

КОМИТЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НЕДР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ
РАЗВЕДКИ /ВИТР/

на правах рукописи

АРХИПОВ Алексей Германович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛМАЗНОГО ПОРОДО-
РАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Специальность 05.15.14. – "Технология и техника геологораз-
ведочных работ"

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
В. П. ОНИЩИН

Санкт-Петербург

1992г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ	9
1.1. Существующие методы испытаний алмазного породоразрушающего инструмента	9
1.2. Исследования акустических полей в процессе бурения	13
Выводы	19
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ	22
2.1. Цель и задачи исследