следует применять более сложные интерполяторы, например модифицированный метод Шепарда [358] или криггинг [359].

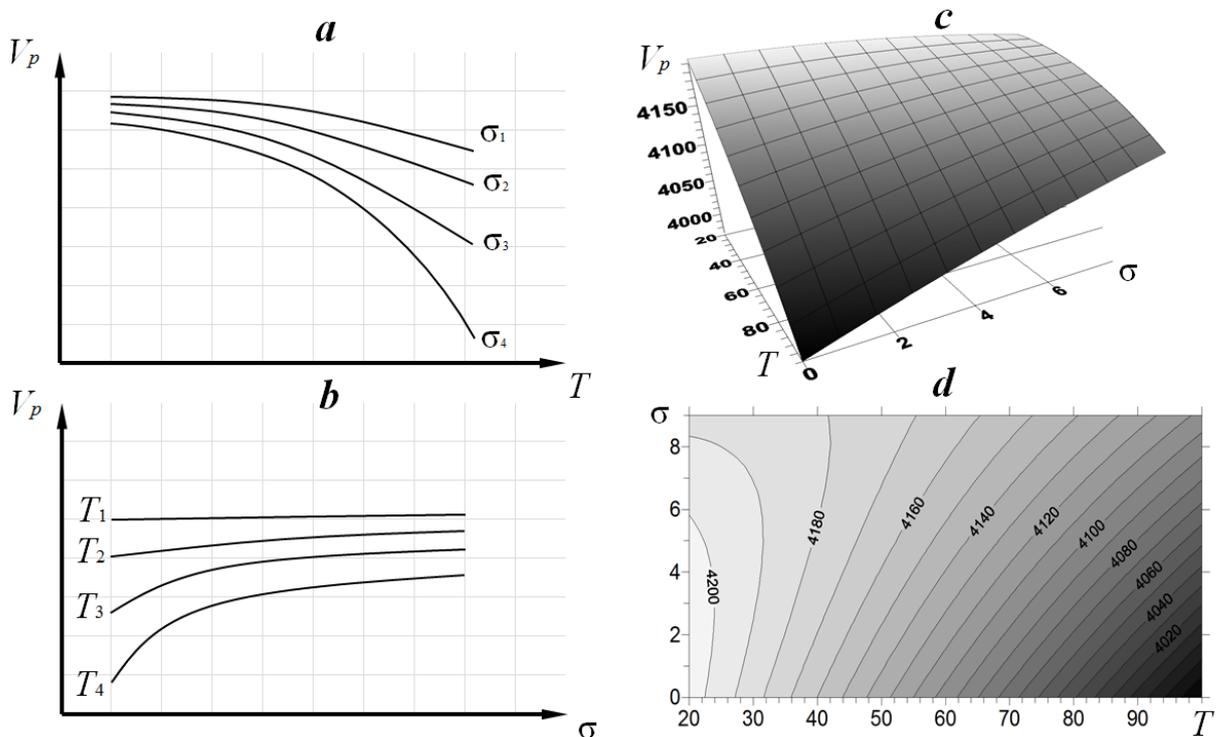


Рисунок 5.8 – Представление зависимостей $V_p = f(\sigma, T)$ в виде отдельных кривых на плоскости $V_p(T)$ (a), на плоскости $V_p(\sigma)$ (b), в виде трехмерной поверхности (c) и карты изолиний (d).

Как было сказано ранее, установление зависимостей $V_p = f(\sigma, T)$ служит основой для оценки НДС массива по измеренным фактическим значениям V_p и T . В общем случае оценка значений σ производится следующим образом.

На статистически обоснованной выборке образцов, отобранных из массива в зоне проведения измерений, в лабораторных условиях получают матрицу значений V_p при различных σ и T . Далее с помощью аппроксимации получают зависимость $V_p = f(\sigma, T)$ для данного типа пород и представляют ее в виде трехмерной поверхности. Пример получаемой поверхности приведен на рисунке 5.9.

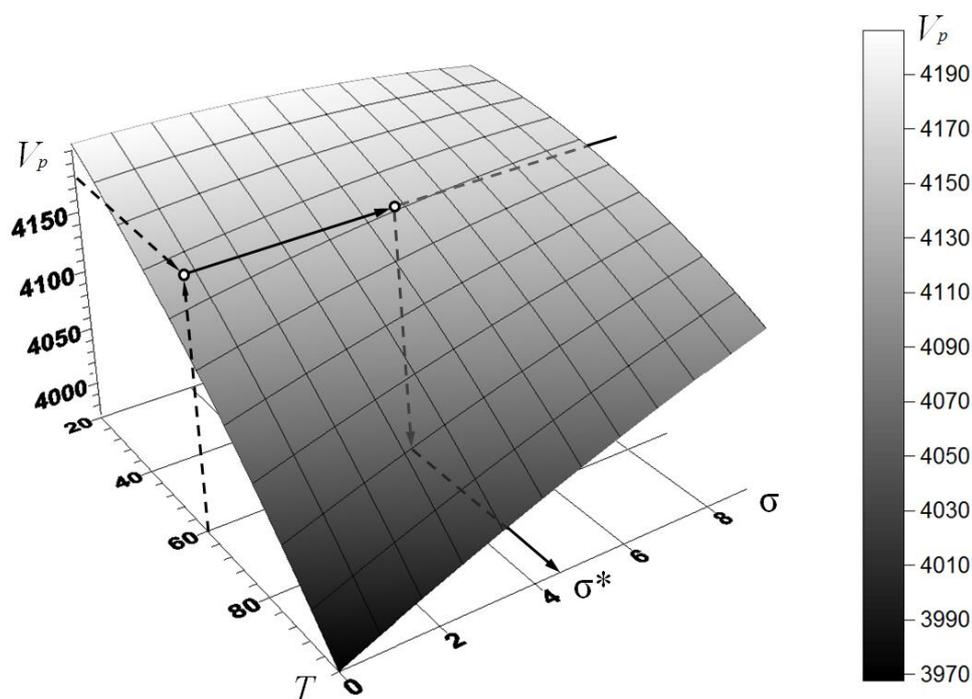


Рисунок 5.9 – Нахождение значения σ^* по измеренным V_p и T и экспериментально установленной зависимости $V_p = f(\sigma, T)$

В натуральных условиях стандартными методами производят измерения скорости V_p на участке массива. В точках измерения скорости дополнительно измеряют температуру горных пород. Значения $\{V_{pi}, T_i\}$ наносят на плоскость $V_p(\sigma)$ и из полученной точки проводят перпендикуляр параллельно оси σ до пересечения с поверхностью $V_p = f(\sigma, T)$. Для полученной точки пересечения определяют значение σ , которое и будет являться оценкой напряжений на участке массива вдоль оси прозвучивания.

5.3 Подготовка образцов горных пород к совместным акустическим и термобарическим исследованиям

В лабораторных условиях исследовались образцы горных пород с различными значениями плотности ρ и пористости Π . Образцы представляли собой правильные параллелепипеды с основанием 42 на 42 мм и высотой 82 мм. Всего было испытано 35 образцов, разбитых на 7 групп по пять однотипных образцов. Распределение пород по группам было следующее: И1 – плотные известняки Касимовского месторождения группа; И2 – пористые известняки Сары-Ташского месторождения; Д1 – доломиты нефтегазоконденсатного месторождения Жанажол; Д2 – плотные доломиты Новомосковского гипсового месторождения; М – мрамор Кибик-Кордонского месторождения; С1 – Серпентинит Баженовского месторождения; Г – Гранит Балтийского месторождения. Перед испытанием все образцы выдерживались при комнатной температуре и относительной влажности воздуха не более 30% для удаления излишков влаги. В таблице 5.3 представлены основные характеристики исследованных горных пород

Таблица 5.3 – Усредненные по группам физико-механические свойства исследованных материалов

Порода	Группа	ρ , кг/м ³	Π	E_d , ГПа
Плотные известняки Касимовского месторождения	И1	2266	17,6%	28,3
Пористые известняки Сары-Ташского месторождения	И2	1847	29,3%	15,7
Доломиты нефтегазоконденсатного месторождения Жанажол	Д1	1974	22,7%	19,15
Плотные доломиты Новомосковского гипсового месторождения	Д2	2554	4%	37,9
Мрамор Кибик-Кордонского месторождения	М1	2695	0,37%	35,1
Серпентинит Баженовского месторождения	С1	2532	0,38%	46,1
Гранит Балтийского месторождения	Г1	2890	1,7%	49,7

ρ – плотность; Π – пористость; E_d – динамический модуль упругости.

5.4 Экспериментальное исследование влияния напряжений на температурные зависимости скорости распространения ультразвука в горных породах

5.4.1 Влияния пористости пород на температурные зависимости скоростей продольных и поперечных волн

Одним из важных аспектов определения зависимостей $V_p = f(\sigma, T)$ и $V_s = f(\sigma, T)$ горных пород является учет особенностей их строения, в частности наличия, размера и типа пор. Особенно актуальной эта задача является для осадочных пород, для которых на фоне относительно постоянного минерального состава наблюдается широкий диапазон коэффициентов пористости, существенно изменяющих упругие и термические характеристики указанных пород [360].

В лабораторных исследованиях участвовали образцы групп И1 и И2, отличающихся существенно разными значениями пористости П. Детальное описание образцов приведено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Характеристика образцов

Группа	Номер образца	Высота, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Пористость, %
И1	И1.1	82.7	42.1	42.2	42.1	2267	17.6
	И1.2	82.5	42.3	42.1	41.4		
	И1.3	82.3	42.4	42.6	42.4		
	И1.4	82.6	42.1	42.2	41.0		
	И1.5	82.7	42.6	42.4	41.3		
И2	И2.1	82.6	42.2	42.1	15.1	1846	29.3
	И2.2	82.4	42.4	42.1	15.6		
	И2.3	82.9	42.3	42.3	14.9		
	И2.4	82.3	42.3	42.3	15.1		
	И2.5	82.6	42.1	42.2	15.4		

Следует отметить, что значения П не характеризуют строение и размер пор, а всего лишь описывают соотношение суммарного объема пор к общему объему образца ГОСТ 26450.1-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением». Очевидно, что

при взаимодействии с акустическими полями будет иметь значение не только общая пористость, но и характерные размеры пор и их распределение.

Более детальное исследование пористости производилось на основе анализа аншлифов, примеры которых приведены на рисунках 5.10а и 5.10б. Количественная оценка параметров пористости проводилась с помощью электронно-оптической системы Thixomet Pro [361], позволяющей на основании анализа цифрового изображения поверхности образца оценить соотношение размеров пор. Усредненные по группам результаты оптического анализа пористости приведены на рисунке 5.10в.

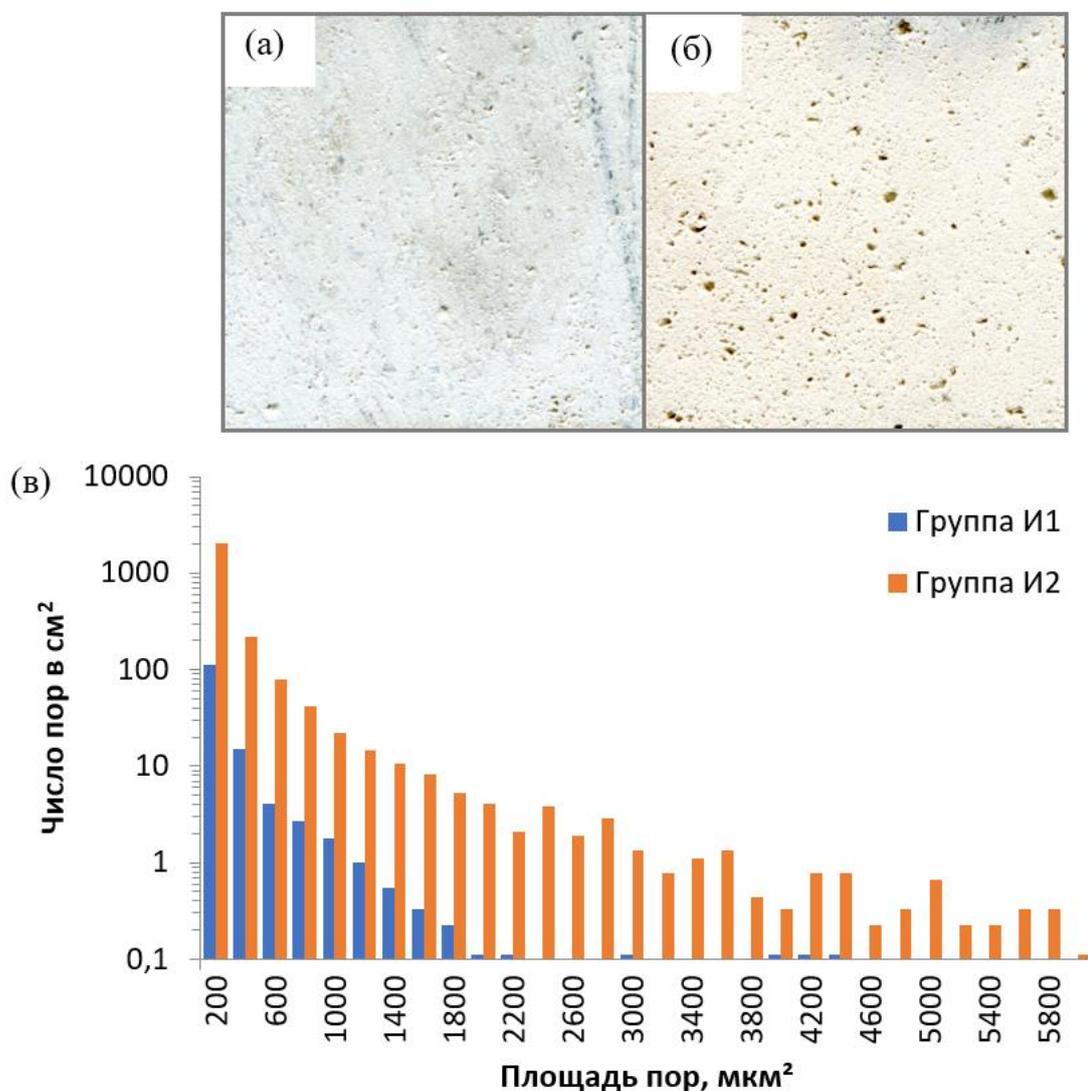


Рисунок 5.10 – Аншлифы образцов группы И1 (а) и И2 (б) и результаты оптического анализа пористости (в)

Испытания проходили по следующей схеме. На образце закреплялось устройство термического нагружения, после чего к его противоположным торцам приклеивались акустические преобразователи с помощью высокотемпературной эпоксидной смолы. Клеевое соединение необходимо для эффективной передачи сдвиговых колебаний на границе “преобразователь – образец”. Подготовленный таким образом образец размещался на прессе. Процесс испытаний состоял из ступенчатого увеличения температуры T при фиксированном уровне одноосной нагрузки σ . Измерения параметров ультразвуковых сигналов проводилось в диапазоне температур 20–100°C с шагом 10 °C на ступенях давления 0, 3, 6 и 9 МПа. Перед повышением давления до следующего уровня образец полностью охлаждался до 20 °C.

Стадии термобарического нагружения схематично показаны на рисунке 5.11. На каждой стадии выполнялось измерение V_p и V_s . При нагреве до заданной температуры важным является момент достижения температурного равновесия между поверхностью и центром образца, т. е. необходимо удостовериться в полном и равномерном прогреве горной породы. В данном случае установление термического равновесия проводилось косвенным способом. В процессе нагрева непрерывно измерялась скорость продольной волны с частотой 1 раз в секунду. Полный нагрев образца определялся по насыщению графика зависимости скорости продольной волны от времени [356]. Наблюдалось запаздывание выполаживания указанной зависимости относительно измеренной температуры на поверхности образца в среднем на 300 – 400 с.

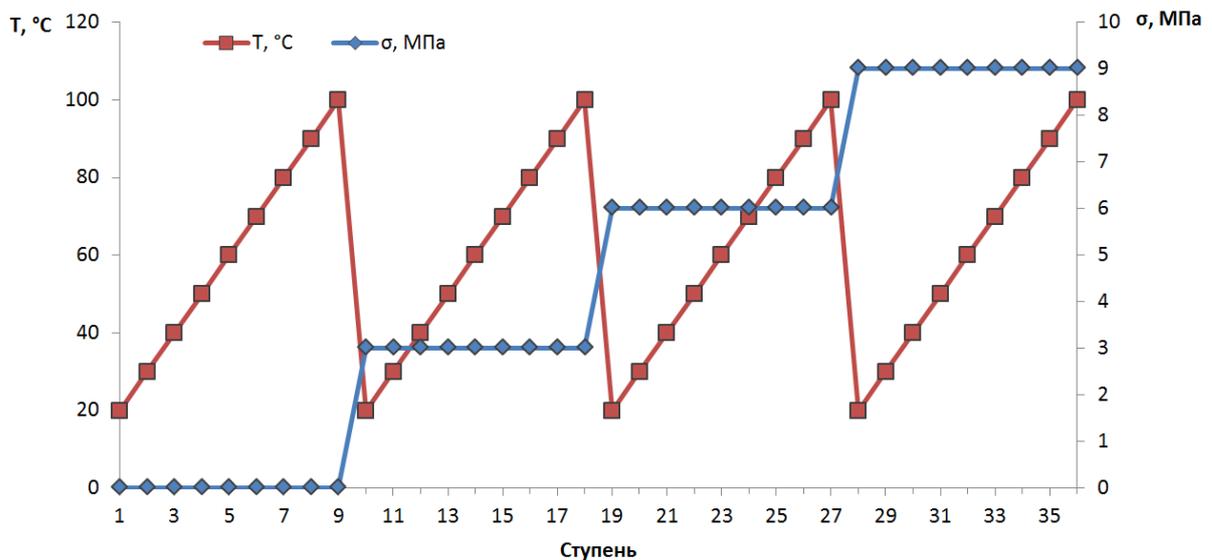


Рисунок 5.11 – Программа термобарического нагружения образцов

В результате испытания образца формировался массив данных значений V_p и V_s при различных сочетаниях T и σ . Такой массив может быть представлен в трехмерном виде и аппроксимирован функцией

$$y = a_0 + a_1T + a_2\sigma + a_3T^2 + a_4T\sigma + a_5\sigma^2, \quad (5.1)$$

где y — используемый информативный параметр (V_p или V_s).

Аппроксимация для всех зависимостей проводилась методом наименьших квадратов. Для оценки качества аппроксимации использовался коэффициент детерминации R^2 , для исследованных образцов параметр R^2 не опускался ниже 0,96.

На рисунке 5.12 представлены примеры зависимостей $V_p(T, \sigma)$ для образцов групп И1 и И2, а также результаты аппроксимации. Исходные ($T = 20$ °C; $\sigma = 0$ МПа) значения для скорости продольной волны $V_p^{init} = 3925$ м/с образцов группы А и 2963 м/с группы В. Более низкие значения V_p^{init} для образцов группы В обусловлены наличием в них пор, больших по размеру и количеству.

Для обоих типов известняков увеличение температуры приводит к снижению V_p , а увеличение осевой нагрузки — к увеличению V_p . Это в значительной мере согласуется с [362–365]. При высоких температурах

изменение давления приводит к большему приращению V_p . Для оценки такого приращения определен показатель

$$\Delta V_p^T = V_{pmax}^T - V_{pmin}^T, \quad (5.2)$$

где V_{pmax}^T — максимальная зарегистрированная скорость продольной волны в диапазоне исследуемых давлений при заданной температуре T ; V_{pmin}^T — минимальная зарегистрированная скорость продольной волны в диапазоне исследуемых давлений при заданной температуре T .

Так, для образца группы И1 $\Delta V_p^{20^\circ C} = 77$ м/с (1.83 %), $\Delta V_p^{100^\circ C} = 177$ м/с (4.72 %), для образца группы И2 $\Delta V_p^{20^\circ C} = 115$ м/с (3.88 %), $\Delta V_p^{100^\circ C} = 191$ (6.76 %). На скорость продольной волны влияет как общая пористость [366], так и размер пор [367]. Увеличение этих параметров снижает значения V_p . Отмечен нелинейный характер роста V_p с увеличением σ в пористом известняке группы И2. Степень нелинейности в данном случае можно оценить по коэффициенту a_5 регрессионной модели (5.1). Для породы группы И1 он существенно больше ($a_5 = 1.083$), чем для породы группы И2 ($a_5 = 0.4815$).

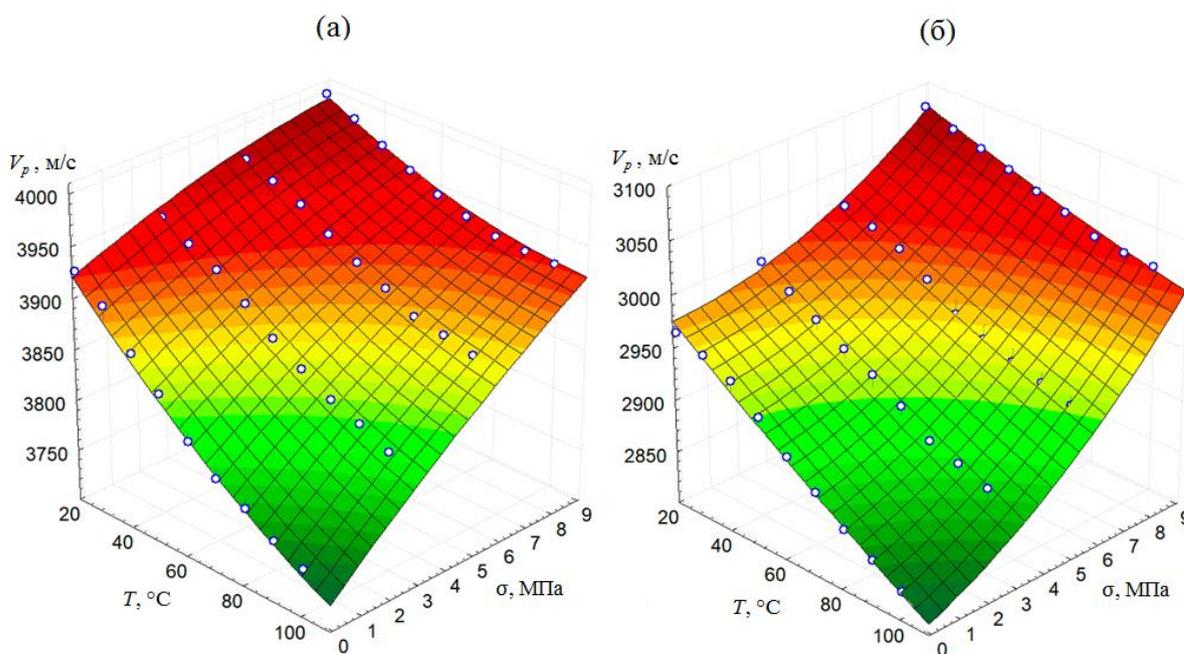


Рисунок 5.12 – Изменение скорости продольной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп И1 (а) и И2 (б)

Результаты измерения V_s показали схожие с V_p особенности. На рисунке 5.13 приведены примеры зависимостей $V_s(T, \sigma)$ для образцов групп И1 и И2 и результаты аппроксимации. Исходные ($T=20\text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma=0\text{ МПа}$) значения скоростей поперечных волн $V_s^{init} = 2233\text{ м/с}$ для образцов группы И1 и $V_s^{init} = 1587\text{ м/с}$ группы И2. Значения приращений V_s для породы группы И1 составили $\Delta V_s^{20^\circ\text{C}} = 25\text{ м/с}$ (1.11%), $\Delta V_s^{100^\circ\text{C}} = 79\text{ м/с}$ (4.22%). Для пористого известняка группы И2 приращения V_s более значительны: $\Delta V_s^{20^\circ\text{C}} = 69\text{ м/с}$ (4.35%), $\Delta V_s^{100^\circ\text{C}} = 211\text{ м/с}$ (16.4%). Также более значительно выражена нелинейность роста V_s при увеличении σ во всем диапазоне температур для пористых известняков группы И2. Для указанной группы значение $a_5 = 0.537$, в то время как в породах группы И1 нелинейность практически не наблюдается ($a_5 = 0.046$).

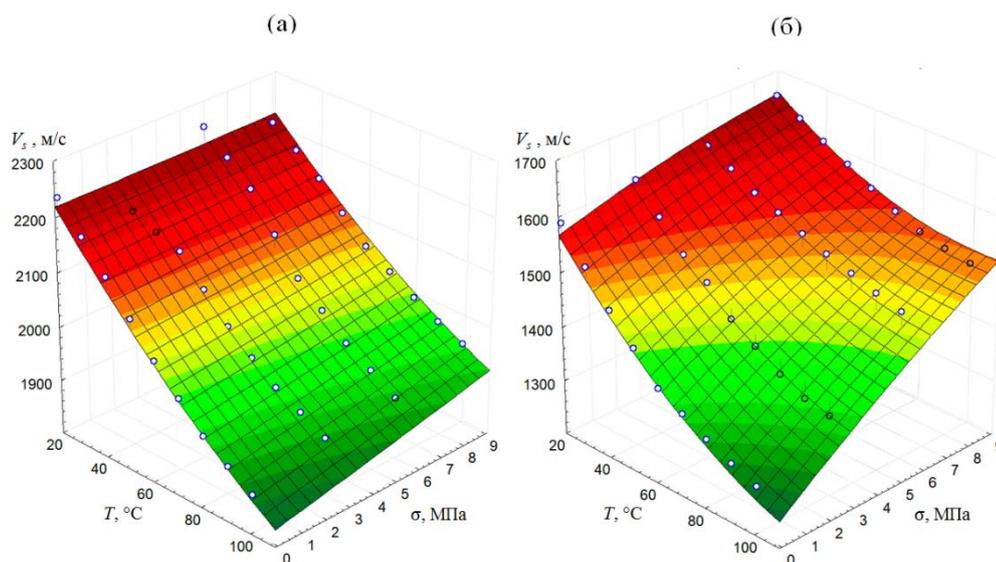


Рисунок 5.13 – Изменение скорости поперечной волны в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп И1 (а) и И2 (б)

Экспериментально сформированные массивы значений $V_p(T, \sigma)$ и $V_s(T, \sigma)$ позволяют рассчитать значения динамических модулей упругости E_d для образцов групп И1 и И2 в соответствии с [330]:

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (5.3)$$

где ρ — плотность; V_p и V_s — измеренные значения скоростей продольной и сдвиговой волн.

На рисунке 5.14 представлены примеры зависимостей $E_d(T, \sigma)$ для образцов групп И1 и И2 и результаты аппроксимации в соответствии с выражением (5.3).

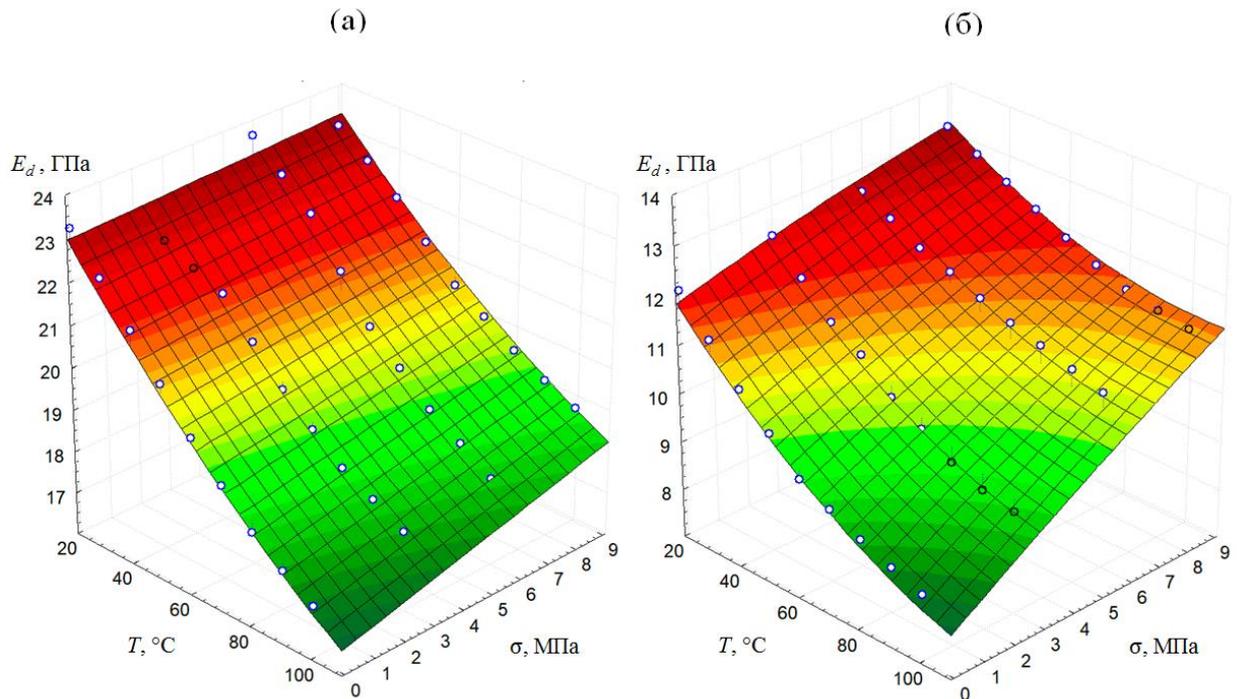


Рис. 5.14 – Изменение динамического модуля упругости в зависимости от температуры и осевой нагрузки для образцов групп И1 (а) и И2 (б)

Из выражения (5.3) следует, что значения E_d в значительной степени зависят от V_s и в меньшей степени от V_p . Это объясняет общее сходство зависимостей $E_d(T, \sigma)$ и $V_s(T, \sigma)$. Исходные ($T=20\text{ °C}$; $\sigma=0\text{ МПа}$) значения динамического модуля упругости $E_d^{init} = 23.21\text{ ГПа}$ для образцов группы И1 и $E_d^{init} = 12.08$ группы И2. Значения приращений $\Delta E_d^{20\text{ °C}} = 0.16\text{ ГПа}$ (0.7%) для породы группы И1, $\Delta E_d^{100\text{ °C}} = 1.51\text{ ГПа}$ (8.8%). Для пористого известняка группы И2 приращения $\Delta E_d^{20\text{ °C}} = 1.05\text{ ГПа}$ (8.67%), $\Delta E_d^{100\text{ °C}} = 2.7\text{ ГПа}$ (32.2%).

Для всех исследованных образцов характерно снижение скоростей распространения упругих колебаний с ростом температуры и увеличение скоростей с ростом осевой нагрузки. Увеличение скорости упругих колебаний с ростом давления является известным и широко используемым феноменом [364,368,369]. Увеличение скоростей P -волн объясняется уплотнением структуры породы, закрытием трещин и пор. Увеличение скоростей S -волн с ростом механических напряжений также наблюдается, однако в меньшей степени. Природа сдвиговых волн (их зависимость от модуля сдвига G) определяет их большую чувствительность не к величине раскрытия трещин или размеру пор, а к факту их присутствия и типу заполнителя (S -волны не распространяются в жидкостях и газах).

Точный механизм влияния температуры на скорости распространения упругих колебаний в горных породах установить сложнее. Снижение скоростей с ростом температуры часто объясняют образованием микротрещин [370]. Во всех исследованных образцах отмечается 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 способствует увеличению акустической тензочувствительности ε_{ps} породы — показателя, определяющего приращение скорости упругой волны (P или S) при увеличении осевой нагрузки:

$$\varepsilon_{ps} = \frac{\Delta V_{ps}}{\Delta \sigma}, \quad (5.4)$$

где ΔV_{ps} — приращение скорости продольной или поперечной волны; $\Delta\sigma$ — приращение осевой нагрузки.

Возможность искусственного увеличения ε_{ps} позволит повысить точность оценок напряжений, получаемых in-situ ультразвуковыми методами. Это может оказаться критически важным при реализации ультразвуковых измерений напряжений на малых глубинах, где давления относительно невелики и не приводят к существенным изменениям V_p и V_s . В пористых породах нагрев вызывает более значительный рост чувствительности. В таблице 5.5 представлены сводные результаты испытаний образцов.

Таблица 5.5 - Результаты испытания образцов

Группа	Номер образца	V_p^{init}	V_s^{init}	$\varepsilon_p^{20^\circ C}$	$\varepsilon_p^{100^\circ C}$	$\varepsilon_s^{20^\circ C}$	$\varepsilon_s^{100^\circ C}$
		м/с		м/(с·МПа)			
И1	И1.1	3925	2233	8.56	19.67	2.78	8.78
	И1.2	3935	2233	7.22	20.11	2.67	8.89
	И1.3	3923	2247	7.89	18.78	2.00	8.44
	И1.4	3932	2250	9.11	19.56	3.00	9.22
	И1.5	3918	2244	7.67	16.78	2.22	7.78
И2	И2.1	2963	1587	12.78	21.22	7.67	23.44
	И2.2	2961	1580	11.67	21.44	7.89	24.56
	И2.3	2975	1578	14.22	20.78	6.56	22.78
	И2.4	2982	1594	11.22	18.33	7.11	24.78
	И2.5	2990	1589	11.89	19.33	7.11	24.11

При применении ультразвуковых методов для оценки степени дефектности различных материалов чаще всего используются такие информативные параметры, как скорость и амплитуда продольных и, реже, поперечных волн. Дополнительную информацию о степени и характере нарушений в образце, особенно о ее динамике, возможно получить при использовании спектрального анализа принятых сигналов [330,371]. Чаще всего в качестве информативных параметров выступают значения ширины спектра Δf , а также частота спектрального максимума f_{max} . Так, в [372] отмечается снижение указанных параметров при увеличении степени нарушенности породы.

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. Спектрограммы получены путем последовательного построения нормированных спектров сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. Построение спектрограмм проводилось отдельно для разных ступеней температуры, после чего формировалось итоговое изображение, характеризующее изменение спектральной композиции сигналов в зависимости от различных давлений и температур. На рисунке 5.15 представлены примеры таких комплексных спектрограмм, полученных для образцов групп И1 и И2.

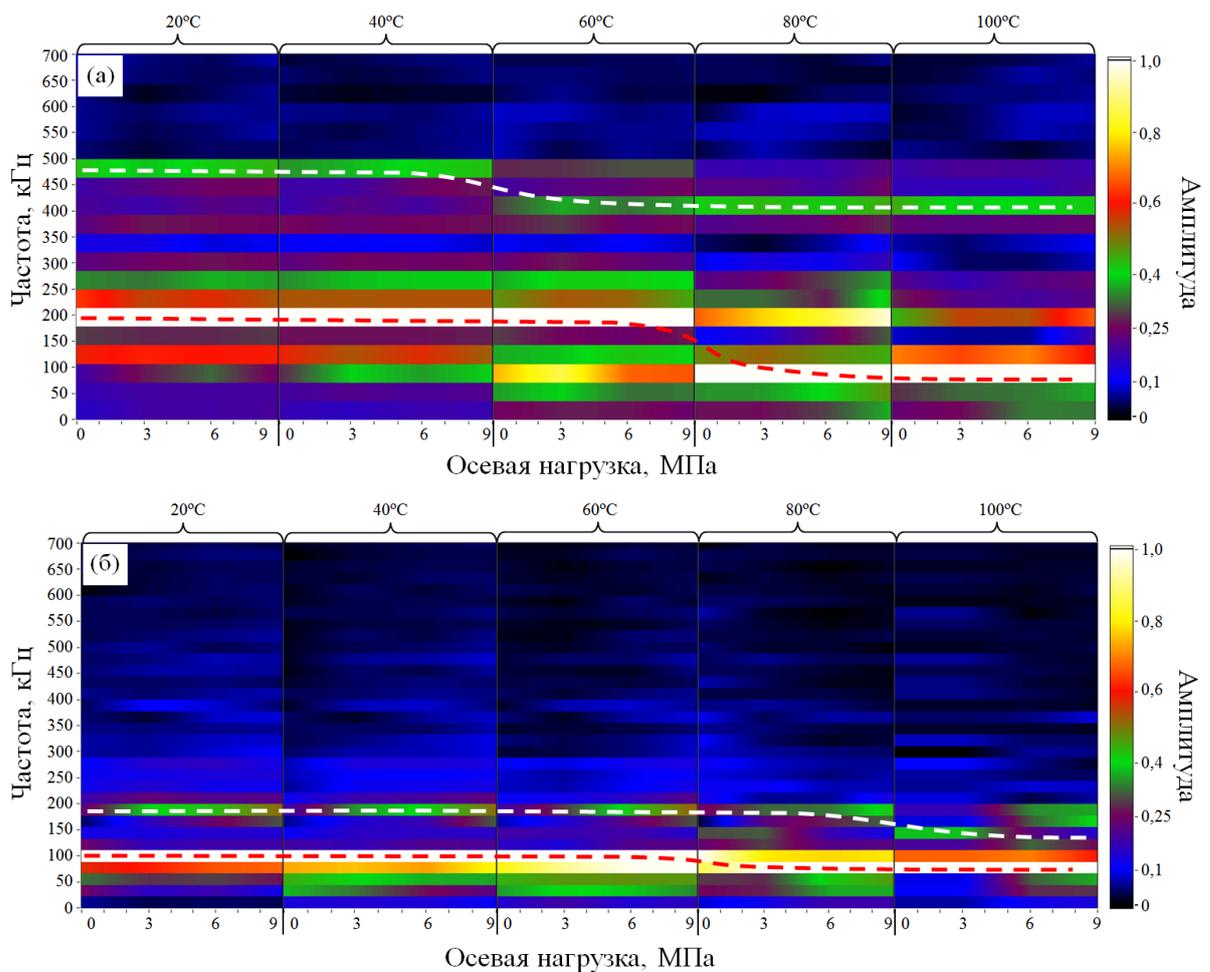


Рисунок 5.15 – Изменение спектрального состава ультразвуковых сигналов при изменении осевой нагрузки и температуры для образцов группы И1 (а) и И2 (б)

В пористых известняках группы И2 наблюдается значительное снижение амплитуд высокочастотных составляющих спектра во всем диапазоне исследованных давлений и температур. Это связано с наличием и размером пор. В [373] указывается на различие между механизмами рассеяния акустических сигналов на порах при различных соотношениях длины волны λ и характерного радиуса поры R . Так, при $\lambda > 2R$ наблюдается рэлеевское рассеяние, при $\lambda \approx 2R$ происходит стохастическое рассеяние. В случае $\lambda \gg 2R$ среду можно рассматривать как однородную, и рассеяние не наблюдается. В [374] приводится подробный анализ влияния размеров и конфигурации пор на частотные характеристики ультразвуковых сигналов: в пористой среде существует предельная частота (частота среза f_s), выше которой упругие колебания испытывают настолько сильное рассеяние, что практически перестают распространяться. Значение f_s можно оценить из выражения

$$f_c \approx \frac{V_p}{20R}. \quad (5.5)$$

На рисунке 5.16 приведены рассчитанные по (5.5) теоретические значения f_s в зависимости от размеров пор для образцов групп И1 и И2. Для упрощения форма сечения пор на поверхности образца принята за окружность.

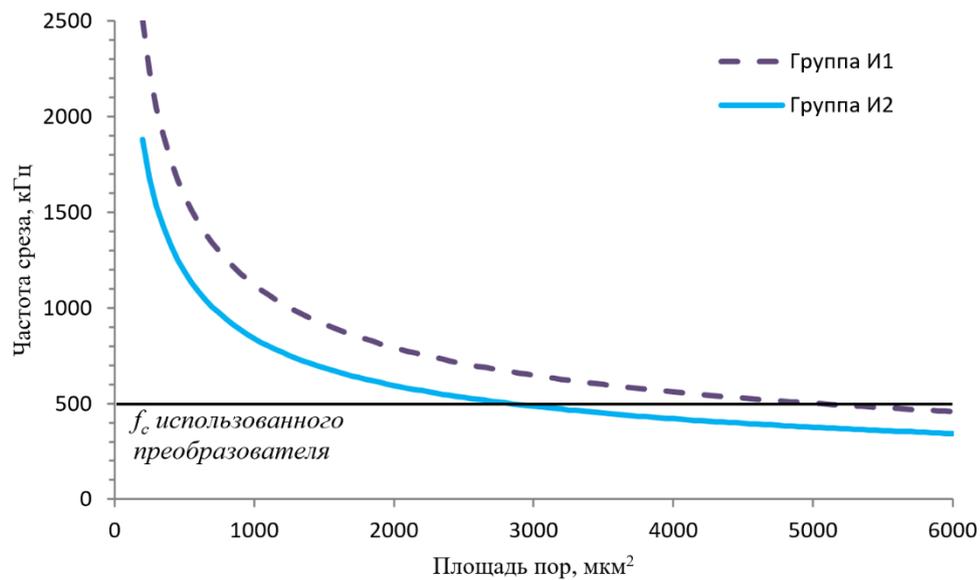


Рисунок 5.16 – Расчетная частота среза f_c в зависимости от размера пор для образцов группы И1 и И2

Для образцов группы И1 размер пор не превышает 1800 мкм² (рисунок 5.10в). Центральная частота использованных преобразователей f_c лежит ниже расчетной частоты среза f_s . Это проявляется в наличии спектрального максимума в районе 500 кГц для образца группы И1 при $T=20^\circ\text{C}$ и $\sigma=0$ МПа (рисунок 5.15а). Такого спектрального максимума на 500 кГц не наблюдается для образца группы И2 (рисунок 5.15б), что объясняется существенным рассеянием высокочастотных составляющих сигнала на порах большего размера. Для известняков группы И2 площадь пор достигает до 5800 мкм² (рисунок 5.10в). Значения частоты среза оказываются ниже центральной частоты используемых преобразователей (рисунок 5.16), что приводит к практически полной потере высокочастотных составляющих.

С ростом температуры для образцов обеих групп наблюдается смещение спектральных максимумов в высокочастотном и низкочастотном диапазонах (сплошная и пунктирная линии на рисунке 5.15). Подобное смещение происходит даже при отсутствии осевой нагрузки и, вероятнее всего, связано со снижением упругих модулей пород с ростом температуры. В

[375] также отмечается снижение максимума спектра ультразвуковых сигналов с увеличением температуры при испытании бетонов.

5.4.2 Понятие поврежденности горных пород и динамика ее изменения при термобарическом воздействии

Одновременное измерение значений V_p и V_s является основой для вычислений динамических модулей упругости [12-14]. Последние можно использовать для оценки степени нарушенности горных пород. Для оценки динамики степени нарушенности исследуемого материала в [15] предлагается использовать понятие поврежденности Ψ . Очевидно, что модули упругости поврежденного и неповрежденного материалов будут отличаться. Если обозначить модуль упругости неповрежденного материала как E_0 , то модуль Юнга поврежденного материала $E_{эфф}$ можно найти из

$$E_{эфф} = E_0(1 - \Psi). \quad (5.6)$$

В данном случае Ψ следует трактовать как относительную оценку степени нарушенности материала (степень трещиноватости, пористости).

Также известно, то модуль Юнга материала зависит от температуры. В первом приближении значения E_0 можно определить из

$$E_0 = E_0^{20^\circ C}(1 - k_E \Delta T), \quad (5.7)$$

где $E_0^{20^\circ C}$ - модуль Юнга при $20^\circ C$; ΔT - изменение температуры; k_E - температурный коэффициент изменения модуля Юнга ($k_E \approx 3 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$).

Объединяя (5.6) и (5.7) можно получить выражение для оценки изменения степени поврежденности материала при изменении его температуры

$$\Psi = 1 - \frac{E_{эфф}}{E_0^{20^\circ C}(1 - k_E \Delta T)}. \quad (5.8)$$

Полученные в [360] зависимости $V_p = f(\sigma, T)$ и $V_s = f(\sigma, T)$ для пористых известняков Сары-Ташского месторождения и плотных известняков Касимовского месторождения позволяют оценить для них динамику Ψ при изменении осевого давления и температуры.

Полученный в результате эксперимента массив данных является достаточным для расчета фактических значений $E_{эфф}$ в соответствии с [376]

$$E_{эфф} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}. \quad (5.9)$$

Значения $E_{эфф}(T, \sigma)$ были использованы для вычисления значений $\Psi(T, \sigma)$ для всего диапазона исследуемых давлений и температур. Сформированный в результате вычислений массив $\Psi(T, \sigma)$ можно представить в виде трехмерной аппроксимирующей поверхности вида

$$\Psi = a_0 + a_1 T + a_2 \sigma + a_3 T^2 + a_4 T \sigma + a_5 \sigma^2. \quad (5.10)$$

Качество аппроксимации оценивалось с помощью параметра R^2 .

На рисунке 5.17 представлены примеры зависимостей $\Psi(T, \sigma)$ для известняков Касимовского и Сары-Ташского месторождений.

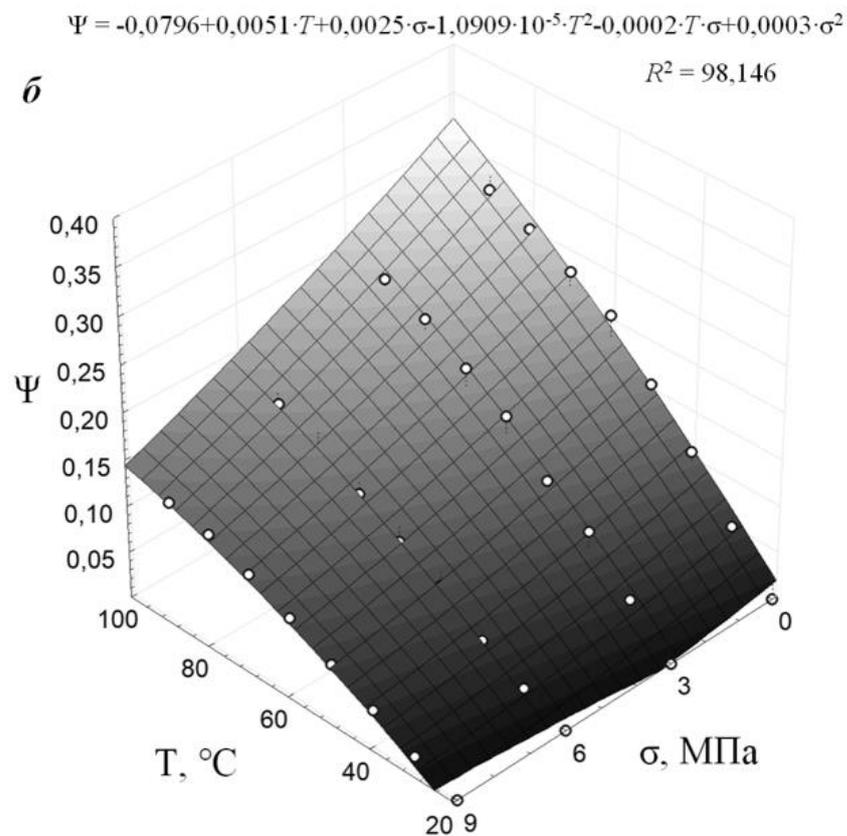
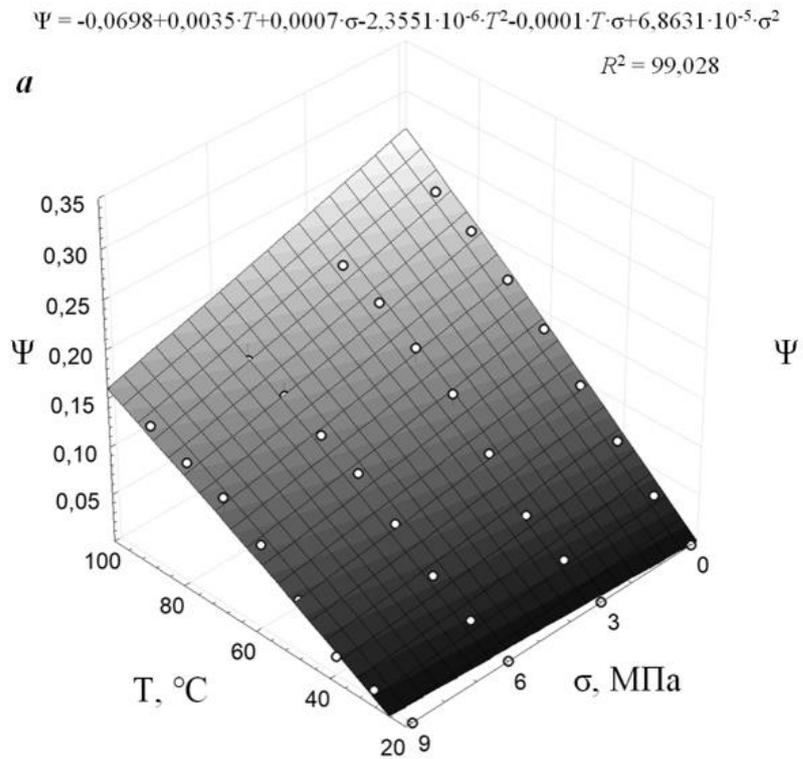


Рисунок 5.17 – Результаты экспериментального определения зависимостей $\Psi(T, \sigma)$ для плотного известняка Касимовского месторождения (а) и пористого известняка Сары-Ташского месторождения (б)

Из рисунка 5.17 видно, что рост температуры приводит к росту поврежденности горной породы Ψ . При осевом давлении $\sigma = 0$ МПа в плотных известняках группы И1 прирост поврежденности составляет $\Delta\Psi = 0,25$ при повышении температуры от 20 до 100°С. В тех же условиях прирост поврежденности известняков группы И2 составил $\Delta\Psi = 0,31$. Таким образом, можно утверждать, что более пористые горные породы склонны к более интенсивному разрушению с ростом температуры.

Из рисунка 5.17 также видно, что рост осевого давления σ препятствует разрушению породы под действием температуры. Для обеих групп исследованных образцов изменения Ψ при 20°С практически не наблюдаются с ростом σ . При высокой температуре (100°С) напротив, наблюдается значительное снижение Ψ с ростом механической нагрузки. При $T = 100^\circ\text{C}$ приращения поврежденности с ростом нагрузки для образцов группы И1 составило $\Delta\Psi = 0,19$, а для образцов группы И2 – $\Delta\Psi = 0,16$. Таким образом осевое давление в значительной степени может противостоять развитию поврежденности вследствие роста температуры, причем этот эффект наблюдается более отчетливо в пористых породах. Это, очевидно, связано с более интенсивным закрытием пор под действием механических напряжений, что, в свою очередь, препятствует развитию термомеханических разрушений. Следует отметить, что максимальные значения осевого давления, достигаемые в процессе эксперимента, не превышают значений 0,5 от прочности пород на одноосное сжатие и не приводят к значительному образованию новых дефектов в образцах.

5.4.3 Оценка эффективности нагрева как фактора, повышающего чувствительность скоростей упругих волн к изменению напряженного состояния пород

Для пород, свойства которых представлены в таблице 5.3, был получен массив информации $V(\sigma, T)$. Оценка влияния температуры на зависимость $V(\sigma)$ для всех образцов определялась из показателя $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$

$$\Delta V^{20^\circ\text{C}} = \frac{V_{max}^{20^\circ\text{C}}}{V_{min}^{20^\circ\text{C}}} \cdot 100\%, \quad (5.11)$$

где $V_{max}^{20^\circ\text{C}}$ и $V_{min}^{20^\circ\text{C}}$ - максимальное и минимальное значения скорости продольной или поперечной волны при температуре $T = 20^\circ\text{C}$.

Показатель $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$ описывает относительное приращение скорости упругих волн с увеличением осевой нагрузки. На рисунке 5.18а представлены свойства пород, а на рисунке 5.18б – определенные экспериментально значения $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$ для продольных и поперечных волн в исследуемых группах образцов.

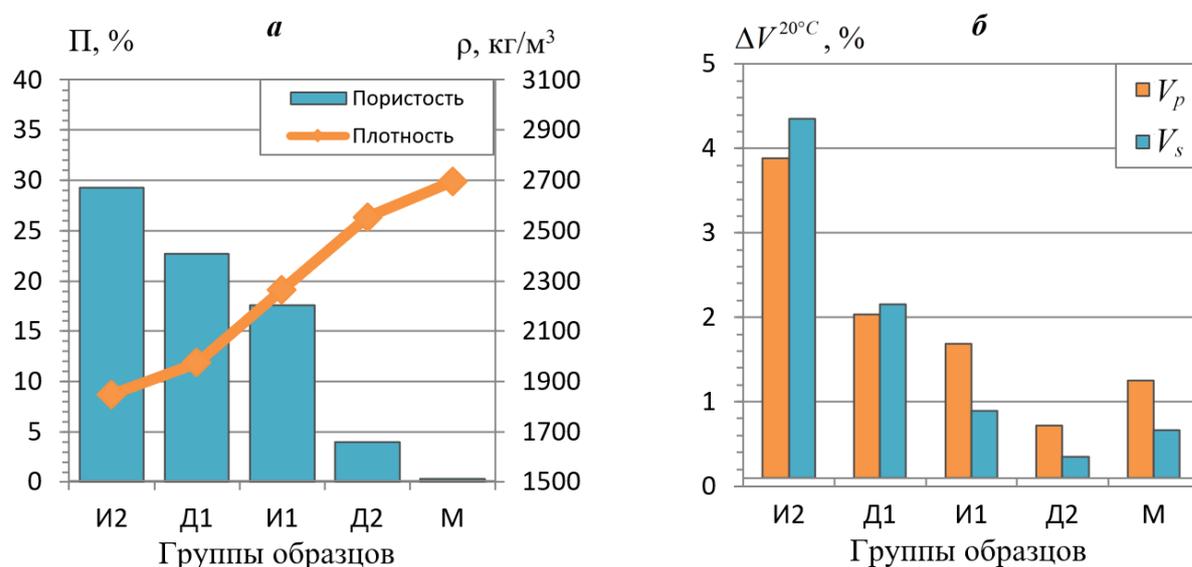


Рисунок 5.18 – Свойства пород (а) и определенные экспериментально значения $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$ для продольных и поперечных волн (б)

Из рисунка 5.18б видно, что значения $\Delta V^{20^\circ\text{C}}$ пропорциональны пористости образцов и обратно пропорциональны их плотности, что хорошо согласуется с исследованиями на разных типах пород [364, 369, 377]. Для осадочных пород основной вклад в увеличение скорости продольных волн вносит частичное или полное закрытие пор под действием внешнего давления. Большой объем порового пространства известняков группы И2 позволяет обеспечить довольно высокую чувствительность скорости упругих колебаний к изменению напряженно-деформированного состояния образца. В более плотных образцах групп Д2 и М приращения скоростей оказываются менее значительными.

В [378] показано, что рост температуры приводит к увеличению уровня поврежденности геоматериала, что может повысить чувствительность скоростей упругих волн к изменениям параметров напряженно-деформированного состояния. Для оценки увеличения такой чувствительности предлагается для каждого типа породы и степени термического нагружения определить показатель эффективного приращения скорости $\Delta V_{\text{эфф}}$

$$\Delta V_{\text{эфф}} = \frac{\Delta V^T}{\Delta V^{20^\circ\text{C}}} \quad (5.12)$$

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

$$\Delta V^T = \frac{V_{\text{max}}^T}{V_{\text{min}}^T \cdot 100\%}, \quad (5.13)$$

где V_{max}^T - максимальное значение скорости продольной или поперечной волны при температуре T ; V_{min}^T - минимальное значение скорости продольной или поперечной волны при температуре T .

Показатель $\Delta V_{\text{эфф}}$ характеризует степень эффективности нагрева породы в качестве фактора, увеличивающего чувствительность скоростей упругих волн к изменению осевого давления. Значения $\Delta V_{\text{эфф}}$ больше 1 свидетельствуют об эффективности нагрева в качестве фактора повышения

чувствительности V_p и V_s к изменениям напряженного состояния образцов. На рисунке 5.19 представлены результаты расчета $\Delta V_{эфф}$ для продольных и поперечных волн в диапазоне температур от 20 до 100°C.

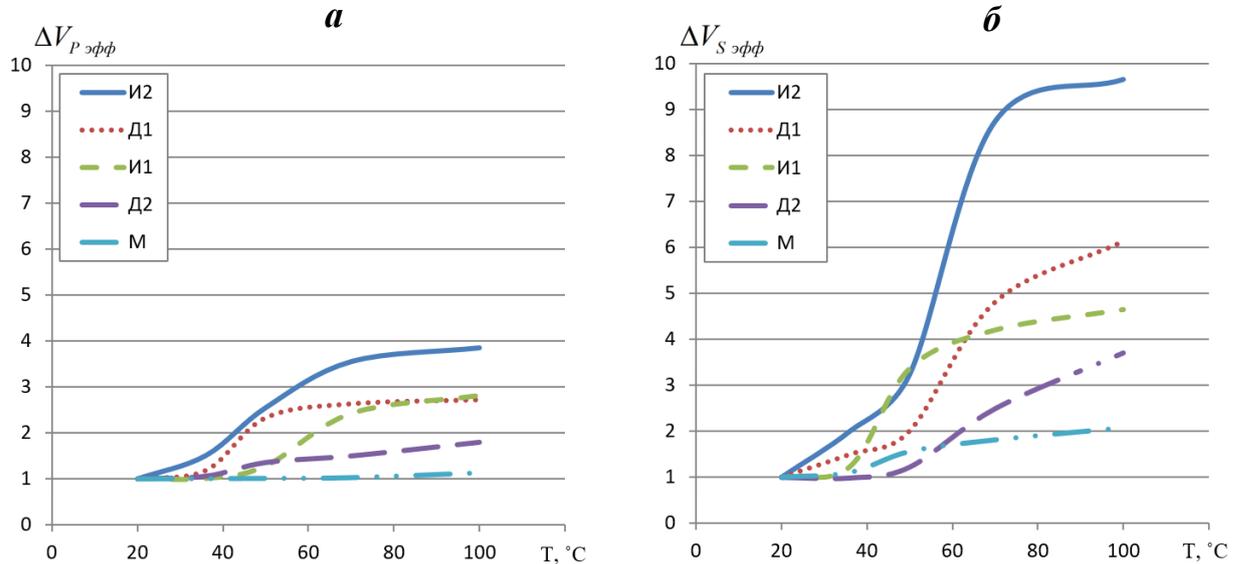


Рисунок 5.19 – Экспериментально определённые значения $\Delta V_{эфф}$ для продольных (а) и поперечных (б) волн

Из рисунка 5.19 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 $\Delta V_{эфф}$ можно объяснить образованием множества микротрещин [370] в результате температурного воздействия. Различия в значениях $\Delta V_{Pэфф}$ и $\Delta V_{Sэфф}$ объясняется различиями в механизмах 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 и с малым раскрытием. Также из рисунка 5.19 можно заметить, что для большинства исследованных пород наблюдается постепенное выполаживание графика $\Delta V_{эфф}(T)$ после температуры 75°C .

Еще одним подходом к оценке эффективности нагрева в качестве фактора повышения чувствительности является оценка так называемой акустической тензочувствительности геоматериала ε

$$\varepsilon = \frac{V_{max}^T - V_{min}^T}{\sigma}, \quad (5.14)$$

где V_{max}^T и V_{min}^T - максимальные и минимальные значения скоростей продольных волн зависимости $V_p(\sigma)$ при фиксированной температуре.

Параметр ε показывает, на сколько изменяется значение V_p при возрастании нагрузки на 1 МПа при заданной температуре. Результаты вычисления ε для $T = 25^{\circ}\text{C}$ и $T = 100^{\circ}\text{C}$ приведены на рисунке 5.20. Для сравнения также приведены результаты испытания эталонного образца «ДА», изготовленного из дюралюминия с отсутствующими внутренними дефектами.

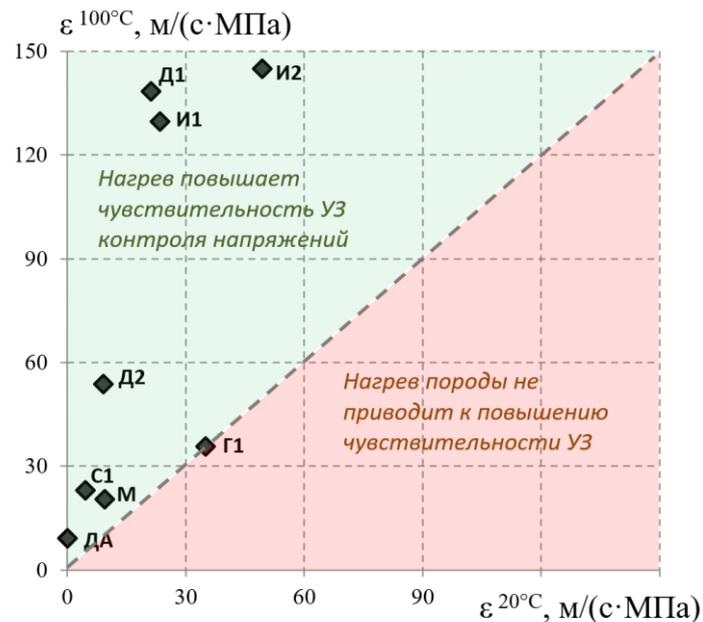


Рис 5.20 – Результаты определения $\varepsilon^{20^{\circ}\text{C}}$ и $\varepsilon^{100^{\circ}\text{C}}$ для всех групп образцов

Результаты экспериментов можно разделить на две части. Выше пунктирной линии применение нагрева приводит к повышению чувствительности скорости продольных волн к изменениям нагрузки. Вблизи пунктирной линии и ниже использование нагрева не оказывает существенного влияния на увеличение тензочувствительности пород. Как видно из рисунка 5.20, наибольшее влияние температура оказывает на плотные породы с высокими значениями пористости. Выделяют два основных механизма влияния температуры на скорость продольных волн: образование микротрещин при нагреве [370] и изменение модуля упругости материала [379]. Для изучения влияния второго механизма и был исследован образец дюралюминия. В нем приращение V_p в диапазоне от 0 до 10 МПа оказывается на уровне погрешности измерительной аппаратуры, в то время как с ростом температуры до 100°C V_p изменяется на 9 м/с на каждый 1 МПа нагрузки. Поскольку $\varepsilon^{100^\circ\text{C}}$ для образцов дюралюминия относительно невелико, можно предположить, что для исследованных пород преобладающим механизмом изменения ε является образование микротрещин.

Для более детального изучения влияния температуры и давления на трещинообразование было исследовано затухание сигналов, оценка которого производилась на основе вычисления потерь энергии колебаний из выражения

$$\Delta E = \frac{E - E_{\text{исх}}}{E_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (5.15)$$

где $E_{\text{исх}}$ и E – энергии зарегистрированных сигналов до и после воздействия (температурного или механического), вычисленные из выражения

$$E = \int_0^{t_s} A^2(t) dt, \quad (5.16)$$

где t_s и A – длительность и амплитуда сигнала.

На рисунке 5.21 представлены результаты расчета ΔE^σ (изменение энергии сигналов при росте осевого напряжения от 0 до 10 МПа) и ΔE^T (изменение энергии сигналов при росте температуры от 25 до 100°C).

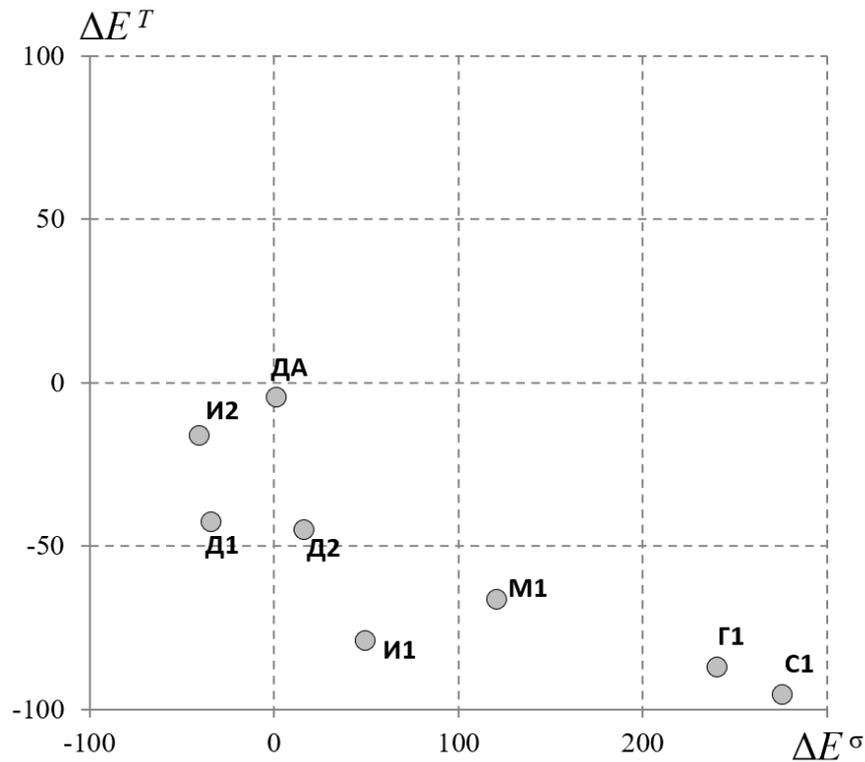


Рисунок 5.21 – Результаты расчета ΔE^σ и ΔE^T для всех групп образцов

Из рисунка 5.21 видно, что рост температуры во всех образцах приводит к потерям энергии сигналов, а, следовательно, и к росту затухания (отрицательная область вертикальной шкалы). Подобная закономерность объясняется образованием микротрещин, на которых происходит частичное рассеяние ультразвуковых импульсов. При этом рост затухания более заметен в менее нарушенных породах с высокими модулями упругости.

Механическое нагружение может привести как к росту, так и к снижению затухания. Для прочных пород повышение σ приводит к их консолидации и уменьшению затухания (положительная область горизонтальной шкалы). Пористые породы с низкими значениями E_d , напротив, демонстрируют рост затухания, что, очевидно, связано с заметным повышением их дефектности под действием механической нагрузки.

Таким образом, результаты лабораторных исследований указывают на то, что наиболее заметное повышение тензочувствительности с ростом

температуры наблюдается в горных породах с высокими показателями пористости и относительно невысокими упругими модулями. Анализ затухания ультразвуковых импульсов указывает на то, что основным механизмом повышения тензочувствительности является развитие микротрещиноватости.

5.4.4 Анализ положения максимума спектра ультразвуковых импульсов при термобарическом воздействии на горные породы

Дополнительную информацию о механизмах дефектообразования под воздействием термического нагружения может дать спектральный анализ зарегистрированных импульсов. Спектральному анализу подвергались сигналы продольных волн (выделить в волновом пакете исключительно поперечные волны даже при использовании сдвиговых преобразователей без существенного искажения спектрального состава не представляется возможным, поэтому спектральный анализ S -волн не производился). Информацию о степени нарушенности образца несут продольные волны, прошедшие через образец. Многократные отражения от границ образца могут существенно исказить спектр сигналов, поэтому преобразование Фурье необходимо производить на начальном участке сигнала. Длина участка сигнала выбиралась равной длительности однократного пробега продольной волны от излучателя к приемнику. Для минимизации влияния краевых эффектов использовалось оконное преобразование Хеннинга [380]. В качестве основного информативного параметра спектра была выбрана частота максимума f_{\max} , снижение которой обусловлено изменением частотно-зависимого затухания и обычно свидетельствует об увеличении трещиноватости образца [372]. Усредненные по группам образцов значения f_{\max} в функции от температуры представлены на рисунке 5.20.

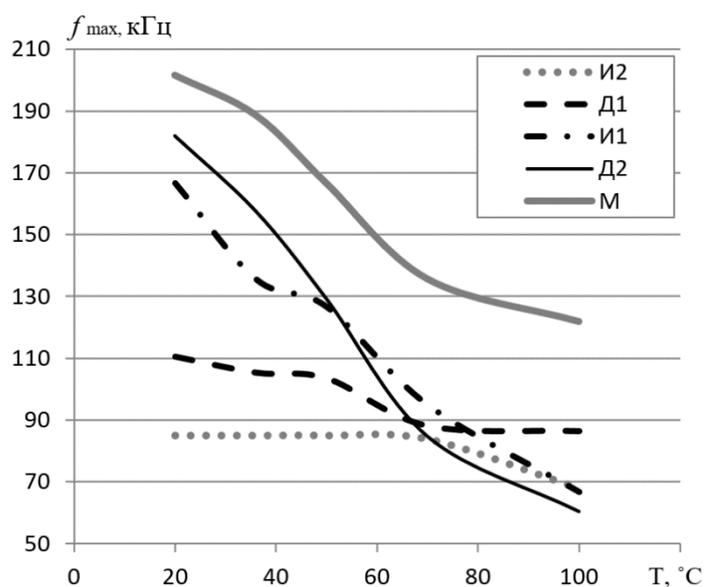


Рисунок 5.20 – Зависимости $f_{\max}(T)$ для всех исследованных групп образцов

Из рисунка 5.20 видно, что увеличение температуры приводит к смещению максимума спектра в область низких частот, что согласуется с результатами, полученными при нагревании бетонов [375]. Наиболее значительное снижение f_{\max} наблюдается в плотных породах групп М и Д2. В пористых породах снижение менее выражено, что, очевидно, связано с более высоким начальным уровнем дефектности. Термические напряжения в рассмотренном диапазоне температур являются недостаточными для возникновения больших по размеру нарушений в образцах. Следует отметить, что изменение f_{\max} при использовании продольных волн, как правило, связано с ростом трещин, ориентированных ортогонально направлению распространения колебаний. В этом случае давление, направленное вдоль оси прозвучивания, может воспрепятствовать росту таких трещин.

5.5 Повышение чувствительности ультразвукового способа контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива за счет локального нагрева

Результаты проведенных лабораторных исследований, представленные в п. 5.4, свидетельствуют о существенном влиянии температуры на взаимосвязь механических напряжений и скоростей распространения упругих волн. Рост температуры с одной стороны приводит к общему снижению скоростей, а с другой – увеличивает приращения скоростей, наблюдаемые при изменении давления. Отмеченное является экспериментально-теоретическим базисом для создания методов контроля НДС массива, в которых дополнительное термическое воздействие (стимуляция) используется в качестве инструмента повышения чувствительности УЗ измерений [381]. Особенно заметный эффект может быть достигнут на пористых породах, на которых температурное воздействие приводит к наибольшим приращениям акустической тензочувствительности. При этом также для монолитных пород характерно незначительное изменение скоростей при увеличении механических напряжений в условиях меняющихся температур [329].

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 натуральных 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 зондами, состоящими из ультразвукового и нагревательного модулей. Предварительные исследования показывают, что заметный рост

чувствительности V_p к изменениям σ начинается в большинстве пород при температуре 60-70°[252]. 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 рисунке 5.21. Описанный выше принцип контроля возможно также реализовать в виде каротажных измерений [382].

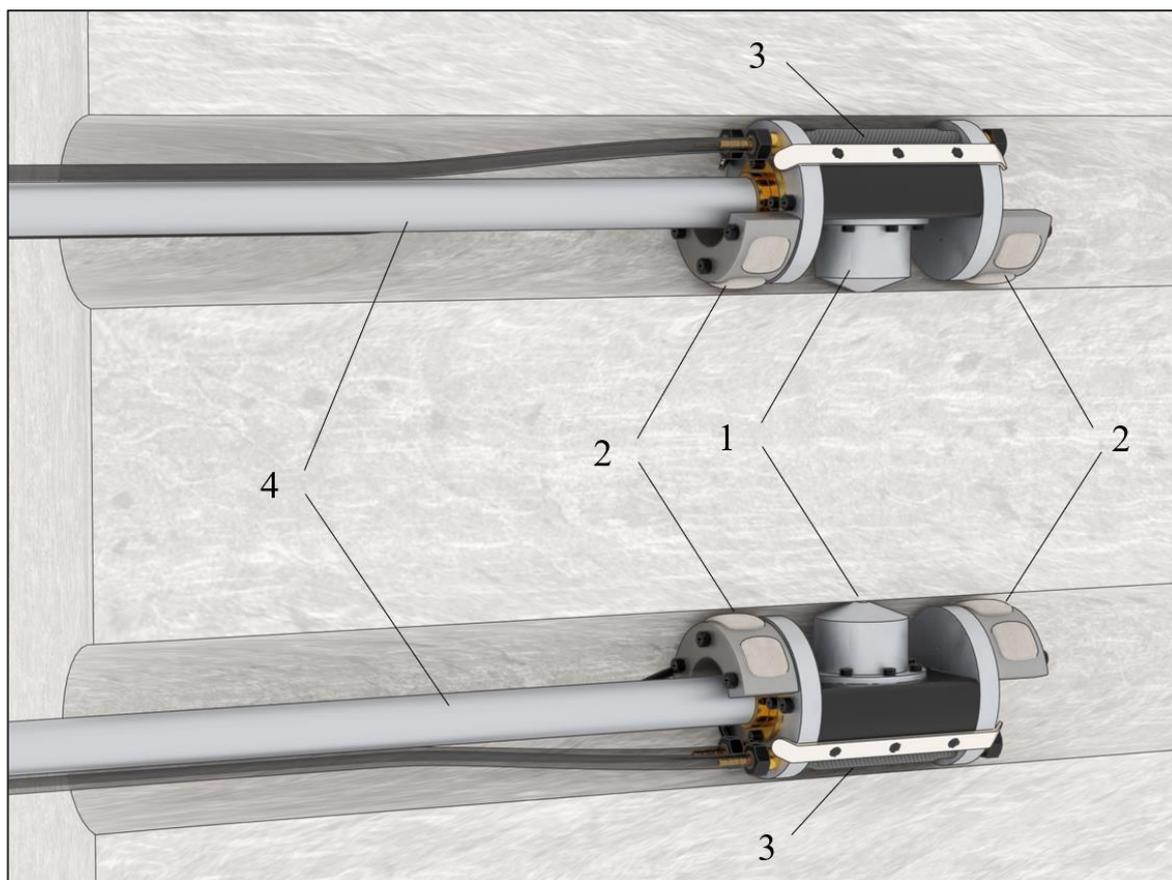


Рисунок 5.21 – Схема реализации метода прозвучивания с локальным нагревом: 1 – акустические преобразователи; 2 – нагревательные элементы; 3 – система пневмоприжима; 4 – досылочные штанги;

Модульная конструкция каротажного ультразвукового зонда, описанного в п. 4.3.1, позволяет без существенных конструктивных изменений снабдить его нагревательными модулями и использовать для реализации описанного выше способа контроля.

Выводы к главе 5

Использование изменения температурных зависимостей скорости распространения упругих волн ультразвукового диапазона частот в геосреде в функции от её напряжённо-деформированного состояния позволяет существенно повысить возможности оценки последнего. В основе указанной идеи лежит явление возрастания акустической тензочувствительности геосреды за счет роста ее поврежденности и ослабления внутрискруктурных упругих связей при возрастающих температурных воздействиях. Для практического использования этой идеи потребовалось произвести целую серию многопараметровых экспериментальных исследований, для реализации которых был разработан и изготовлен оригинальный лабораторный стенд, позволяющий производить прозвучивание образцов горных пород продольными и поперечными волнами ультразвукового диапазона частот в процессе их одновременного механического и термического нагружения. На основе предварительных тестов и результатах компьютерного моделирования обоснован ряд методических аспектов проведения лабораторных экспериментов, в том числе оптимальные режимы и скорости нагружения. Экспериментальное исследование акустических свойств в условиях термобарического нагружения производилось на специально сформированной коллекции образцов горных пород различных генотипов. В результате проведенных исследований установлено влияние температуры, давления и пористости пород на динамические и кинематические характеристики ультразвуковых сигналов, их спектральный состав. Показан различный характер влияния термобарического нагружения на параметры продольных и поперечных волн. Произведена оценка изменения степени поврежденности пород при различных температурах и уровнях механического нагружения. Показано, что повышение температуры приводит к увеличению чувствительности акустических параметров к изменению напряженного состояния пород. Наибольший эффект достигается

в температурном диапазоне 75-100°С в породах с высокой пористостью при использовании поперечных волн. На основе результатов комплексных экспериментальных исследований обоснован, разработан и запатентован метод контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива пород.

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. Решение указанной проблемы имеет важное значение для науки и обеспечения безопасности и непрерывности ведения подземных горных работ.

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

1. 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.
2. 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 дисперсно-наполненных 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.

4. Экспериментально исследовано влияние растягивающих механических напряжений на формирование и проявление акустико-эмиссионных эффектов в ряде лабораторно-синтезированных 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 $V_P(\sigma, T)$ и $V_S(\sigma, T)$. 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 $V_P(\sigma, T)$ и $V_S(\sigma, T)$ 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 методов контроля параметров НДС массива на основе акустических эффектов в искусственных материалах и горных породах. Разработано методическое и аппаратное 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»

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экспериментальное определение полного тензора напряжений в массиве горных пород. Методическое руководство / Отв. ред. Турчанинов И.А. - Апатиты: КФ АН СССР, 1973 - 37 с.
2. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса. М.: ВНИИгеоинформсистем, 1987. 116 с.
3. Haimson B. Borehole breakouts and core diskning as tools for estimating in situ stress in deep holes // Proceedings of the International Symposium Rock Stress, Japan. 1997. - P. 35–43.
4. Nakala M. Numerical study on core damage and interpretation of in situ state of stress. Posiva Report 99-25, 1999. 234 p.
5. Исаев А.В., Запрягаев А.П. Оценка напряженного состояния массива пород по дискованию керна при выбуривании скважин // В сб. Геомеханическая интерпретация результатов натурального эксперимента. / Сб. статей. Новосибирск ИГД СО АН СССР. 1983. - С. 96.
6. Leeman E.. The measurement of stress in rock - Part 1. // J. S. Afr. Inst. Min. Met. 1964. - № 65. - P. 45–114.
7. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. М.: МГГУ, 2012. 111 с.
8. Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах. Часть 1. / ed. Курлени М.. Апатиты, КНЦ РАН, 1996. 161 с.
9. Zoback M. Lou, Zoback M.D., Adams J., Assumpção M., ... Zhizhin M. Global patterns of tectonic stress // Nat. 1989 3416240. Nature Publishing Group, 1989. - Vol. 341. - № 6240. - P. 291–298. DOI: 10.1038/341291a0.
10. Te Kamp L., Rummel F., Zoback M.D. Hydrofrac stress profile to 9 km at the German KTB site // Proceedings of the Workshop on Rock Stresses in the

- North Sea. Trondheim, Norway: NTH and SINTEF Publishers. 1995. - P. 147–153.
11. Shamir G., Zoback M.D. Stress orientation profile to 3.5 km depth near the San Andreas Fault at Cajon Pass, California // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. John Wiley & Sons, Ltd, 1992. - Vol. 97. - № B4. - P. 5059–5080. DOI: 10.1029/91JB02959.
 12. Stephansson O., Savilahti T., Bjarnason B. Rock mechanics of the deep borehole at Gravberg, Sweden // *International Symposium Rock at Great Depth*, vol. 2. Pau, Rotterdam: Balkema. 1989. - P. 863–870.
 13. Lieurance, R.S. (1933) Stresses in foundation at Boulder (Hoover) dam. US Bureau of Reclamation Technical Memorandum No. 346.
 14. Bertrand L. Mesure des contraintes in-situ par la methode du verin plat // *Froc. Seminaire Formation: Mesure des sollicitations et des contraintes dans les ouvrages et dans les terrains*, Ecole des Mines, Nancy. 1994. - P. 12–16.
 15. Heusermann S., Pahl A. Stress measurements in underground openings by the overcoring method and by the flatjack method with compensation // *Froc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics*, Zurich, Balkema, Rotterdam. 1983. - P. 1033–1045.
 16. Mayer A., Habib P., Marchand R. Underground rock pressure testing // *Proc. Int. Con! Rock Pressure and Support in the Workings*, Liege. 1951. - P. 217–221.
 17. Талобр Ж. Механика горных пород. - М.: Госгортехиздат, 1960. 430 с.
 18. Влох Н.П. Результаты исследования проявлений горного давления при подземной разработке железорудных месторождений Урала / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин, СМ. Ушаков // *Вопросы совершенствования систем разработки с понижением уровня горных работ: Материалы научно.*
 19. Сашурин А.Д. Новые методы измерения напряжений в горном массиве на железорудных предприятиях Урала / А.Д. Сашурин, Н.П. Влох, А.В. Зубков // *Вопросы совершенствования систем разработки с понижением уровня горных работ: Материалы научно-технической конфере.*

20. Зубков А.В. Концентрация напряжений на торце буровой скважины / А.В. Зубков, Н.П. Влох, А.Д. Сашурин // Измерение напряжений в массиве горных пород: Сб. науч. тр. - ИГД СО АН СССР. - Новосибирск, 1972. - 113 с.
21. Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Popov S.. Elaboration of parallel borehole method for investigation of stress state and deformation properties in rock masses // Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, Balkema, Rotterdam. 1983. - P. 349–358.
22. Duvall, W.L (1974) Stress relief by center hole. Appendix in US Bureau of Mines Report of Investigation RI 7894.
23. Барях А.А., Еремина Н.А., Асанов В.А. Интерпретация результатов щелевой разгрузки // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций.- Екатеринбург.: ГИ УрО РАН. 1997. - С. 17–22.
24. Аксенов В.К., Курленя М.В., Петров А.И. Разгрузка массива щелью как средство для определения абсолютных напряжений в горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1972. - № 2. - С. 122–124.
25. Влох Н.П., Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. Совершенствование метода щелевой разгрузки // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. Новосибирск. 1980. - С. 30–35.
26. Нестеренко Г.Т. Совершенствование метода разгрузки для определения напряжений в крепких трещиноватых породах // Труды ВНИМИ. - Л. 1966. - № 62. - С. 169–182.
27. Головачев Д.Д. Измерение давления горных пород на рудничную крепь с помощью струнного метода // Труды совещания по управлению горным давлением. 1938. - С. 103–112.
28. Слободов М.А. Опыт применения метода разгрузки при исследовании напряжений в глубине массива // Уголь. 1958. - № 7. - С. 5–10.

29. Влох Н.П., Сашурин А.Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. –М.: Недра, 1970. 120 с.
30. Thompson P.M., Corthesy R., Leite M.H. Rock stress measurements at great depth using the modified doorstopper gauge // Proceedings of the International Symposium Rock Stress, Japan. 1997. - P. 59–64.
31. Leeman E.R. The measurement of stress in rock. A review of recent developments // Proceedings of the International Symposium on the Determination of Stresses in Rock Masses. Lab. Nac. De Eng. Civil, Lisbon. 1971. - P. 200–229.
32. Leeman E.R. The measurement of stress in rock // J S Afr Inst Min Met. 1964. - № 65. - P. 45–114.
33. Leeman E.R. Remote measurement of rock stress under development in South Africa // Eng. Min. J. 1964. - № 9. - P. 10–30.
34. Leeman E.R. Rock stress measurements using the trepanning stress-relieving technique // Mine Quarr. Eng. 1964. - Vol. 30. - № 6. - P. 22–30.
35. Leeman E.R. Measurement of stress in rock, parts I and II // J.S.Afric.Instn Min. Metall. 1965. - № 1965. - P. 15–20.
36. Leeman E.R. The determination of complete state of stress in rock in a single bore-hole-Laboratory and underground measurements // Int.J. Rock-Mech. Min. Sci. 1968. - Vol. 5. - № 1. - P. 31–56.
37. Qin Z., Cao B., Liu Y., Li T. Study on in Situ Stress Measurement and Surrounding Rock Control Technology in Deep Mine // Geofluids. 2020. - Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/8839333.
38. Leijon B.A., Stillborg B.L. A comparative study between two rock stress measurement techniques at Luossavaara mine: // Rock Mech. Rock Eng. 1986. - № 19. - P. 143–163.
39. Kobayashi S. In-situ stress measurement using a conical shaped borehole strain gage plug // Proc. 7th Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Aachen, Balkema, Rotterdam, Vol. I., 1991. - P. 545–548.
40. Leeman E., Hayes D.J. A technique for determining the complete state of

- stress in rock using a single borehole // Proc. 1st Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Lisbon. 1966. - P. 17–24.
41. Hast N. The state of stress in the upper part of the earth's crust // Tectonophysics. 1969. - Vol. 8. - P. 189–211.
 42. Hast N. The measurement of rock pressure in Mines // Sveriges Geol. undersokning, Arsb. 1958. - № 58. - P. 152–170.
 43. Kanagawa T., Hibino S., Ishida T., Hayashi M., Kitahara Y. 4. In situ stress measurements in the Japanese islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1986. - Vol. 23. - № 1. - P. 29–39. DOI: 10.1016/0148-9062(86)91664-5.
 44. Bock H., Foruria V. A recoverable borehole slotting instrument for in-situ stress measurements in rock // Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, Balkema, Rotterdam. 1983. - P. 15–29.
 45. Bock, H. (1993) Measuring in-situ rock stress by borehole slotting, in Comprehensive Rock Engineering (ed. J.A. Hudson), Pergamon Press, Oxford, Chapter 16, Vol. 3, pp. 433-43.
 46. Han J., Zhang H., Liang B., Rong H., ... Ren T. Influence of Large Syncline on In Situ Stress Field: A Case Study of the Kaiping Coalfield, China // Rock Mech. Rock Eng. Springer Vienna, 2016. - Vol. 49. - № 11. - P. 4423–4440. DOI: 10.1007/s00603-016-1039-4.
 47. Clark J.B. A hydraulic process for increasing the productivity of wells // Pet. Trans. Am. Inst. Min. Eng. 1949. - № 186. - P. 1–8.
 48. Kehle R.O. The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing // J Geophys Res. 1964. - Vol. 69. - № 2. - P. 259–273.
 49. Rutqvist J., Tsang C.-F., Stephansson O. Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the of the induced fracture // Int J Rock Mech Min Sci. 2000. - № 37. - P. 107–120.

50. Nur A., NUR A, Nur A. Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks // J. Geophys. Res. John Wiley & Sons, Ltd, 1971. - Vol. 76. - № 76. - P. 2022–2032. DOI: 10.1029/JB076I008P02022.
51. Scheidegger A.E. Stresses in the Earth's crust as determined from hydraulic fracturing data // Geol. und Bauwes. 1962. - № 27. - P. 45–53.
52. Hubbert K.M., Willis D.. Mechanics of hydraulic fracturing // Pet. Trans. AIME, T.P. 4597. 1957. - № 210. - P. 153–156.
53. Qin X., Zhao X., Zhang C., Li P., ... Wang J. Measurement and Assessment of the In-Situ Stress of the Shazaoyuan Rock Block, a Candidate Site for HLW Disposal in Northwest China // Rock Mech. Rock Eng. 2024. DOI: 10.1007/s00603-024-03775-z.
54. Enever J., Walton R.J., Wold M.B. Scale effects influencing hydraulic fracture and overcoring stress measurements // Proc. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen, Norway, Balkema, Rotterdam. 1990. - P. 317–326.
55. Леонтьев А.В. Об особенностях метода измерительного гидроразрыва при контроле напряжений в шахтных условиях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. - № 1. - С. 104–110.
56. Леонтьев А.В. Измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» и опыт его применения в практике геомеханических исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. - № 12. - С. 75–107.
57. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства. М.: Недра, 1989. 446 с.
58. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1994. - № 1. - С. 3–20.
59. Cornet F.H.H., Valette B.I. In situ stress determination from hydraulic injection test data // J. Geophys. Res. Solid Earth. 1984. - Vol. 89. - № 89. -

- P. 11527–11537. DOI: 10.1029/JB089iB13p11527.
60. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. - Vol. 40. - № 7–8. - P. 975–989. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2003.07.003.
 61. Cornet F.H., Li L., Hulin J.P., Ippolito I., Kurowski P. The hydromechanical behaviour of a fracture: an in situ experimental case study // *International J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. - № 2003. - P. 1257–1270.
 62. Ljunggren C., Raillard G. In-situ stress determination by hydraulic tests on pre-existing fractures at Gidea test site, Sweden. (Research Report TULEA 1986:22. Lulea University, Sweden, 1986. 77 p.
 63. Bjarnason B., Raillard G. Rock stress measurements in borehole V3. Stripa Project 87-13. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1987. 40 p.
 64. Ljunggren C. Rock stress measurements by means of hydraulic methods at Hastholmen, 1998–1999. Working Report 99-54, . Posiva Oy, Finland, 1999. 63 p.
 65. Stephansson O. Rock stress measurement by sleeve fracturing // *Proc. 5th Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM)*, Melbourne, Balkema, Rotterdam. 1983. - P. F129-137.
 66. Amadei B, Stephansson O. *Rock stress and its measurement*. London: Chapman & Hall; 1997. 499 p.
 67. Teufel L. Determination of in-situ stress from partial anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes. In: *Lecture notes of the short course in modern in situ stress measurement methods // 34th US Symposium on Rock Mechanics*, Madison. 1993. - P. 19–23.
 68. Lin W., Kwaśniewski M., Imamura T., Matsuki K. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth // *Tectonophysics. SPE*, 2006. - Vol. 426. - № 1–2. - P. 221–238. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.02.019.
 69. Западнинский А.П. Измерения изменений горного давления в массиве универсальным тензометром напряжений Кемеровского горного

- института ТУ-КГИ-1 / Западнинский А.П. // Сб. науч. тр. Кемеровского горного института. - Кемерово: Кн. изд-во, 1956. - Вып. 2. - С.
70. Морозов К.В., Цирель С.В., Куранов А.А. Мониторинг деформаций массива горных пород вокруг выработок как часть системы прогнозирования динамических явлений при отработке удароопасных месторождений // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Сборник научных трудов. — СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2017. - С. 358–363.
 71. Morozov K.V. Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits // 14th International congress on rock mechanics and rock engineering. 2020. - P. 1318–1323.
 72. Blackwood R.L., Buckingham C. A remotely operated deformation gauge for monitoring stress change in rock // Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, Centek Publ., Lulea. 1986. - P. 369–374.
 73. Gregory E., Kim K. Preliminary results from the full-scale heater tests at the nearsurface test facility // Proc. 22nd US Symp. Rock Mech., Cambridge, MIT Publ. 1981. - P. 143–148.
 74. Leeman E.. Measurement of stress in abutments at depth // Proc. Int. Conf Strata Control, Paris. 1960. - P. 301–314.
 75. Mao N.-H. A new approach for calibration and interpretation of IRAD gage vibrating-wire stressmeters // Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, Centek Publ., Lulea. 1986. - P. 499–508.
 76. Herget G. Monitoring equipment for the determination of stress redistribution // Proc. Conf on Stresses in Underground Structures, Ottawa, CANMET. 1990. - P. 175–184.
 77. Sellers J.B. The measurement of stress change in rock using the vibrating wire stressmeter // Proc. Symp. on Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, Balkema, Rotterdam, Vol. 1. 1977. - P. 275–288.
 78. Переверзев М.П. Деформометр ДН для изучения напряженного состояния горных пород / М.П. Переверзев, Ю.П. Федченко, П.В.

- Максимов // Уголь Украины. - 1966. - № 7.
79. Барковский В.М. Струнный тензометр типа ДС-3 для измерения поперечных деформаций скважин. / В.М. Барковский // ВНИМИ. - Л., 1966. - №66.
 80. Булычев Н.С. Новый прибор для исследования напряженного состояния горных пород в массиве / Н.С. Булычев // Научная и техническая информация. - М.: Углетехиздат, 1958. - № 2.
 81. Bois A.-P., Ballivy G., Saleh K. Monitoring stress changes in three dimensions using a solid cylindrical cell // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1994. - № 31. - С. 707–718.
 82. Walton R.J., Worotnicki G. A comparison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time // Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, Centek Publ., LuleA. 1986. - С. 479–188.
 83. Lingle R., Nelson P.H. In-situ measurements of stress change induced by thermal load: a case history in granitic rock // Proc. 23rd US Symp. Rock Mech., Berkeley, SME/ AIME. 1982. - С. 837–845.
 84. Федоренко В.К. Лабораторные испытания скважинных гидравлических датчиков // Измерение напряжений в массиве горных пород. 1974. - С. 113–117.
 85. Аксенов В.К., Курленя М.В., Акимов В.С. No Title // Измерение напряжений в массиве горных пород. 1970. - С. 102–111.
 86. Аксенов В.К., Курленя М.В., Попов С.Н. Общий случай взаимодействия гидравлического датчика с горными породами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1977. - № 1. - С. 70–74.
 87. Аксенов В.К., Курленя М.В. Некоторые особенности техники измерения напряжений в породном массиве гидравлическими датчиками // Измерение напряжений в массиве горных пород. 1972. - № 1. - С. 159–167.
 88. Аксенов В.К., Курленя М.В. Аппаратура для исследования

- напряженного состояния массива горных пород методом разности давлений // Измерение напряжений в массиве горных пород. 1968. - № 1. - С. 134–142.
89. Barron K. Glass insert stressmeter // *Trans. Am. Inst. Min. Eng.* 1965. - P. 287–299.
90. Coutinho A. Theory of an experimental method for determining stresses not requiring an accurate knowledge of the elasticity modulus // *Proc. Int. Ass. Bridge and Struct. Eng. Cong., Liege.* 1949. - P. 83–103.
91. Wilson A.H. A laboratory investigation of a high modulus borehole plug gage for the measurement of rock stress // *Proc. 4th US Symp. Rock Mech., University Park, Pennsylvania State University Publ.* 1961. - P. 185–195.
92. Peng S.S., Su W.H., Okubo S. A low cost stressmeter for measuring complete stress changes in underground mining // *Geotech. Test. I.* 1982. - № 5. - P. 50–53.
93. Roberts A., Hawkes I., Williams F.T., Dhir R.K. A laboratory study of the photoelastic stressmeter // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1964. - Vol. 1. - № 3. - P. 441–458. DOI: 10.1016/0148-9062(64)90010-5.
94. Skilton D. Behavior of rigid inclusion stressmeters in viscoelastic rock // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1971. - № 8. - P. 283–289.
95. Hawkes I. Stress evaluation in low-modulus and viscoelastic materials using photoelastic glass inclusions // *Expl. Mech.* 1969. - № 9. - P. 58–66.
96. Hawkes I., Fellers G.E. Theory of the determination of the greatest principal stress in a biaxial stress field using photoelastic hollow cylinder inclusions // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1969. - Vol. 6. - № 2. - P. 143–158. DOI: 10.1016/0148-9062(69)90032-1.
97. Hiramatsu Y., Niwa Y., Oka Y. Measurement of Variation in Stress by a Photoelastic Stressmeter // *J. Soc. Mater. Sci. Japan.* 1965. - Vol. 14. - № 141Appendix. - P. 486–491. DOI: 10.2472/jsms.14.141Appendix_486.
98. Трумбачев В.Ф., Катков Г.А. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий. -М.: Наука, 1966. 115 с.

99. Кулаков Г.И. Использование фотоупругих датчиков в методе полной разгрузки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1980. - № 5. - С. 116–120.
100. Грицко Г.И., Сенук Д.П., Кулаков Г.И. Об измерении напряжений в упруго-наследственной среде с помощью фотоупругих датчиков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1970. - № 3. - С. 100–103.
101. Шрепп Б.В., Бояркин В.И., Свечников В.Ф. Изучение напряженного массива с использованием фотоупругих тензометров и оптических датчиков // Измерение напряжений в массиве горных пород - ИГД СО АН СССР - Новосибирск. 1972. - С. 221–223.
102. Методические рекомендации по измерению напряжений с помощью фотоупругих датчиков. - Свердловск, 1972.- 49 с.
103. Гужова С.В., Кулаков Г.И. Теоретические основы метода полной разгрузки с фотоупругим датчиком // Измерительная техника. 1999. - № 4. - С. 27–36.
104. Гужова С.В., Кулаков Г.И. К вопросу об экспериментальной оценке условий сопряжения в контактных задачах геомеханики // еодинамика и напряженное состояние недр земли. — Новосибирск. 2000. - С. 32–37.
105. Bonnechere F., Fairhurst C. Results of an in situ comparison of different techniques for rock stress determination // Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil, Lisbon. 1971. - P. 334–358.
106. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems // Proc. Roy. Soc. 1957. - № 241. - P. 376–396.
107. Niwa Y., Hirashima K.I. The theory of the determination of stress in an anisotropic elastic medium using an instrumented cylindrical inclusion // Mem. Fac. Eng. 1971. - № 33. - P. 221–232.
108. Арцыбашев В.А. Гамма-метод измерения плотности. М., Атомиздат, 1965. - 204 с.

109. Борис И.Н., Авсарагов Х.Б. Ядерно-геофизические методы опробования при добыче и переработки минерального сырья. –Л., Наука, 1972. - 149 с.
110. Шимон Л., Сибек В. Применение радиоактивных изотопов для определения изменений напряжений в горных породах. – В кн: Физика и технология разработки рудных месторождений в Заполярье. Л., Наука, 1967, с. 74 - 77.
111. Колесников В.П., Геник И.В., Пронин В.П. Опыт применения низкочастотных методов электроразведки в шахтных условиях Верхнекамского месторождения калийных солей // горная наука на рубеже XXI века. Екатеринбург, 1998, с. 330-335.
112. Линецкий А. П. Исследование напряженно деформированного состояния кровли выбросоопасного угольного пласта электрометрическим методом.// Управление горным давлением и борьба с горными ударами. -Л., 1980, с. 109-111.
113. Тарасов Б. Г., Дырдин В. В. Исследование зависимости электрофизических свойств каменных углей от механических напряжений.// Подземная разработка мощных угольных пластов: Межвузов, сб. Кемерово. - Вып. 3. -1976, с. 166-184.
114. Тарасов, Б.Г. Использование геоэлектрических полей в горном деле / Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В. Иванов. – К. 1974, – 203 с.
115. Дырдин, В.В. Исследование геоэлектрических полей с целью разработки оперативного метода оценки напряженного состояния призабойных зон угольного массива [Текст]: автореф. канд. дисс./ В.В. Дырдин. – К. 1975.
116. Тарасов, Б.Г. Геотектонические процессы и аномалии квазистационарного электрического поля в земной коре / Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В. Иванов.// ДАН СССР 1990. Т. 312. №5. – с. 1092 – 1095.
117. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В. Геоэлектрический контроль

состояния массивов. – М.: Недра, – 1983 г. – 216 с.

118. Шиканов, А. И. Электрометрический контроль краевых зон угольных пластов / А. И. Шиканов, А. В. Дягилева, В. В. Дырдин. – К. издво КузГТУ 2000, – 254 с.
119. А.С. № 622987 С1 (RU), МКИ Е 21С 39/00 Способ определения зоны напряженного состояния горного массива / Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, Б. К. Кретов, В. В. Иванов, В. И. Мурашов. – № 2039977/22–03; Заявл. 02.07.74; Опубл. 05.09.78; Бюл. № 33.
120. А.С. № 723131 С1 (RU), МКИ Е 21С 39/00 Способ определения стадий, предшествующих опасным проявлениям горного давления / В.Г. Кожевин, Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.М. Станкус, В.М. Силонов, И.Д. Степанов, А.И. Шиканов. – № 2421306/22 – 03; Заявл. 18.11.76;
121. Патент 1797668 Способ текущего контроля удароопасности горных выработок// КузПИ/ В.В. Дырдин, П.В. Егоров, Н.Н. Демидова; опубл. 23.02.93. бюл. 7.
122. Teisseyre R. Generation of electric field in an earthquake preparation zone // Ann. Geophys. 1997. - Vol. XL. - № 2. - P. 297–304.
123. Dologlou E. Power law relationship between parameters of earthquakes and precursory electrical phenomena revisited // NHES. 2009. - № 9. - P. 17–23.
124. Uyeshima M., Kinoshita M., Iino H., Uyeda S. Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1989. - Vol. 64. - P. 487–515.
125. Fu Z., Zhang Y., Ji H., Zhang C., ... Qin Y. Characteristics of resistivity variation in deep granite and in-situ detection applications // Sci. Rep. 2024. - Vol. 14. - № 1. - P. 6120. DOI: 10.1038/s41598-024-56695-x.
126. Stepanov A.W. Uber den mechanismus der plastischen deformation // Phys. Z. Sov. Union. 1933. - № 4. - P. 609–627.
127. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов. А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно - неоднородных

- горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. - № 4. - С. 59–65.
128. Пимонов А.Г., Иванов В.В. Имитационная модель процесса трещинообразования в очагах разрушения горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. - № 3. - С. 34–37.
129. Курленя М.В., Вострецов А.. О прогнозе разрушения горных пород на основе регистрации импульсов электромагнитного излучения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. - № 3. - С. 41–52.
130. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine // J. Geophys. Eng. 2018. - Vol. 15. - № 3. - P. 909–920. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa3ce.
131. Qiu L., Li Z., Wang E., Liu Z., ... Xia S. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst // J. Loss Prev. Process Ind. 2018. - Vol. 54. - P. 206–215. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.004.
132. Greiling R.O., Obermeyer H. Natural electromagnetic radiation (EMR) and its application in structural geology and neotectonics // J. Geol. Soc. India. 2010. - Vol. 75. - № 1. - P. 278–288. DOI: 10.1007/s12594-010-0015-y.
133. Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л., Набатов В.В., Куткин Я.О. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. - № 8. - С. 64–70.
134. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Z., ... Xu Z. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR // J. Geophys. Eng. 2017. - Vol. 14. - № 4. - P. 949–959. DOI: 10.1088/1742-2140/aa6dde.

135. Romanevich K. V., Lebedev M.O., Andrianov S. V., Mulev S.N. Integrated Interpretation of the Results of Long-Term Geotechnical Monitoring in Underground Tunnels Using the Electromagnetic Radiation Method // Foundations. 2022. - Vol. 2. - № 3. - P. 561–580. DOI: 10.3390/foundations2030038.
136. Green G. An Essay on the Determination of the Exterior and Interior attractions of Ellipsoids of Variable Densities // Mathematical Papers of George Green, New York, Chelsea, 1828, pp. 395-429.
137. Murnaghan F.D. The compressibility of media under extreme pressures // Proc. Natl. Acad. Sci. 1944. - Vol. 30. - № 9. - P. 244–247.
138. Murnaghan F.D. Finite deformations of an elastic solid // Am. J. Math. 1937. - Vol. 59. - № 2. - P. 235–260.
139. Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids // Phys. Rev. 1953. - Vol. 92. - № 5. - P. 1145–1149.
140. Benson R.W., Raelson V.J. Acoustoelasticity // Prod. Eng. 1959. - Vol. 30. - № 29. - P. 56–59.
141. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. 208 с.
142. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. Кишинев: Штиинца, 1991. 204 с.
143. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуща О. И. Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 148 с.
144. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.: ил.
145. Никитина Н.Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития Национальная Технологическая Группа. 2010. - № 4. - С. 18–28.
146. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Родюшкин В.М.

- Исследование дефектной структуры металла методом ультразвукового зондирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. - № 1. - С. 109–114.
147. Ерофеев В.И., Никитина Е.А., Хазов П.А. Дисперсия и затухание акустической волны, распространяющейся в поврежденном материале // Приволжский научный журнал. 2014. - № 4. - С. 22–28.
148. Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом // Акустический журнал. 2010. - Vol. 56. - № 4. - С. 554–557.
149. Castellano A., Fraddosio A., Piccioni M.D. Ultrasonic goniometric immersion tests for the characterization of fatigue post-LVI damage induced anisotropy superimposed to the constitutive anisotropy of polymer composites // Compos. Part B Eng. 2017. - № 116. - P. 122–136.
150. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы. М.- МГИ, 1990. – 104 с.
151. Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1967. - Vol. 4. - № 4. - P. 395–406. DOI: 10.1016/0148-9062(67)90030-7.
152. Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. 1966. - Vol. 71. - № 16. - P. 3939–3953. DOI: 10.1029/JZ071i016p03939.
153. Serati M., Alehossein H., Williams D.J. Estimating the tensile strength of super hard brittle materials using truncated spheroidal specimens // J. Mech. Phys. Solids. 2015. - Vol. 78. - P. 123–140. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.02.011.
154. Lajtai E.Z. Brittle fracture in compression // Int. J. Fract. Kluwer Academic Publishers, 1974. - Vol. 10. - № 4. - P. 525–536. DOI: 10.1007/BF00155255/METRICS.
155. Stacey T.R. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1981. - Vol. 18. - № 6. - P.

- 469–474. DOI: 10.1016/0148-9062(81)90511-8.
156. Чумичев А.М. Методы и средства контроля свойств и состояния сред. М.: МГГУ, 1999. – 173 с.
157. He J., Serati M., Veidt M., De Alwis A. Determining rock crack stress thresholds using ultrasonic through-transmission measurements // *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2024. - Vol. 11. - № 1. - P. 19. DOI: 10.1007/s40789-024-00669-x.
158. Martin C.D., Kaiser P.K., McCreath D.R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels // *Can. Geotech. J.* 1999. - Vol. 36. - № 1. - P. 136–151. DOI: 10.1139/t98-072.
159. Cai M., Kaiser P.K. In-situ Rock Spalling Strength near Excavation Boundaries // *Rock Mech. Rock Eng.* 2014. - Vol. 47. - № 2. - P. 659–675. DOI: 10.1007/s00603-013-0437-0.
160. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R.S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock // *Can. Geotech. J.* 1998. - Vol. 35. - № 2. - P. 222–233. DOI: 10.1139/t97-091.
161. Entwisle D.C., Hobbs P.R.N., Jones L.D., Gunn D., Raines M.G. The Relationships between Effective Porosity, Uniaxial Compressive Strength and Sonic Velocity of Intact Borrowdale Volcanic Group Core Samples from Sellafield // *Geotech. Geol. Eng.* 2005. - Vol. 23. - № 6. - P. 793–809. DOI: 10.1007/s10706-004-2143-x.
162. Chawre B. Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2018. - Vol. 10. - № 3. - P. 594–602. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.01.006.
163. Ржевский В.В. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков. - М.: Наука. 1973. – 224 с.
164. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Бобров А.В. О количественной оценке микротрещиноватости горных пород ультразвуковым велосимметрическим методом // *Физико-технические проблемы*

- разработки полезных ископаемых. 1985. - № 4. - С. 110–114.
165. Данилов В.Н., Шкуратник В.Л., Сирота Д.Н. Зависимость между акустическими характеристиками и напряжениями в массиве горных пород // Известия вузов. Горный журнал. 1988. - № 2. - С. 1–4.
166. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизические методы контроля в угольных шахтах и тоннелях. М.: Недра, 1982. – 224 с.
167. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. - 456 с.: ил.
168. Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах. Часть 1. Под ред. М.В Курлени. Апатиты, КНЦ РАН, 1996. 161 с.
169. Scott, D. F., Williams, T. J., Tesarik, D. R., Denton, D. K., Knoll, S. J., Jordan, J. Geophysical Methods to Detect Stress in Underground Mines, National Institute for Occupational Safety and Health, Spokane, WA, USA, Rep. RI 9661, 2004.
170. Deak F., Perras M.A., Bakai J., Török Á. In-situ Primary Stress Detection Based on Seismic Tomography Measurements and Numerical Back-analysis for an Underground Radwaste Repository // Period. Polytech. Civ. Eng. 2022. DOI: 10.3311/PPci.20867.
171. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Панов А.В., Карчевский А.Л. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах // Сибирский журнал индустриальной математики. 2012. - Vol. 15. - № 4(52). - С. 102–109.
172. Sato T., Kikuchi T., Sugihara K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan // Eng. Geol. 2000. - Vol. 56. - № 1–2. - P. 97–108. DOI: 10.1016/S0013-7952(99)00136-2.
173. Бабкин А.И., Ахматов А.Е. Согласование натуральных и лабораторных сейсморазведочных оценок напряженно деформированного состояния

- массива // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. - № 5. - С. 72–77.
174. Stewart R.R., Huddleston P.D., Kan T.K. Seismic versus sonic velocities: A vertical seismic profiling study // GEOPHYSICS. 1984. - Vol. 49. - № 8. - С. 1153–1168. DOI: 10.1190/1.1441745.
175. Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. Изд. Наука, Москва, 1964, - 84 с.
176. Bai X., Zhang D., Wang H., Li S., Rao Z. A novel in situ stress measurement method based on acoustic emission Kaiser effect: a theoretical and experimental study // R. Soc. Open Sci. 2018. - Vol. 5. - № 10. - P. 181263. DOI: 10.1098/rsos.181263.
177. Jiang Q., Feng X.-T., Xiang T.-B., Su G.-S. Rockburst characteristics and numerical simulation based on a new energy index: a case study of a tunnel at 2,500 m depth // Bull. Eng. Geol. Environ. 2010. - Vol. 69. - № 3. - P. 381–388. DOI: 10.1007/s10064-010-0275-1.
178. Yang W., Lin B., Xu J. Gas outburst affected by original rock stress direction // Nat. Hazards. 2014. - Vol. 72. - № 2. - P. 1063–1074. DOI: 10.1007/s11069-014-1049-z.
179. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве. Турчанинов И.А., Панин В.И. Изд-во “Наука”, Ленингр. отд. Л., 1976. 164 с.
180. Xu K., Dai J., Feng J., Wang B., ... Wang S. Predicting 3D heterogeneous in situ stress field of Gaoshangpu Oilfield northern area, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China // Arab. J. Geosci. 2020. - Vol. 13. - № 1. - P. 43. DOI: 10.1007/s12517-019-5043-3.
181. Vreede F. Critical Study of the Method of Calculating Virgin Rock Stresses from Measurement Results of the CSIR Triaxial Strain Cell. Research report. National Mechanical Engineering Research Institute; 1981.
182. Michael A.J. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study // J Geophys Res. 1987. - Vol. 92. - № B1. - P. 357–368.

183. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 1984. - Vol. 89. - № B11. - P. 9305–9320. DOI: 10.1029/JB089iB11p09305.
184. Chen G., Liu X., Song D. Research on in situ stress inversion of deep-buried tunnel based on pressure/tension axis mechanism and geological structure // *Deep Undergr. Sci. Eng.* 2023. - Vol. 2. - № 1. - P. 61–73. DOI: 10.1002/dug2.12025.
185. Hardy, Jr. H.R. *Acoustic Emission/Microseismic Activity*. CRC Press, 2003. 300 p. DOI: 10.1201/9780203971109.
186. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zug-beanspruchung von metallischen Werkstoffen // *Arch. für das Eisenhüttenwes.* 1953. - Vol. 24. - № 1/2. - P. 43–45.
187. Holcomb D., Martin R. Determining peak stress history using acoustic emissions // *Proceedings of 26th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam. 1985. - P. 715–722.
188. Li C. A Theory for Kaiser Effect and Its Potential Applications // *Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials*, Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications. 1998. - P. 171–185.
189. A. Tang, □Z. H. Chen, & C. A Theoretical Model for Kaiser Effect in Rock // *Pure Appl. Geophys.* 1997. - Vol. 150. - № 2. - P. 203–215. DOI: 10.1007/s000240050073.
190. Yuan R., Li Y. Theoretical and experimental analysis on the mechanism of the Kaiser effect of acoustic emission in brittle rocks // *J. Univ. Sci. Technol. Beijing, Miner. Metall. Mater.* 2008. - Vol. 15. - № 1. - P. 1–4. DOI: 10.1016/S1005-8850(08)60001-8.
191. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle // *J. Geophys. Res.* 1983. - Vol. 88. - № B11. - P. 9485–9492.
192. Holcomb D.J. General theory of the Kaiser effect // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1993. - Vol. 30. - № 7. - P. 929–935.

193. Pestman B.J., van Munster J.G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone // Mech. Min. Sci. Geomech. 1996. - Vol. 33. - № 6. - P. 585–593.
194. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks // Rock Mech. Rock Engng. 1993. - Vol. 26. - № 4. - P. 333–351.
195. Stevens J.L., Holcomb D.J. A theoretical investigation of the sliding crack model of dilatancy // J. Geoph. Res. 1980. - Vol. 85. - P. 7091–7100.
196. Шкуратник В.Л. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели / В.Л. Шкуратник, А.В. Лавров. – М.: Издательство Академии горных наук, 1997. – 159 с.
197. Lord A.E., Koerner R.M. Field determination of prestress (existing stress) in soil and rock masses using acoustic emission // J. Acoust. Emiss. 1985. - Vol. 4. - № 1. - P. S11–S16.
198. McElroy J.J., Koerner R.M., Lord A.E. An acoustic jack to assess in situ rock behavior // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1985. - Vol. 22. - P. 21–29.
199. Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляных породах: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Токсаров Валерий Николаевич. – Пермь, 2000. – 18 с.
200. Токсаров В.Н. Оценка геомеханического состояния краевых частей массива скважинными гидравлическими датчиками / В.Н. Токсаров // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. 19-23 апр.
201. Асанов В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния целиков Верхнекамского калийного месторождения / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, И.Л. Паньков // Проблемы механики горных пород: Труды XI-й Российской конференции по механике горных пород, Санкт-Петербур.
202. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Бельтюков Николай Леонидович. -

- Пермь, 2018. - 20 с.
203. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Натурные исследования напряженного состояния пород приконтурного массива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. - Vol. 15. - № 20. - С. 270–276.
204. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Особенности поведения кровли выработок на южном фланге Верхнекамского месторождения калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. - № 1. - С. 84–88.
205. Асанов В.А., Евсеев А.В., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. - № 10. - С. 144–148.
206. Jingen D., Kangping W., Rongzun H. In-situ stress determination at great depth by using acoustic emission technique // Proceedings of the 35th US Symposium on Rock Mechanics, Reno. 1995. - P. 245–250.
207. Seto M., Villaescusa E. In situ stress determination by acoustic emission techniques from McArthur River mine cores. // Proceedings of 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart, Australia. 1999. - P. 929–934.
208. Seto M., Utagawa M., Katsuyama K., Kiyama T. In Situ Stress determination using AE and DRA techniques // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1998. - Vol. 35. - № 4–5. - P. 458–459. DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00118-1.
209. Villaescusa E., Li J., Seto M. Stress measurements from oriented core in Australia // Proceedings 5th International Workshop on the applications of geophysics in rock engineering, Toronto, Canada. 2002. - P. 71–77.
210. Kent L., Bigby D., Coggan J., Chilton J. Comparison of acoustic emission and stress measurement results to evaluate the application of the Kaiser effect

- for stress determination in underground mines // Proceedings of the 21st International Conference on ground control in mining, Morgantown, West Virginia, USA. 2002. - P. 270–277.
211. Wang H.T., Xian X.F., Yin G.Z., Xu J. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser effect // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2000. - Vol. 37. - № 3. - P. 543–547. DOI: 10.1016/S1365-1609(99)00081-7.
212. Yang D., Ning Z., Li Y., Lv Z., Qiao Y. In situ stress measurement and analysis of the stress accumulation levels in coal mines in the northern Ordos Basin, China // Int. J. Coal Sci. Technol. 2021. - Vol. 8. - № 6. - P. 1316–1335. DOI: 10.1007/s40789-021-00407-7.
213. Асанов В.А., Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера // Труды Межд. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 4-7 октября 1999 г. – Новосибирск. 1999. - С. 147–151.
214. Николенко П.В. Экспериментальное исследование эффекта Кайзера в некоторых композиционных материалах // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». 2012. - № 1. - С. 337–340.
215. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Об использовании эффекта Кайзера в эпоксидной смоле с кварцевым наполнителем для оценки напряжений в массиве горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. - № ОВ1. - С. 97–104.
216. Николенко П.В. Обоснование и разработка методов и средств контроля напряжений в массиве на основе эффектов памяти в композиционных материалах: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Николенко Петр Владимирович. – Москва, 2013. – 22 с.
217. Стаховская З.И. Влияние пористости на изменение упругих и прочностных свойств горных пород при разных давлениях. / Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. - М.:

- Наука, 1968.
218. Турчанинов И.А., Панин В.И. Применение ультразвукового метод для определения напряжений в массиве пород. - Изв. АН СССР, Физика Земли, 1969, №6.
219. Tocher D. Anisotropy in rocks under simple compression // Eos, Trans. Am. Geophys. Union. 1957. - Vol. 38. - № 1. - P. 89–94. DOI: 10.1029/TR038i001p00089.
220. Singh B. The behaviour of rocks under pressure. — Colliery Guardian, 1960. № 5202.
221. Силаева О.И. Ультразвуковые исследования зависимости упругих свойств горных пород от давления. — В кн.: Физико-механические свойства горных пород перхной части Земной коры. М., «Наука», 1908.
222. Ловчиков А.В., Удалов А.Е., Белявский Ю.Г. Напряженное состояние пород в верхних слоях земной коры по данным натурных измерений в рудниках вблизи скважины СГ-3 // Вестник МГТУ. 2007. - Vol. 10. - № 2. - С. 267–272.
223. Ляшенко В.И., Скипочка С.И., Яланский А.А., Паламарчук Т.А. Безопасности горных работ - надежное геомеханическое и приборное обеспечение // Безопасность труда в промышленности. 2012. - № 9. - С. 68–77.
224. Тажибаев К.Т., Тажибаев Д.К. Поляризационно-акустический метод определения остаточных и действующих напряжений горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. - № 11. - С. 153–161.
225. Jiang H., Zhang J., Jiang R. Stress Evaluation for Rocks and Structural Concrete Members through Ultrasonic Wave Analysis: Review // J. Mater. Civ. Eng. 2017. - Vol. 29. - № 10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001935.
226. Niederleithinger E., Sens-Schönfelder C., Grothe S., Wiggenhauser H. Coda wave interferometry used to localize compressional load effects in a concrete

- specimen // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014 - 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society. 2014. - P. 1427–1433.
227. Wang X., Niederleithinger E., Hindersmann I. The installation of embedded ultrasonic transducers inside a bridge to monitor temperature and load influence using coda wave interferometry technique // *Struct. Heal. Monit.* 2022. - Vol. 21. - № 3. - P. 913–927. DOI: 10.1177/14759217211014430.
228. Niederleithinger E., Wunderlich C. Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete // *AIP Conference Proceedings*. 2013. - P. 390–397.
229. Larose E., Hall S. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse ultrasound // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. - Vol. 125. - № 4. - P. 1853–1856. DOI: 10.1121/1.3079771.
230. Wiggenhauser H., Niederleithinger E. Innovative Ultrasonic Techniques for Inspection and Monitoring of Large Concrete Structures // *EPJ Web Conf.* / ed. L'Hostis V., Gens R. 2013. - Vol. 56. - P. 04004. DOI: 10.1051/epjconf/20135604004.
231. Zhang Y., Larose E., Moreau L., D'Ozouville G. Three-dimensional in-situ imaging of cracks in concrete using diffuse ultrasound // *Struct. Heal. Monit.* 2018. - Vol. 17. - № 2. - P. 279–284. DOI: 10.1177/1475921717690938.
232. Турчанинов И.А., Марков Г.А. Влияние новейшей тектоники на напряженное состояние пород в Хибинских апатитовых рудниках // *Изв. АН СССР, Физика Земли*. 1966. - № 8. - С. 1–15.
233. Зурабишвили, И.И. Геофизические исследования напряженно-деформированного состояния горного массива при разработке рудных месторождений пластового типа: научное издание / И. И. Зурабишвили, Н. Р. Надирашвили, Э. Д. Матарадзе, 1971. - 124 с.
234. Осипова Б.А. Результаты применения импульсного сейсмического метода измерения горного давления на Нахичеванском руднике // *Изв. АН СССР, Физика Земли*. 1967. - № 10. - С. 56–67.

235. Abdi Y., Khanlari G.-R., Jamshidi A. Correlation Between Mechanical Properties of Sandstones and P-Wave Velocity in Different Degrees of Saturation // *Geotech. Geol. Eng.* 2024. - Vol. 42. - № 1. - P. 665–674. DOI: 10.1007/s10706-018-0721-6.
236. Kahraman S., Fener M., Kilic C.O. Estimating the Wet-rock P-wave Velocity from the Dry-rock P-wave Velocity for Pyroclastic Rocks // *Pure Appl Geophys.* 2017. - Vol. 174. - № 7. - P. 2621–2629.
237. Karakul H., Ulusay R. Empirical Correlations for Predicting Strength Properties of Rocks from P-wave Velocity Under Different Degrees of Saturation // *Rock Mech. Rock Eng.* 2013. - № 46. - P. 981–999.
238. Углов В.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов; отв. ред. Ф.М. Митенков. – М.: Наука, 2009. – 279 с.
239. Chryssanthakis P., Westerdahl H., Rose E., Rhett D., Pederson S. High temperature triaxial tests with ultrasonic measurements on Ekofisk chalk // *20th Century Lessons, 21st Century Challenges. OnePetro*, 1999. - P. 573–578.
240. Wu G., Wang Y., Swift G., Chen J. Laboratory Investigation of the Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Sandstone // *Geotech. Geol. Eng.* 2013. - Vol. 31. - № 2. - P. 809–816. DOI: 10.1007/s10706-013-9614-x.
241. Ostadhassan M., Tamimi N. Mechanical Behavior of Salt Rock at Elevated Temperature // *48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. 2014. - P. 1473–1480.
242. Zhang R., Jing L., Ma Q. Experimental Study on Thermal Damage and Energy Evolution of Sandstone after High Temperature Treatment // *Shock Vib.* 2018. - Vol. 2018. - P. 1–9. DOI: 10.1155/2018/3845353.
243. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
244. Huang T., Bobyr M. A Review of Delamination Damage of Composite

- Materials // J. Compos. Sci. 2023, Vol. 7, Page 468. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. - Vol. 7. - № 11. - P. 468. DOI: 10.3390/JCS7110468.
245. 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. DOI: 10.1134/S1062739114060118.
246. Николенко П.В., Цариков А.Ю. Лабораторный стенд для механических и акустико-эмиссионных испытаний образцов композиционных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. - № 4. - С. 237–278.
247. 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 информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. - № 8. - С. 198–203.
248. Chemistry and Technology of Epoxy Resins // Chem. Technol. Epoxy Resins. Springer Netherlands, 1993. DOI: 10.1007/978-94-011-2932-9.
249. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины: Справочник. – М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
250. 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.
251. 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.
252. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., М.Д. Ч. Особенности изменения скоростей продольных и поперечных волн в образцах осадочных горных пород, подвергаемых термобарическим воздействиям // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. - № 7. - С. 5–13.
253. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Обоснование метода ультразвукового корреляционного каротажа для структурной диагностики кровли горных выработок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. - № 3. - С. 41–47. DOI: 10.1134/S1062739115030059.
254. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кормнов А.А. Особенности аппаратного 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.
255. 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. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.11.
256. 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. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.03.
257. Li C. A theory for the Kaiser effect in rock and its potential applications // Ser. rock soil Mech. Trans Tech, 1998. - P. 171–185.
258. Holcomb D.J., Costin L.S. Detecting Damage Surfaces in Brittle Materials Using Acoustic Emissions // J. Appl. Mech. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 1986. - Vol. 53. - № 3. - P. 536–544. DOI:

10.1115/1.3171807.

259. Hughson D.R., Crawford A.M. Kaiser Effect Gauging: The Influence of Confining Stress On Its Response. OnePetro, 1987.
260. Holcomb D.J., Martin R.J. Determining peak stress history using acoustic emissions: Holcom, D J; Martin, R J In: Research and Engineering Applications in Rock Masses (paper to the 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, 26–28 June 1985) V2, P715–722. Publ Rotterdam: A. A. Balkema, 1985 // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Pergamon, 1986. - Vol. 23. - № 5. - P. 187. DOI: 10.1016/0148-9062(86)90143-9.
261. Lavrov A. V. Three-dimensional simulation of memory effects in rock samples // Proc. Int. Symp. on Rock Stress K. Sugawara & Y. Obara (eds.), A. A. Balkema, Rotterdam. 1997. - P. 197–202.
262. Лавров А.В., Шкуратник, В.Л. Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М.: МГГУ, 2004. 456 с.
263. Filimonov Y.L., Lavrov A. V., Shafarenko Y.M., Shkuratnik V.L. Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass // Rock Mech. Rock Eng. 2001. - Vol. 34. - № 4. - P. 275–291. DOI: 10.1007/S006030170002.
264. 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. DOI: 10.1134/S1062739118013282.
265. Wang H.J., Tang L., Ren X.H., Yang A.Y., Niu Y. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading // Rock Soil Mech. 2014. - Vol. 35. - № 4. - P. 1007–1014.
266. Ji-xun Z. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region based on frictional sliding. 2012.
267. Meng Q., Zhang M., Han L., Pu H., Chen Y. Acoustic Emission

- Characteristics of Red Sandstone Specimens Under Uniaxial Cyclic Loading and Unloading Compression // *Rock Mech. Rock Eng.* Springer-Verlag Wien, 2018. - Vol. 51. - № 4. - P. 969–988. DOI: 10.1007/S00603-017-1389-6/FIGURES/12.
268. Zhang N.B., Qi Q.X., OuYang Z.H., Li H.Y., ... Xu Z.J. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths // *J. China Coal Socety.* 2014. - № 39. - P. 389–394.
269. Assous S., Gunn D., Hopper C., Jackson P.D., ... Lovell M. An approach for correcting magnitude and phase distortion in wideband piezoelectric transducer systems // *Ocean. 2007 - Eur. IEEE Computer Society*, 2007. DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302481.
270. Goodfellow S.D., Young R.P. A laboratory acoustic emission experiment under in situ conditions // *Geophys. Res. Lett.* John Wiley & Sons, Ltd, 2014. - Vol. 41. - № 10. - P. 3422–3430. DOI: 10.1002/2014GL059965.
271. He M.C., Miao J.L., Feng J.L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Pergamon, 2010. - Vol. 47. - № 2. - P. 286–298. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.09.003.
272. 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.
273. 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 (научно-технический журнал).* 2018. - № 5. - С. 129–135.
274. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V. Spectral Characteristics of Acoustic Emission in Carbon Fiber-Reinforced Composite Materials Subjected to

- Cyclic Loading // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. - Vol. 2018. - № 1. - P. 1–8.
DOI: 10.1155/2018/1962679.
275. Blom J., Wastiels J., Aggelis D.G. Application of acoustic emission on the characterization of fracture in textile reinforced cement laminates // *Sci. World J.* 2014. - Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/178020.
276. 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. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.03.
277. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Pergamon*, 2003. - Vol. 40. - № 2. - P. 151–171. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00138-7.
278. Николенко П.В., Набатов В.В. Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // *Горный журнал.* 2015. - № 9. - С. 33–36. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.06.
279. Nogueira C.L. A new method to test concrete tensile and shear strength with cylindrical specimens // *ACI Mater. J. American Concrete Institute*, 2018. - Vol. 115. - № 6. - P. 909–923. DOI: 10.14359/51706942.
280. Nozawa T., Ozawa K., Tanigawa H. Re-defining failure envelopes for silicon carbide composites based on damage process analysis by acoustic emission // *Fusion Eng. Des. North-Holland*, 2013. - Vol. 88. - № 9–10. - P. 2543–2546. DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2013.05.054.
281. Ono K., Hayashi T., Cho H. Bar-Wave Calibration of Acoustic Emission Sensors // *Appl. Sci.* 2017, Vol. 7, Page 964. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. - Vol. 7. - № 10. - P. 964. DOI: 10.3390/APP7100964.
282. Ono K., Cho H., Matsuo T. New characterization methods of ae sensors // *J. Acoust. Emiss.* 2010. - Vol. 28. - P. 256.
283. Aggelis D.G., Mpalaskas A.C., Ntalakas D., Matikas T.E. Effect of wave

- distortion on acoustic emission characterization of cementitious materials // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2012. - Vol. 35. - P. 183–190. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.03.013.
284. Ohno K., Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2010. - Vol. 24. - № 12. - P. 2339–2346. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.05.004.
285. Carpinteri A., Corrado M., Lacidogna G. Heterogeneous materials in compression: Correlations between absorbed, released and acoustic emission energies // *Eng. Fail. Anal.* Pergamon, 2013. - Vol. 33. - P. 236–250. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2013.05.016.
286. Aggelis D.G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters // *Mech. Res. Commun.* Pergamon, 2011. - Vol. 38. - № 3. - P. 153–157. DOI: 10.1016/J.MECHRESCOM.2011.03.007.
287. Rodríguez P., Celestino T.B. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks // *Eng. Fract. Mech.* Pergamon, 2019. - Vol. 210. - P. 54–69. DOI: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2018.06.027.
288. Li J., Lian S., Huang Y., Wang C. Study on Crack Classification Criterion and Failure Evaluation Index of Red Sandstone Based on Acoustic Emission Parameter Analysis // *Sustain.* 2022. - Vol. 14. - № 9. DOI: 10.3390/su14095143.
289. Li S., Huang Z., Yang D., Zeng W., Zhao K. Study of the Acoustic Characteristics and Evolution of the Failure Mode of Yellow Sandstone Under Uniaxial Compression // *Rock Mech. Rock Eng.* Springer Vienna, 2023. - № 0123456789. DOI: 10.1007/s00603-023-03637-0.
290. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // *Ann. Math. Stat.* 1962. - Vol. 33. - № 3. - P. 1065–1076. DOI: 10.1214/aoms/1177704472.
291. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function // *Ann. Math. Stat.* 1956. - Vol. 27. - № 3. - P. 832–837. DOI:

- 10.1214/aoms/1177728190.
292. Silverman B.W. Density estimation for statistics and data analysis. Chapman & Hall/CRC, 1986. 200 p.
293. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кошелев А.Е. Спектральные характеристики акустической эмиссии при нагружении образцов каменного угля и их использование для прогноза разрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. - № 5. - С. 23–28. DOI: 10.1134/S1062739117052825/METRICS.
294. 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».
295. Brantseva T. V., Yu G. Behaviour of polymer-fiber interface under various loading rates // Proceedings of the XII International Conference on Composite Materials. Paris, 1999. - P. Paper 426.
296. Николенко П.В., Кормнов А.А., Шкуратник В.Л. Способ исследования напряженного состояния массива горных пород. Патент №2557287 РФ, МПК E21C 39/00. Заявл. 17.06.2014; Оpubл. 20.07.2015, Бюл. №20.
297. 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.
298. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Цариков А.Ю. Способ определения изменения напряженного состояния горного массива в окрестностях выработки. Патент №2532817 РФ, МПК E21C 39/00, G01N 29/14. Заявл. 24.06.2013; Оpubл. 10.11.2014, Бюл. №31.
299. Шкуратник, В.Л. Николенко, П.В. Корчак, А.В. Способ определения изменения напряженного состояния горного массива. Патент №2485314 РФ, МПК E21C 39/00. Заявл. 24.11.2011; Оpubл. 20.06.2013, Бюл. №17.

300. 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 X Международной школы-семинара «Физические основы п.
301. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. О применении кодированных акустических сигнализаторов в системах геомониторинга // Тезисы докладов Всеросс. науч.-техн. конф. с между-нар. участием «Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ». Ап.
302. 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. DOI: 10.1134/S1062739149040035.
303. 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.
304. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб.пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 199 с.
305. Рубан А.Д., Шкуратник В.Л. Геоконтроль как элемент горных технологий и особенности его реализации в условиях помех // Горный журнал. 2009. - № 12. - С. 14–17.
306. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методика интерпретации акустико-эмиссионных измерений при использовании эффекта Кайзера для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный журнал. 2012. - № 9. - С. 44–47.

307. Сысоев Н.И., Мирный С.Г. Повышение эффективности процесса бурения шпуров машинами вращательного действия за счет поддержания частоты вращения оптимальном на уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. - № 4. - С. 259–262.
308. Вознесенский А.С., Нарышкин Д.А., Тавостин М.Н. Пространственно-временная корреляция параметров акустической эмиссии на различных стадиях деформирования горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. - № 7. - С. 92–100.
309. Зорин А.Н., Усаченко Б.М., Булат А.Ф., Хохолов В.К., Приходченко В.Л. Способ определения напряженного состояния массива горных пород: pat. SU 1357570 USA. 1983.
310. Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y. Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones // GEOPHYSICS. 2015. - Vol. 80. - № 2. - P. D111–D127. DOI: 10.1190/geo2014-0335.1.
311. Pervukhina M., Gurevich B., Dewhurst D.N., Siggins A.F. Applicability of velocity-stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks // Geophys. J. Int. 2010. - Vol. 181. - № 3. - P. 1473–1479. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04535.x.
312. Fjær E. Static and dynamic moduli of a weak sandstone // Geophysics. 2009. - Vol. 74. - № 2. - P. WA103–WA112.
313. Иванов В.И., Белов Н.И. Влияние составляющих тензора напряжений на оценку напряженного состояния пород по скоростям упругих волн // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. – Новосибирск ИГД СО АН СССР. 1985. - С. 3–6.
314. Cai Y., Liu D., Mathews J.P., Pan Z., ... Guo X. Permeability evolution in fractured coal — Combining triaxial confinement with X-ray computed tomography, acoustic emission and ultrasonic techniques // Int. J. Coal Geol. 2014. - Vol. 122. - P. 91–104. DOI: 10.1016/j.coal.2013.12.012.

315. Опарин В.Н., Киряева Т.А., Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н. Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при их нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. - № 4. - С. 3–24.
316. Wu H., Dong S., Li D., Huang Y., Qi X. Experimental study on dynamic elastic parameters of coal samples // Int. J. Min. Sci. Technol. 2015. - Vol. 25. - № 3. - P. 447–452. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.03.019.
317. Yao Q., Han D. Acoustic properties of coal from lab measurement: 80th Annual International Meeting // SEG, Expanded Abstracts. 2008. - P. 1815–1819.
318. Zheng Z., Khodaverdian M., McLennan J.D. Static and Dynamic Testing of Coal Specimens // 1991 SCA Conf. 1991. - P. Paper 9120.
319. Wei X., Wang S.X., Zhao J.G., Tang G.Y., Deng J.X. Laboratory study of velocity dispersion of the seismic wave in fluid-saturated sandstones // Chinese J. Geophys. (Acta Geophys. Sin. 2015. - Vol. 58. - № 9. - P. 3380–3388.
320. Meng Z.P., Zhang J.C., Tiedemann J. Relationship Between Physical and Mechanical Parameters of Coal Measures Rocks and Acoustic Wave Velocity // Chinese J. Geophys. 2006. - Vol. 49. - № 5. - P. 1352–1359. DOI: 10.1002/cjg2.959.
321. Nazarova L.A., Zakharov V.N., Shkuratnik V.L., Nazarov L.A., ... Nikolenko P.V. Use of Tomography in Stress-Strain Analysis of Coal-Rock Mass by Solving Boundary Inverse Problems // Procedia Engineering. European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, 2017. - Vol. 191. - P. 1048–1055. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.278.
322. 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. DOI: 10.1134/S1062739116041322.
323. 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. Proceeding.
324. 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, T.
325. Shea V.R., Hanson D.R. Elastic wave velocity and attenuation as used to define phases of loading and failure in coal // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1988. - Vol. 25. - № 6. - P. 431–437. DOI: 10.1016/0148-9062(88)90983-7.
326. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Митрофанов Э.Р. Аппаратурное обеспечение и результаты измерения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. - № 11. - С. 341–348.
327. Johnson P.A., Rasolofosaon P.N.J. Nonlinear elasticity and stress-induced anisotropy in rock // J. Geophys. Res. Solid Earth. John Wiley & Sons, Ltd, 1996. - Vol. 101. - № B2. - P. 3113–3124. DOI: 10.1029/95JB02880.
328. Winkler K.W., Liu X. Measurements of third-order elastic constants in rocks // J. Acoust. Soc. Am. AIP Publishing, 1996. - Vol. 100. - № 3. - P. 1392–1398. DOI: 10.1121/1.415986.
329. Kuszniir N.J., Whitworth K.R. Use of synthetic fracture logs derived from borehole geophysics to assess mine roof and floor quality // Int. J. Min. Eng. Kluwer Academic Publishers, 1983. - Vol. 1. - № 3. - P. 253–260. DOI: 10.1007/BF00881615/METRICS.
330. Shkuratnik V.L., Danilov G. V. Investigation into the influence of stresses on

- the velocities of elastic waves in the vicinity of an elliptical mine working // J. Min. Sci. Springer, 2005. - Vol. 41. - № 3. - P. 195–201. DOI: 10.1007/S10913-005-0083-3/METRICS.
331. Oyler D.C., Mark C., Molinda G.M. In situ estimation of roof rock strength using sonic logging // Int. J. Coal Geol. Elsevier, 2010. - Vol. 83. - № 4. - P. 484–490. DOI: 10.1016/J.COAL.2010.07.002.
332. Nazarov L.A. Determination of properties of structured rock mass by the acoustic method // J. Min. Sci. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. - Vol. 35. - № 3. - P. 240–249. DOI: 10.1007/BF02550239/METRICS.
333. Ржевский В.В., Ямщиков В.С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М.: Наука, 1973. 224 с.
334. Santos C.A., Urdaneta V., Jaimes G., Trujillo L. Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated Rocks // Rock Mech. Rock Eng. Springer-Verlag Wien, 2010. - Vol. 43. - № 3. - P. 351–359. DOI: 10.1007/S00603-009-0047-Z/TABLES/2.
335. Chakravarty A., Misra S., Rai C.S. Visualization of hydraulic fracture using physics-informed clustering to process ultrasonic shear waves // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Pergamon, 2021. - Vol. 137. - P. 104568. DOI: 10.1016/J.IJRMMS.2020.104568.
336. Николенко П.В., Зайцев М.Г. Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. - № 3. - С. 5–15.
337. Nur A. Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks // J. Geophys. Res. 1971. - № 76. - P. 2022–2032.
338. Nur A., Simmons G. Stress-induced velocity anisotropy in rocks, an experimental study // J. Geophys. Res. 1969. - № 74. - P. 6667–6676.
339. Туранк К., Фурментро Д., Денни А. Распространение волн и границы раздела в породах // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. - М.: Мир, 1994. - С. 179–184.

340. Liu S., Zhu J., Wu Z. Implementation of Coda Wave Interferometry Using Taylor Series Expansion // J. Nondestruct. Eval. Springer US, 2015. - Vol. 34. - № 3. - P. 1–6. DOI: 10.1007/s10921-015-0300-1.
341. Dai S., Wuttke F., Santamarina J.C. Coda Wave Analysis to Monitor Processes in Soils // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. American Society of Civil Engineers, 2013. - Vol. 139. - № 9. - P. 1504–1511. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000872.
342. Grêt A., Snieder R., Scales J. Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry // J. Geophys. Res. 2006. - № 111. - P. B03305.
343. Roberts P.M., Phillips W.S., Fehler M. Development of the active doublet method for measuring small velocity and attenuation changes in solids // J. Acoust. Soc. Am. 1992. - Vol. 91. - № 6. - P. 3291–3302.
344. Pacheco C., Snieder R. Time-lapse travelttime change of singly scattered acoustic waves // Geophys. J. Int. Oxford Academic, 2006. - Vol. 165. - № 2. - P. 485–500. DOI: 10.1111/J.1365-246X.2006.02856.X/3/M_165-2-485-EQ047.JPEG.
345. Lobkis O.I., Weaver R.L. Coda-Wave Interferometry in Finite Solids: Recovery of P-to-S Conversion Rates in an Elastodynamic Billiard // Phys. Rev. Lett. 2003. - Vol. 90. - № 25. - P. 4. DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.90.254302.
346. Stähler S.C., Sens-Schönfelder C., Niederleithinger E. Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry // J. Acoust. Soc. Am. AIP Publishing, 2011. - Vol. 129. - № 4. - P. 1945–1952. DOI: 10.1121/1.3553226.
347. 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. DOI: 10.1134/S1062739122060084/FIGURES/7.

348. 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. 265–271.
349. Кормнов А.А., Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Минимизация влияния контактных условий акустических преобразователей с массивом при реализации ультразвукового корреляционного метода геоконтроля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. - № S1. - С. 43–52.
350. Чумаков А.А., Николенко П.В., Гупало В.С. Модульный ультразвуковой каротажный комплекс: конструкция и результаты измерений на физической модели скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. - № 3. - С. 119–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_119.
351. Soleymani R., Khajehsaeid H. A mechanical model for McKibben pneumatic artificial muscles based on limiting chain extensibility and 3D application of the network alteration theories // Int. J. Solids Struct. Pergamon, 2020. - Vol. 202. - P. 620–630. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2020.06.036.
352. Chou C.P., Hannaford B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles // IEEE Trans. Robot. Autom. 1996. - Vol. 12. - № 1. - P. 90–102. DOI: 10.1109/70.481753.
353. Naser T., Mehdi O. Mechanical Behavior of Salt Rock at Elevated Temperature // 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. 2014. - P. 1–8.
354. Абдулагатова З.З., Эмиров С., Абдулагатов И.М. Влияние температуры и давления на теплопроводность и скорость звука в андезитовых горных породах // Ультразвук и термодинамические свойства вещества. 2006. - Vol. 33. - P. 5–23.
355. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических

- характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. - № 4. - P. 20–27. DOI: 10.15372/FTPRPI20190403.
356. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Установка для ультразвуковых измерений на образцах геоматериалов в условиях термобарических воздействий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. - № 5. - С. 89–96.
357. Disalvo F.J. Thermoelectric cooling and power generation // Science (80-.). American Association for the Advancement of Science, 1999. - Vol. 285. - № 5428. - P. 703–706. DOI: 10.1126/SCIENCE.285.5428.703/ASSET/5318A0F0-EF95-4D95-810A-C6567D6E6778/ASSETS/GRAPHIC/SE2997705001.JPEG.
358. Nikolenko P. V., Epshtein S.A., Shkuratnik V.L., Anufrenkova P.S. Experimental study of coal fracture dynamics under the influence of cyclic freezing–thawing using shear elastic waves // Int. J. Coal Sci. Technol. 2021. - Vol. 8. - № 4. - P. 562–574. DOI: 10.1007/s40789-020-00352-x.
359. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных волн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. - № 4. - С. 117–126.
360. 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. - Vol. 9. - С. 160–167. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-160-167.
361. Bagdassarov N. Thermal Properties of Rocks and Minerals // Fundam. Rock Phys. Cambridge University Press, 2021. - P. 455–504. DOI: 10.1017/9781108380713.012.
362. Dooley J.C. Two-dimensional interpolation of irregularly spaced data using

- polynomial splines // *Phys. Earth Planet. Inter.* Elsevier, 1976. - Vol. 12. - № 2–3. - P. 180–187. DOI: 10.1016/0031-9201(76)90046-7.
363. Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* Taylor & Francis Group, 1990. - Vol. 4. - № 3. - P. 313–332. DOI: 10.1080/02693799008941549.
364. 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. - № 5. - С. 21–32. DOI: 10.1134/S1062739120057019/TABLES/2.
365. Plotnikova O.O., Romanis T. V., Kust P.G. Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections // *Dokuchaev Soil Bull.* V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2020. - № 104. - P. 199–222. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222.
366. Qi K., Tan Z. Experimental Study on Acoustoelastic Character of Rock Under Uniaxial Compression // *Geotech. Geol. Eng.* Springer International Publishing, 2018. - Vol. 36. - № 1. - P. 247–256. DOI: 10.1007/S10706-017-0323-8/FIGURES/10.
367. Motra H.B., Stutz H.H. Geomechanical Rock Properties Using Pressure and Temperature Dependence of Elastic P- and S-Wave Velocities // *Geotech. Geol. Eng.* Springer International Publishing, 2018. - Vol. 36. - № 6. - P. 3751–3766. DOI: 10.1007/S10706-018-0569-9/FIGURES/9.
368. Chen X., Xu Z. The ultrasonic P-wave velocity-stress relationship of rocks and its application // *Bull. Eng. Geol. Environ.* Springer Verlag, 2017. - Vol. 76. - № 2. - P. 661–669. DOI: 10.1007/S10064-016-0866-6/TABLES/6.
369. Punturo R., Kern H., Cirrincione R., Mazzoleni P., Pezzino A. P- and S-wave velocities and densities in silicate and calcite rocks from the Peloritani Mountains, Sicily (Italy): The effect of pressure, temperature and the direction of wave propagation // *Tectonophysics.* Elsevier, 2005. - Vol. 409. -

- № 1–4. - P. 55–72. DOI: 10.1016/J.TECTO.2005.08.006.
370. Cheng W., Ba J., Fu L.Y., Lebedev M. Wave-velocity dispersion and rock microstructure // *J. Pet. Sci. Eng. Elsevier*, 2019. - Vol. 183. - P. 106466. DOI: 10.1016/J.PETROL.2019.106466.
371. Archilla N.L., Missagia R.M., Hollis C., de Ceia M.A.R., ... Lee P. Permeability and acoustic velocity controlling factors determined from x-ray tomography images of carbonate rocks // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 2016. - Vol. 100. - № 08. - P. 1289–1309. DOI: 10.1306/02251615044.
372. Deng S., Zhang Y., Yan X., Yang S., ... Peng H. Experimental study on P-wave response characteristics of hot dry rock under high temperature and high confining pressure // *Geomech. Energy Environ. Elsevier*, 2023. - Vol. 36. - P. 100514. DOI: 10.1016/J.GETE.2023.100514.
373. Katsuki D., Gutierrez M., Almrabat A. Stress-dependent elastic wave velocity of microfractured sandstone // *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 2014. - Vol. 38. - № 5. - P. 441–456. DOI: 10.1002/NAG.2210.
374. Kern H. Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at elevated pressures and temperatures // *Hellwege K.-H.* 1982. - P. 99–140.
375. Shamina O.G., Palenov A.M. Elastic wave spectra and fracture // *Izv. — Phys. Solid Earth.* 2000. - Vol. 36. - № 3. - P. 196–203.
376. Remy J.M., Bellanger M., Homand-Etienne F. Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles // <https://doi.org/10.1190/1.1443586>. Society of Exploration Geophysicists, 2012. - Vol. 59. - № 2. - P. 245–251. DOI: 10.1190/1.1443586.
377. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media* // *Rock Phys. Handb.* Cambridge University Press, 2009. DOI: 10.1017/CBO9780511626753.
378. Sarout J. Impact of pore space topology on permeability, cut-off frequencies and validity of wave propagation theories // *Geophys. J. Int.* John Wiley & Sons, Ltd, 2012. - Vol. 189. - № 1. - P. 481–492. DOI: 10.1111/J.1365-246X.2011.05329.X.

379. Ren W., Xu J., Zhang Z., Liu Y. Wavelet packet analysis on acoustic spectral characteristics of geopolymetric concrete after elevated temperature // Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal Build. Mater. Tongji University, 2014. - Vol. 17. - № 2. - P. 284–290. DOI: 10.3969/J.ISSN.1007-9629.2014.02.019.
380. Jaeger J.C. (John C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell Pub, 2007. 475 p.
381. Zheng G.P., Zhao X.D. Experimental study on change in acoustic wave velocity when rock is loading // Dongbei Daxue Xuebao, J. Northeast. Univ. 2009. - Vol. 30. - № 8. - P. 1197–1200.
382. Николенко П.В. Экспериментальное исследование влияния температуры и давления на развитие поврежденности в образцах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. - № 11. - С. 70–78.
383. Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. Наука, 2009. 279 с.
384. He W., Wang C., Shi W.-F., Ning J.-G., Zhao K. Evaluation of Anchorage Quality of Rock Bolts Using Ultrasonic Guided Wave // Beijing Ligong Daxue Xuebao/Transaction Beijing Inst. Technol. 2017. - Vol. 37. - № 6. - P. 567–572.
385. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Использование нагрева для повышения чувствительности ультразвукового метода контроля напряжений в породном массиве // Min. Informational Anal. Bull. 2021. - № 11. - С. 159–168.
386. Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Способ определения напряженного состояния массива горных пород. Патент №2704086 РФ, МПК E21C 39/00. Заявл. 24.07.2019; Оpubл. 23.10.2019, Бюл. №30. РФ.

Приложение А. Методические рекомендации по контролю параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах

Утверждаю:

Проректор по науке и
инновациям НИТУ «МИСиС»,
д.т.н., проф. Филонов М.Р.



«08» февраля 2024 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИКО-
ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛАХ**

Разработал:

Доцент кафедры Физических
процессов горного производства
и геоконтроля, к.т.н.

П.В. Николенко

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. Область применения.....	3
2. Нормативные ссылки.....	3
3. Термины и определения	3
4. Сущность метода	4
5. Требования к аппаратуре.....	6
5.1 Электронный блок регистрации АЭ	6
5.2 Система клеевой фиксации композиционного датчика	9
5.4 Пресс для испытания образцов горных пород в условиях одноосного сжатия.....	10
6. Проведение измерений	11
7. Обработка результатов измерений.....	14

1. Область применения

Настоящие методические рекомендации распространяются на подземные горные выработки и регламентируют проведение мониторинга параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива пород с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных чувствительных элементах, размещаемых в измерительных скважинах. В частности, применение композиционных упругих включений позволяет оценивать направление действий максимальных напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины, а также сигнализировать о превышении заранее заданного порогового уровня приращений механических напряжений к контролируемой области.

2. Нормативные ссылки

ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения

ГОСТ Р 50544-93 Породы горные. Термины и определения.

ГОСТ Р 57719-2017 Горное дело. Выработки. Термины и определения.

ГОСТ 19527-74 Коронки алмазные для бурения геологоразведочных скважин. Основные размеры.

ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

ГОСТ 5-78 Текстолит и асботекстолит конструкционные.

3. Термины и определения

В настоящей рекомендациях использованы термины и определения по ГОСТ 27655-88, ГОСТ Р 50544-93 и ГОСТ Р 57719-2017, а также следующий термин:

Акустико-эмиссионный эффект памяти (АЭЭП) – эффект, проявляющийся в твердых телах, содержащих исходные дефекты и подвергаемых циклическому нагружению, и заключающийся в невоспроизводимости акустической эмиссии (АЭ) вплоть до максимального напряжения предшествующего цикла P^* , когда параметры АЭ скачкообразно восстанавливаются до уровня, соответствующего э

тому максимальному напряжению (также известен как эффект Кайзера).

4. Сущность метода

Метод основан на двух акустических эффектах, проявляющихся в изготовленных из текстолита марки ПТК дисках, выступающих в качестве чувствительных элементов систем контроля и преобразующих механические деформации в сигналы акустической эмиссии.

Первый эффект заключается в существенном различии поведения счета N акустической эмиссии (в соответствие с ГОСТ 27655-88 показывает количество превышений сигналом АЭ заранее заданного порогового уровня амплитуды в единицу времени) в процессе деформации ϵ образца композита в зависимости от угла γ между вектором приложения нагрузки и направлением расположения армирующих слоев текстолита. На рисунке 1 представлены примеры зависимостей $N(\epsilon)$ для различных значений γ , полученные при постоянной скорости нагружения.

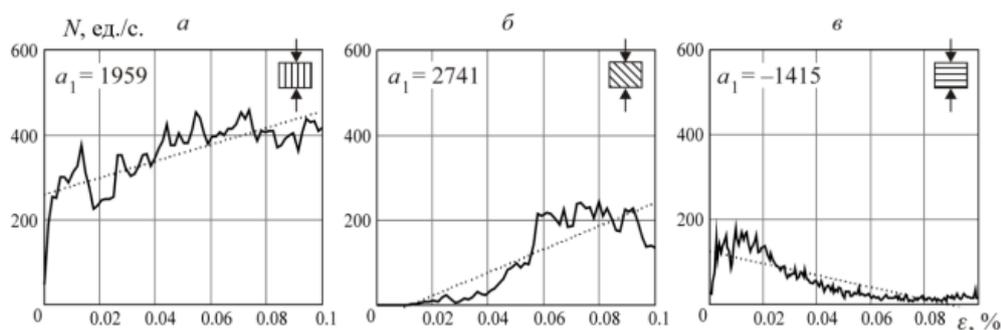


Рисунок 1 – Примеры зависимостей $N(\epsilon)$ для $\gamma = 0^\circ$ (а), $\gamma = 45^\circ$ (б) и $\gamma = 90^\circ$ (в)

Основным различием является скорость изменения значений N , которая может быть описана значением коэффициента a_1 аппроксимирующего уравнения

$$N = a_0 + a_1 \varepsilon. \quad (1)$$

На рисунке 2 представлено распределение значений a_1 для образцов диаметром 40 мм и толщиной 12 мм, изготовленных из текстолита марки ПТК.

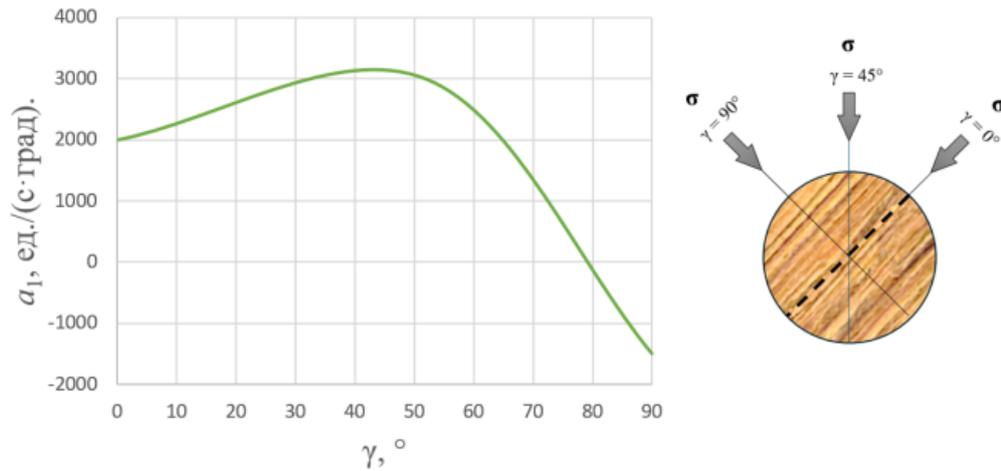


Рисунок 2 – Зависимость $a_1(\gamma)$ для образца текстолита парки ПТК

Второй эффект заключается в способности композиционных чувствительных элементов сохранять «память» об испытанных ранее механических напряжениях σ и воспроизводить эту информацию в виде проявления так называемого акустико-эмиссионного эффекта памяти, который можно зарегистрировать по резкому всплеску N в момент достижения в образце значений σ , равных максимальным значениям $\sigma_{уст}$, испытанным в предшествующем (установочном) цикле нагружения. Наилучшим образом эффект проявляется при $\gamma = 45^\circ$. При этом условием формирования и проявления АЭЭП является совпадение направлений приложения механической нагрузки в

установочном и тестовом циклах нагружения. На рисунке 3 представлен пример проявления АЭЭП для образца текстолита марки ПТК

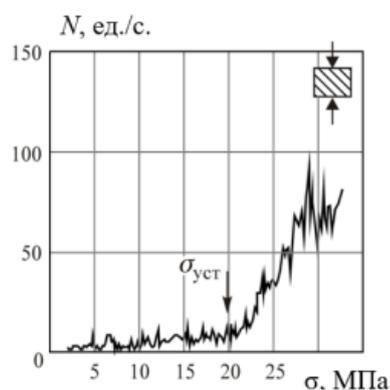


Рисунок 3 – Пример проявления АЭЭП в образце текстолита при $\gamma = 45^\circ$

Таким образом, чувствительный элемент, изготовленный из слоистого композита (текстолит марки ПТК) и размещенный в измерительной скважине на определенной глубине, может трансформировать информацию о направлении и величине приращения максимального главного напряжения в акустический сигнал, который может быть зарегистрирован и соответствующим образом интерпретирован.

5. Требования к аппаратуре

5.1 Электронный блок регистрации АЭ

Блок регистрации предназначен для регистрации скорости счета акустической эмиссии. Блок представляет собой портативный прибор с автономным питанием от двух батареек типа АА. Внешний вид и устройство блока представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Внешний вид и внутреннее устройство электронного блока регистрации АЭ

На боковой поверхности блока расположен высокочастотный разъем BNC для подключения пьезоэлектрических преобразователей сигналов АЭ, а также разъем для SD карты памяти, предназначенной для сохранения и последующего экспорта результатов контроля. На фронтальной поверхности блока расположен LCD дисплей и три кнопки управления и навигации: «◀», «OK» и «▶». С помощью указанных кнопок происходит навигация по меню прибора и настройка параметров его работы. Блок-схема меню представлена на рисунке 5. Кнопка «OK» также предназначена для включения и выключения прибора при ее длительном нажатии.



Рисунок 5 - Блок-схема меню электронного блока регистрации АЭ

Настраиваемыми параметрами являются «период опроса», «порог событий», «амплитуда событий», имя файла для сохранения, а также дата и время проведения измерений. Параметр «период опроса» определяет время в секундах, за которое происходит подсчет количества превышений порогового уровня амплитуды. Параметр «порог событий» устанавливает предельное значение скорости счета АЭ, превышение которого переводит электронный блок в режим «Порог превышен!» с мигающим LCD дисплеем. Как правило, это свидетельствует о проявлении акустико-эмиссионного эффекта памяти в попозиционном чувствительном элементе. Параметр «амплитуда событий» позволяет настраивать пороговое значение амплитуды в у.е., превышение которого учитывается при расчете скорости счета АЭ.

5.2 Система клеевой фиксации композиционного датчика

Для размещения композиционного чувствительного элемента в скважине и обеспечения неразрывности его деформаций со стенками скважины используется специально разработанная одноразовая система клеевой фиксации. Схема и принцип работы системы иллюстрируются рисунком 6. Устройство предназначено для использования в скважинах диаметром 42 мм.

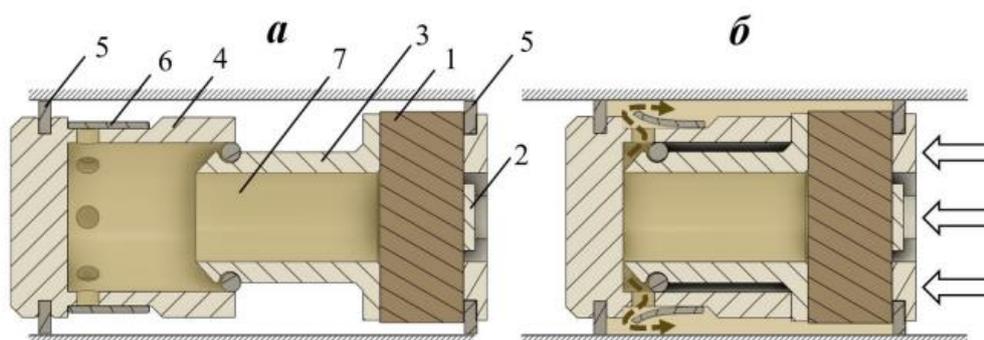


Рисунок 6 – Система клеевой фиксации в положении «подготовка» (а) и в положении «фиксация» (б): 1 – композитный цилиндр, 2 – пьезокерамический элемент, 3 – плунжер, 4 – стакан, 5 – уплотнительные кольца, 6 – резиновая манжета, 7 – эпоксидный клей

Принцип действия системы заключается в следующем. Подготовленный к проведению измерений композиционный цилиндр снабжается пьезоэлектрическим элементом и фронтальной накладкой с резиновым уплотнительным кольцом. В поршневую часть, состоящую из стакана и плунжера заливают эпоксидную смолу, смешанную с отвердителем, после чего с помощью быстротвердеющего клея поршневая группа герметизируется композиционным датчиком. Таким образом клеевая система приводится в состояние «подготовка» и готова к размещению в измерительной скважине.

После размещения устройства в скважине на него оказывается дополнительное давление с помощью досылочных штанг, за счет чего

эпоксидная смола выдавливается плунжером через отверстия стакана и полностью заполняет пространство между стенками скважины, уплотнительными кольцами и композиционным чувствительным элементом. Внешний вид системы клеевой фиксации представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Система клеевой фиксации, подготовленная к размещению в скважине

5.4 Пресс для испытания образцов горных пород в условиях одноосного сжатия

Для реализации установочного цикла нагружения, в рамках которого в композиционном чувствительном элементе формируется акустико-эмиссионная память, используется пресс для одноосного нагружения ПГМ-100МГ4 (или любой его аналог с усилием сжатия не менее 100 кН). На рисунке 8 представлен внешний вид прессы.



Рисунок 8 – Внешний вид испытательного прессы ПГМ-100МГ4

Испытательный пресс ПГМ-100МГ4 предназначен для испытания на сжатие и изгиб образцов строительных материалов при скоростях нагружения, нормируемых соответствующим стандартом. Пресс снабжен электрическим приводом (сеть 220 В, 50 Гц) и тензометрическим силоизмерителем. Отличительной особенностью пресса ПГМ-100МГ4 являются малые габариты и масса, бесшумная работа электропривода и отсутствие пульсаций в гидросистеме за счет применения многоплунжерных насосов импортного производства, микропроцессорное управление процессом нагружения, обеспечивающее автоматическое поддержание скоростей нагружения, определяемых ГОСТами (в зависимости от метода испытаний), фиксацию разрушающей нагрузки, вычисление прочности с учетом масштабного коэффициента и занесение в архив блока управления.

Индикация результатов испытаний цифровая (графический дисплей с подсветкой). Ввод исходных данных с пульта управления (вид материала, размеры образца, скорость нагружения) осуществляется в диалоговом режиме.

Получаемые в процессе испытаний результаты автоматически архивируются, маркируются датой и временем измерения и передаются на ПК с возможностью последующего документирования.

6. Проведение измерений

6.1 Подготовительные операции заключаются в бурении из выработки горизонтальной скважины $d = 42$ мм буровым инструментом в соответствие с ГОСТ 19527-74 на глубину, превышающую расчетную глубину зоны опорного давления. После бурения скважина продувается сжатым воздухом для удаления остатков буровой мелочи.

6.2 Лабораторный этап заключается в формировании в композиционном чувствительном элементе акустико-эмиссионной «памяти». При этом реализуется следующая последовательность операций.

- 6.2.1 Композиционный цилиндр располагают между обкладками прессы в стальных пуансонах, повторяющих контур образующей.
- 6.2.2 Позиционируют цилиндр так, чтобы угол γ составлял 45° .
- 6.2.3 Подключают пьезоэлемент, расположенный на боковой поверхности композиционного цилиндра, к входу электронного блока регистрации АЭ.
- 6.2.4 Производят настройку блока в следующей последовательности.
 - 6.2.4.1 Устанавливают актуальную дату и время проведения испытания.
 - 6.2.4.2 Параметр «Период опроса» устанавливают равным 1 с.
 - 6.2.4.3 Параметр «Порог событий» устанавливают не менее 1000 соб.
 - 6.2.4.4 Параметра «Амплитуда событий» устанавливают в диапазон от 5 до 10 у.е.
 - 6.2.4.5 Создают файл для записи и присваивают ему номер.
- 6.2.5 Включают регистрацию акустической эмиссии в меню «Регистрация»
- 6.2.6 Производят нагружение образца до уровня $\sigma_{уст}$ со скоростью не более 0,2 МПа/с. Конкретное значение $\sigma_{уст}$ выбирается исходя из технологических параметров выработки – ее глубины, типа вмещающих пород, технологии ее сооружения и т.п.
- 6.2.7 При достижении $\sigma_{уст}$ указанный уровень нагружения выдерживают постоянно на протяжении не менее 10 мин.
- 6.2.8 Производят разгрузку образца (скорость разгрузки принципиального значения не имеет).

- 6.2.9 Завершают регистрацию АЭ нажатием на кнопку «ОК».
- 6.2.10 Файл, содержащий зарегистрированную зависимость $N(t)$ с помощью SD карты памяти переносят для обработки на персональный компьютер и отстраивают указанную зависимость в любом подходящем программном пакете.
- 6.2.11 Определяют максимальное достигнутое в процессе нагружения значение N_{\max} .
- 6.3 В подземных условиях производят подготовку клеевой системы фиксации в следующей последовательности.
- 6.3.1 Стакан одноразовой системы фиксации полностью заполняют эпоксидной смолой, смешанной с отвердителем в пропорции, рекомендуемой производителем.
- 6.3.2 С помощью цианакрилатного клея фиксируют композиционный цилиндр на стакане, тем самым герметизируя систему.
- 6.3.3 На противоположную сторону цилиндра также с помощью цианакрилатного клея фиксируют прижимное кольцо с резиновым уплотнительным кольцом.
- 6.4 Производят размещение устройства в скважине, для чего с помощью досылочных штанг его проталкивают до забоя скважины, а затем, дополнительно надавливая осуществляют клеевую фиксацию за счет выдавливания эпоксидного клея из поршня в пространство между композитным цилиндром и стенкой скважины. При размещении устройства соблюдают его ориентацию так, чтобы угол между вертикальным направлением в выработке и направлением слоев композита составлял 45° .
- 6.5 После завершения полимеризации смолы (до 24 ч) производят подключение электронного блока регистрации АЭ к электрическим выводам пьезоэлемента и осуществляется его настройка.

- 6.5.1 Устанавливают актуальную дату и время проведения испытания.
 - 6.5.2 Параметр «Период опроса» устанавливают равным 1 с.
 - 6.5.3 Параметр «Порог событий» устанавливают равным $0,9 \cdot N_{\max}$.
 - 6.5.4 Параметра «Амплитуда событий» устанавливают в диапазон от 5 до 10 у.е.
 - 6.5.5 Создают файл для записи и присваивают ему номер.
- 6.6 Включают регистрацию акустической эмиссии в меню «Регистрация»

7. Обработка результатов измерений.

Начало регистрации по п. 6.6 переводит систему в режим непрерывного мониторинга. В этом режиме система может находиться либо до полного израсходования заряда элементов питания, либо до перехода ее в режим сигнализации, когда на LCD дисплее отображается мигающая надпись «Порог превышен!». В первом случае допустима замена элементов питания и повторный запуск регистрации с созданием нового файла и сохранением настроек по п. 6.5. Во втором случае надпись «Порог превышен!» свидетельствует о резком всплеске параметра N , приуроченному к проявлению в композиционном чувствительном элементе акустико-эмиссионного эффекта памяти. Это свидетельствует о превышении в точке контроля пороговых значений $\sigma_{уст}$, что может быть связано с перераспределением напряжений и смещением максимума зоны опорного давления $\sigma_{о.д.}$ под влиянием увеличения нарушенной приконтурной зоны или перераспределения напряжений при ведении горных работ. Общая схема мониторинга представлена на рисунке 9.

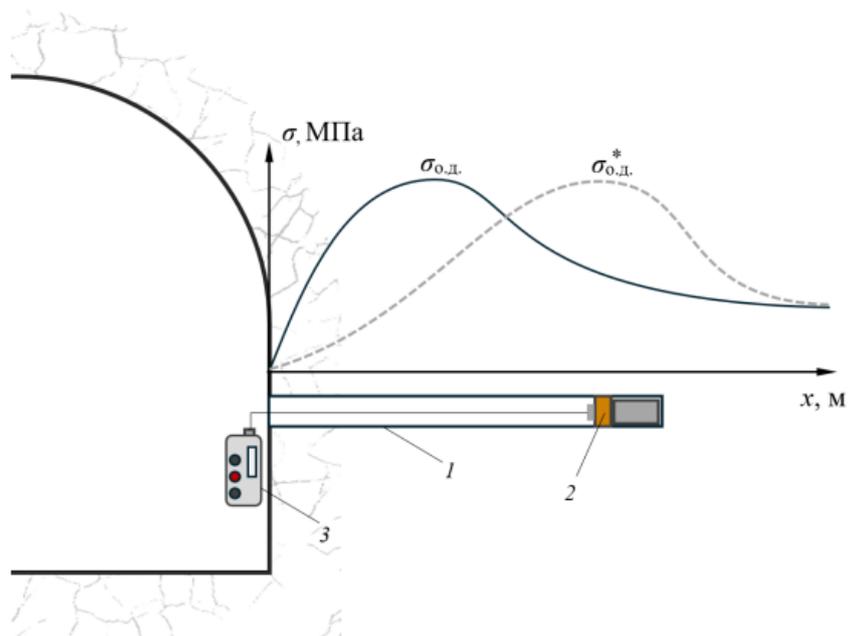


Рисунок 9 – Схема проведения мониторинга и смещение максимума зоны опорного давления

В процессе проведения мониторинга производится регулярный экспорт данных с SD карты и последующая обработка измерительных данных, которая заключается в аппроксимации зависимости $N(t)$ функцией

$$N(t) = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

с последующим вычислением значения a_1 . По определенным значениям a_1 исходя из экспериментально установленной зависимости (рисунок 2) оценивают значение угла γ между реальным вектором максимального напряжения, действующего в плоскости ортогональной оси скважины, и направлением слоев композиционного чувствительного элемента.

Приложение Б. Методические рекомендации по мониторингу динамики изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием ультразвуковой интерферометрии

Утверждаю:

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС,

д.т.н., проф. Филонов М.Р.



«05» февраля 2024 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОНИТОРИНГУ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Разработал:

доцент кафедры Физических процессов горного производства и геоконтроля, к.т.н.

П.В. Николенко

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1. Область применения.....	3
2. Нормативные ссылки.....	3
3. Термины и определения.....	3
4. Сущность метода.....	4
5. Требования к аппаратуре.....	5
5.1 Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60Н.....	5
5.2 Скважинный ультразвуковой каротажный зонд.....	7
5.3 Пресс для испытания образцов горных пород в условиях одноосного сжатия.....	8
6. Проведение измерений.....	10
7. Обработка результатов измерений.....	12

1. Область применения

Настоящие методические рекомендации распространяются на подземные горные выработки и регламентируют проведение мониторинга изменения вертикальной компоненты напряжений в кровле горных выработок, оборудованных в трещиноватых скальных массивах горных пород, с применением каротажа на основе ультразвуковой интерферометрии на кодах волн.

2. Нормативные ссылки

ГОСТ Р 50544-93 Породы горные. Термины и определения.

ГОСТ Р 57719-2017 Горное дело. Выработки. Термины и определения.

ГОСТ Р 58325-2018 Грунты. Полевое описание.

ГОСТ Р 58871-2020 Горное дело. Крепь горных выработок. Термины и определения.

ГОСТ 19527-74 Коронки алмазные для бурения геологоразведочных скважин. Основные размеры.

ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов.

ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

3. Термины и определения

В настоящей рекомендациях использованы термины и определения по ГОСТ Р 50544-93, ГОСТ Р 57719-2017 и ГОСТ Р 58871-2020, а также следующие термины:

Непосредственная кровля - залегающая над пластом или ложной кровлей толща пород, которая легко обрушается после удаления индивидуальной или передвижения механизированной крепи очистной выработки, причем на небольших площадях.

Кода волны – участок волновой формы, содержащий колебания, возникающие позже теоретически возможного времени прихода волнового пакета продольных волн и связанные с приходом многократно рассеянных и переотраженных от мелких неоднородностей упругих колебаний.

4. Сущность метода

Устойчивость горных выработок и, как следствие, безопасность ведения горных работ в значительной степени зависит от взаимодействия полей напряженно-деформированного состояния (НДС) и поврежденности массива с основными геотехническими параметрами выработок – их размерами и формой, способом крепления, направлением в пространстве и т.п. Нарушение баланса в такой системе может привести к потере устойчивости, частичному или полному обрушению выработок. Особое внимание уделяется кровле горной выработки как конструктивному элементу, требующему дополнительного крепления даже в относительно прочных и монолитных породах. Перераспределение напряжений в кровле может существенно снизить ее устойчивость и, как следствие, повысить риск образования расслоений, частичного или полного разрушения.

Настоящий метод мониторинга базируется на взаимосвязи механических напряжений в горных породах и кинематических параметров ультразвуковых колебаний, излучаемых и принимаемых с помощью специальных устройств (каротажных зондов) в вертикальных скважинах, пробуренных в кровле горных выработок. При этом скальные горные породы с высокими значениями модулей упругости, как правило, характеризуются слабыми корреляционными связями между значениями механических напряжений и скоростями упругих продольных волн. С целью значительного повышения чувствительности метода к медленно меняющимся вертикальным напряжениям используется специализированный алгоритм обработки регистрируемых волновых форм упругих колебаний, известный как интерферометрия на кодах волн (coda wave

interferometry, CWI). Алгоритм позволяет получать устойчивые связи между величиной механической нагрузки и акустическими параметрами породы, на десятки процентов превышая надежность определения напряжений классическими ультразвуковыми методами с использованием скоростей продольных волн.

5. Требования к аппаратуре

5.1 Ультразвуковой дефектоскоп УСД-60Н

Для измерений скоростей продольных волн, а также регистрации полных волновых форм ультразвуковых колебаний используется низкочастотный ультразвуковой дефектоскоп УСД-60Н производства ООО «НВП «КРОПУС». Дефектоскоп выпускается в портативном варианте, снабженном сменными аккумуляторами. Внешний вид дефектоскопа представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид дефектоскопа УСД-60Н

Основные технические характеристики дефектоскопа УСД-60Н представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики дефектоскопа УСД-60Н

Параметр	Значение
Развертка	мин.: 0 - 16 мкс макс.: 0 - 6000 мкс с шагом 0,01 / 0,1/ 1/ 10/ 100 мкс
Скорость УЗК	от 100 до 10 000 м/с
Максимальная длина контролируемого материала (сталь)	до 18 000 мм (эхо-режим), 36 000 мм (теневой режим)
Задержка	от 0 до 5900мкс с шагом 0,01 / 0,1/ 1/ 10/ 100 мкс
Задержка в призме	0 - 1000 мкс с шагом 0,01 / 0,1/ 1 и 10мкс
Зондирующий импульс	радиопульс, амплитудой 50 или 200 В, с регулируемой частотой заполнения 20-2500 кГц и длительностью до 32-х периодов
Частота повторений ЗИ	15 или 30 Гц
Усилитель	широкополосный 0.02-2,5 МГц (-6 дБ) с регулируемыми полосовыми фильтрами
Диапазон регулировки усиления	90 дБ, с шагом 0.5, 1, 2 или 6 дБ
Временная Регулировка Чувствительности (ВРЧ)	диапазон до 60 дБ, 12 дБ/мкс с построением кривой по 32 опорным точкам введенным вручную или от контрольных отражателей
Детектирование	положительная или отрицательная полуволна, полное, радиосигнал (во всем диапазоне развертки), B- scan, C-скан, спектр сигнала
Отсечка	компенсированная, 0 - 90% высоты экрана
Зоны контроля	две независимых зоны, начало и ширина изменяются во всем диапазоне развертки, уровни порогов задаются от 0 до 95% высоты экрана при детектировании и от -95% до +95% при радиосигнале с шагом 1%, индивидуальная логика определения дефектов.
Автоматическая Сигнализация Дефектов (АСД)	световая для каждой зоны отдельно и звуковая, индивидуальная логика определения дефекта в зоне
Измерение временных интервалов	от 0 до первого сигнала в зоне или между сигналами в зонах, по фронту или по максимуму сигнала
Автоматическая регулировка усиления (АРУ)	есть
Встроенное программное обеспечение для контроля цилиндрических изделий	есть
Подключение датчика оборотов	есть

Продолжение табл. 1

Параметр	Значение
Измерение амплитуды	в процентах от высоты экрана, в дБ относительно уровня порога в зоне, в дБ относительно опорного сигнала,
Дисплей	Цветной, TFT 640 x 480 точек 130 x 100 мм
А-сигнал	480 x 300 точек в стандартном режиме
Память	500 настроек с А-сигналом 5000 протоколов контроля (сигнал, огибающая, результат измерения, параметры работы прибора, дата, время и название протокола)
Интерфейс	RS232 / Ethernet
Разъемы преобразователей	2 x CP-50
Аккумулятор	Li-ion 8 А/ч
Время работы	6-8 часов от аккумуляторов
Внешнее питание дефектоскопа	блок питания 220 В AC / 18 В DC
Диапазон рабочих температур	от -25 С до +55 С
Размер (В x Ш x Д)	210 мм x 340 мм x 75 мм
Масса	4 кг с аккумуляторами

В возможности прибора входит регистрация и сохранение на жесткий диск подключенного по ethernet кабелю компьютера волновых форм длительностью более 1000 мкс с частотой дискретизации до 40 МГц, что является достаточным для реализации описываемого в настоящих рекомендациях метода контроля.

5.2 Скважинный ультразвуковой каротажный зонд

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

Структурно скважинный зонд представляет собой модульную конструкцию, состоящую из трех акустических преобразователей, снабженных устройствами пневматического прижима к стенке скважины (Рисунок 2).

Механическая связь между преобразователями осуществляется посредством акустических развязок, препятствующих распространению сигнала от излучателя к приемнику через конструкции зонда. Каждый из акустических преобразователей в зависимости от типа коммутации может выступать в качестве излучателя или приемника.

По умолчанию предлагается использовать центральный преобразователь в качестве излучателя 1, а боковые – в качестве приемников 2 и 3. В этом случае база прозвучивания оказывается одинаковой для обоих приемников и может быть сохранена в память дефектоскопа для последующего определения скоростей распространения продольных волн.

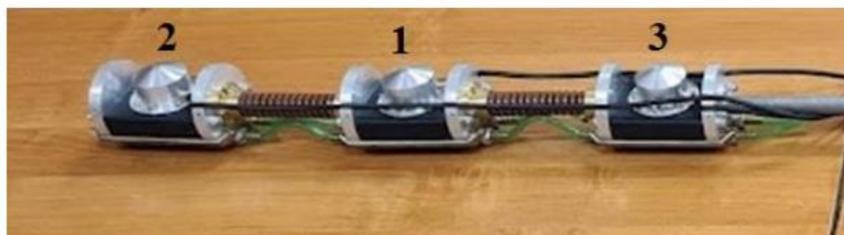


Рисунок 2 – Каротажный зонд

5.3 Пресс для испытания образцов горных пород в условиях одноосного сжатия

Для получения корреляционной зависимости между параметрами ультразвуковых колебаний и величиной механических напряжений используется пресс для одноосного нагружения ПГМ-100МГ4 (или любой его аналог с усилием сжатия не менее 100 кН, обеспечивающий скорость нагружения $0,05 \pm 0,01$ кН/с). На рисунке 3 представлен внешний вид прессы.



Рисунок 3 – Внешний вид испытательного пресса ПГМ-100МГ4

Испытательный пресс ПГМ-100МГ4 предназначен для испытания на сжатие и изгиб образцов строительных материалов при скоростях нагружения, нормируемых соответствующим стандартом. Пресс снабжен электрическим приводом (сеть 220 В, 50 Гц) и тензометрическим силоизмерителем. Отличительной особенностью пресса ПГМ-100МГ4 являются малые габариты и масса, бесшумная работа электропривода и отсутствие пульсаций в гидросистеме за счет применения многоплунжерных насосов импортного производства, микропроцессорное управление процессом нагружения, обеспечивающее автоматическое поддержание скоростей нагружения, определяемых ГОСТами (в зависимости от метода испытаний), фиксацию разрушающей нагрузки, вычисление прочности с учетом масштабного коэффициента и занесение в архив блока управления.

Индикация результатов испытаний цифровая (графический дисплей с подсветкой). Ввод исходных данных с пульта управления (вид материала, размеры образца, скорость нагружения) осуществляется в диалоговом режиме.

Получаемые в процессе испытаний результаты автоматически архивируются, маркируются датой и временем измерения и передаются на ПК с возможностью последующего документирования.

6. Проведение измерений

- 6.2 Подготовительные операции заключаются в бурении вертикальной скважины $d = 76$ мм в кровле горной выработки буровым инструментом в соответствие с ГОСТ 19527-74 на глубину, превышающую мощность непосредственной кровли. При этом из скважины извлекается керн и производится его упаковка и документация в соответствие с ГОСТ 12071-2014. Отдельно в журнал заносятся координаты горизонтальных трещин естественного происхождения, пересекающих колонну керна.
- 6.3 В лабораторных условиях производится исследование изменения акустических свойств монолитных образцов в функции от величины осевого давления.
- 6.3.1 Из извлеченного керна изготавливают цилиндрический образец в соответствие с ГОСТ 21153.2-84.
- 6.3.2 Размещают образец в прессе, снабжая акустическими преобразователями, подключенными к низкочастотному дефектоскопу УСД-60Н.
- 6.3.3 Ступенчато нагружают образец до разрушения, при этом на каждой ступени нагружения регистрируют полную волновую форму ультразвуковых колебаний с сохранением в отдельный файл. Рекомендуемая величина ступени – не более 1 МПа.
- 6.4 В лабораторных условиях производится исследование изменения акустических свойств образцов, содержащих магистральную горизонтальную трещину в функции от величины осевого давления.
- 6.4.1 В извлеченном керне выбирают участок, содержащий единичную магистральную трещину, ортогональную оси керна. Из этого участка изготавливают цилиндрический образец в соответствие с ГОСТ 21153.2-84, так, чтобы трещина располагалась на равных расстояниях от торцов образца.

- 6.4.2 Размещают образец в прессе, снабжая акустическими преобразователями, подключенными к низкочастотному дефектоскопу УСД-60Н.
- 6.4.3 Ступенчато нагружают образец до разрушения, при этом на каждой ступени нагружения регистрируют полную волновую форму
- 6.5 В полевых условиях собирают ультразвуковой каротажный комплекс, состоящий из каротажного зонда и дефектоскопа УСД-60Н и производят измерения в следующей последовательности:
- 6.5.1 С помощью досылочных штанг размещают зонд на требуемой глубине в скважине так, чтобы горизонтальная трещина (выявленная на этапе исследования керна), располагалась между центральным излучающим преобразователем и одним из приемных, как это показано на рис. 4.



Рисунок 4 – Схема расположения каротажного зонда в скважине

- 6.5.2 Точную глубину расположения зонда и номер (идентификатор) скважины фиксируют в журнале наблюдений.
- 6.5.3 С помощью устройства пневматического прижима обеспечивают надежный контакт акустических преобразователей с массивом пород.
- 6.5.4 Производят регистрацию волновых форм сигналов, распространяющихся от излучающего преобразователя к первому и второму приёмному преобразователю, и сохраняют полученные записи в отдельные файлы.
- 6.5.5 Повторяют операции, описанные в п. 6.4.1 – 6.4.4 через равные промежутки времени. Длительность указанных промежутков определяется технологическими параметрами эксплуатации контролируемой выработки и определяет временной шаг мониторинга.

7. Обработка результатов измерений

Основным этапом обработки является вычисление приращений времени dt в коде волны в процессе изменения НДС горной породы с применением метода интерферометрии на кодах волн (coda wave interferometry, CWI).

Суть применения CWI сводится к совместной обработке сигналов, полученных до и после воздействия в данном случае совместно обрабатываются эталонный сигнал, полученный при нагрузке 0 МПа, и сигнал, полученный на i -ой ступени нагружений (или i -ом цикле мониторинга в скважине). На рисунке 5 представлен пример волновых форм сигналов, зарегистрированных на образце породы, подвергаемой одноосному нагружению.

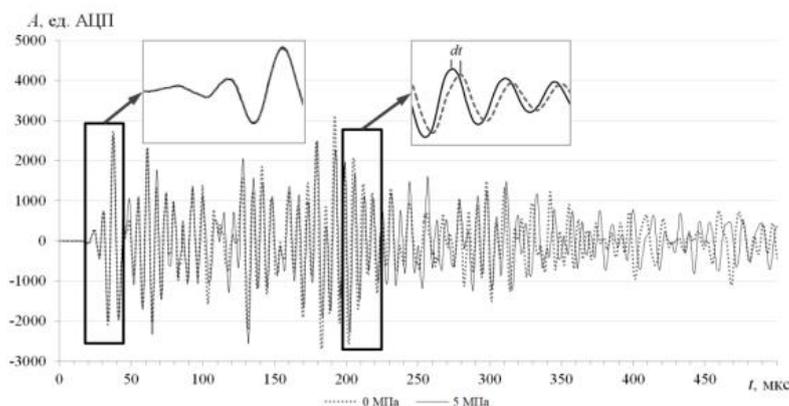


Рисунок 5 – Волновые формы зарегистрированных на образце породы импульсов при уровнях осевой нагрузки 0 и 5 МПа

Из рисунка 5 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

$$CC_k(\tau) = \frac{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A'(t-\tau)A(t)dt}{\sqrt{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A'^2(t-\tau)dt \int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A^2(t)dt}}, \quad (1)$$

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. При реализации CWI используется техника растягивания волновой формы (*stretching technique, ST*). В этом случае один сигнал плавно растягивается относительно другого за счет интерполяции. При достаточной дискретизации сигнала (10 и более отсчетов на период) вполне допустимо использовать кусочно-линейную интерполяцию. Метод ST обладает высокой точностью, а также обоснован с физической точки зрения, т.к. предполагает линейный рост смещения сигналов с увеличением времени распространения упругих волн.

Результатом реализации алгоритма CWI является график зависимости вычисленных значений dt от величин осевого давления.

Обработка результатов лабораторных измерений на образцах производится в следующей последовательности.

1. Зарегистрированные волновые формы экспортируются на жесткий диск персонального компьютера.
2. Волновая форма, зарегистрированная на нулевой ступени при нагрузке 0 МПа принимается за эталонную.
3. Волновая форма, зарегистрированная на первой ступени, подвергается растягиванию по алгоритму SS, при этом на каждой ступени растяжения вычисляется значение CC_k с использованием выражения (1).
4. Из всего массива вычисленных значений CC_k выбирают максимальное значение, а лаг τ , при котором наблюдается это максимальное значение, принимают за значение dt_1 (где нижний индекс означает номер ступени нагружения)

5. Повторяют вычисления п. 1–4 для волновых форм остальных ступеней нагружения формируя массив $dt_i(\sigma)$, где σ – абсолютное значение осевого механического напряжения.

Пункты 1–5 вычислений повторяют и для образца, содержащего магистральную трещину. Таким образом формируется две зависимости $dt_i(\sigma)$ для монолитного образца и образца, содержащего трещину, пример которых приведен на рисунке 6.

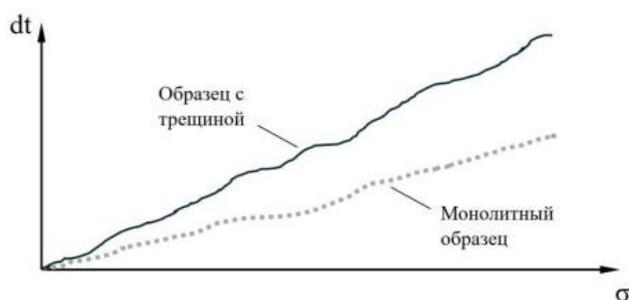


Рисунок 6 – Пример зависимостей $dt_i(\sigma)$ для монолитного образца и образца, содержащего трещину

Обработка результатов скважинных измерений производится в описанной в п. 1-5 последовательности, однако при этом формируются массивы значений $dt_i(n)$ для участка пород, содержащих трещину, и монолитного участка пород (n – номер цикла мониторинга).

Вычисление абсолютных значений приращений вертикальной компоненты напряжений в кровле горной выработки производится на основе сопоставления зависимостей $dt_i(\sigma)$, полученных в рамках лабораторного этапа, и $dt_i(n)$, полученных при каротажных измерениях в скважине, и иллюстрируется рисунком 7.

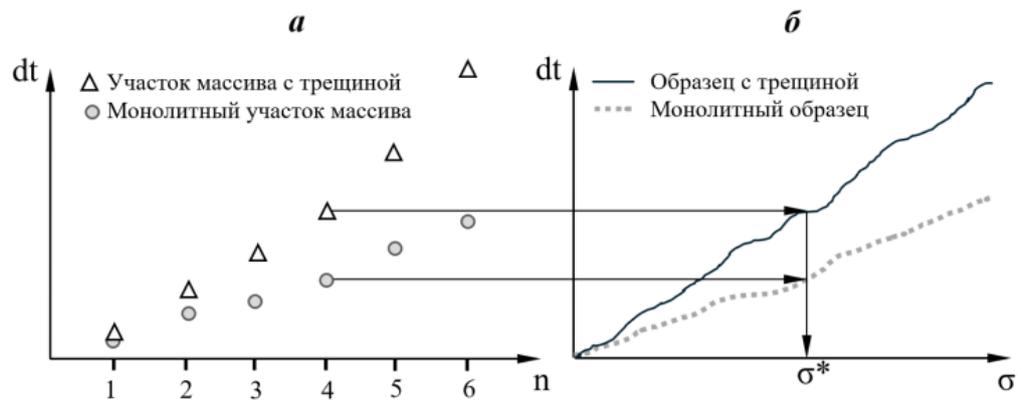


Рисунок 7 – Сопоставление зависимостей $dt_i(n)$ (a) и $dt_i(\sigma)$ (б)

Для каждого цикла мониторинговых измерений n определяют точное значение dt для монолитного участка пород и участка, содержащего трещину. Пользуясь полученной ранее тарировочной зависимостью $dt_i(\sigma)$, измеренные значения dt переводят в значения σ^* , которые и принимаются за абсолютные значения приращений напряжений вдоль оси скважины на указанном цикле мониторинга по сравнению с начальными значениями, зафиксированными в нулевой цикл. Использование двух пар зависимостей $dt_i(n) - dt_i(\sigma)$ (для монолитного и трещиноватого участков) повышает надежность определения значений σ^* . В случае, если в точке измерений трещины отсутствуют, то для определения σ^* используют только одну пару зависимостей $dt_i(n) - dt_i(\sigma)$, получаемую на монолитных образцах и монолитном участке пород вблизи измерительной скважины. В этом случае измерения по п. 6.4 не производятся.

Приложение В. Информация о внедрении результатов работы на предприятиях



№ 8 / Н
на № _____ от 27.02.2024

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Николенко Петра Владимировича, представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук, на тему: «Разработка экспериментально-теоретических
основ и технических средств контроля напряженно-деформированного состояния
породного массива на основе акустических эффектов в горных породах и компози-
ционных материалах» в условиях разработки железорудных месторождений Гор-
ной Шории, склонных и опасных по горным ударам

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методические рекомендации по кон-
тролю параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного мас-
сива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных мате-
риалах», разработанные в рамках диссертационной работы «Разработка экспери-
ментально-теоретических основ и технических средств контроля напряженно-де-
формированного состояния породного массива на основе акустических эффектов
в горных породах и композиционных материалах», выполненной в Горном Инсти-
туте НИТУ «МИСИС», опробованы и приняты к использованию на Таштагольской и
Шерегешской шахтах.

Главный инженер филиала
ЕВРАЗРУДА–филиал АО «ЕВРАЗ ЗСМК» А.Г. Гаврилов



Исполнитель:
Штирц В.А.
vladimir.shtirts@evraz.com

Акционерное общество «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», ш. Космическое (Заводской р-н), д. 16,
г. Новокузнецк, Кемеровская область – Кузбасс, Россия, 654043, тел. (3843) 59-59-00, факс: (3843) 59-59-59,
e-mail zsmk@evraz.com, ОГРН 1024201670020, ОКПО 05757676, ИНН 4218000951, КПП 421801001, rus.evraz.com

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
Николенко Петра Владимировича,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук,
на тему: «Разработка экспериментально-теоретических основ и технических
средств контроля напряженно-деформированного состояния породного массива
на основе акустических эффектов в горных породах и композиционных
материалах» в условиях подземной разработки рудных месторождений

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методические рекомендации по контролю параметров напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием акустико-эмиссионных эффектов в композиционных материалах», разработанные в рамках диссертационной работы «Разработка экспериментально-теоретических основ и технических средств контроля напряженно-деформированного состояния породного массива на основе акустических эффектов в горных породах и композиционных материалах», выполненной в Горном Институте НИТУ «МИСИС», приняты к использованию при разработке рудных месторождений подземным способом.

Директор СФ АО "ВНИМИ", к.т.н.

м.п.



Е.А. Разумов



ИБРАЭ

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

Б. Тульская ул., 52, Москва, 115191 • тел: (495) 955 22 86, факс: (495) 958 11 51
pbi@ibrae.ac.ru, www.ibrae.ac.ru • ОГРН 1027700196468, ИНН7726077310, КПП772601001

18 АПР 2024 № 1840401-0548

На № _____ от _____

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Николенко Петра Владимировича «Разработка экспериментально-теоретических основ и технических средств контроля напряженно-деформированного состояния породного массива на основе акустических эффектов в горных породах и композиционных материалах»

Настоящей справкой подтверждаю, что «Методические рекомендации по мониторингу динамики изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива с использованием ультразвуковой интерферометрии», разработанные в рамках диссертационной работы «Разработка экспериментально-теоретических основ и технических средств контроля напряженно-деформированного состояния породного массива на основе акустических эффектов в горных породах и композиционных материалах», выполненной в Горном институте НИТУ МИСИС, были использованы при разработке проектной документации «Разведка участка захоронения радиоактивных отходов (Енисейский участок Нижне-Канского массива)».

По результатам экспертного рассмотрения Проектная документация получила положительное заключение ФГКУ «Росгеолэкспертиза» № 154-02-06/2023 от «31» июля 2023 г, а вошедшие в её состав решения реализуются на участке перспективного размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов – Енисейский.

И.о. директора



Л.В. Матвеев

Л.В. Матвеев

Исп.
Тел./ Факс: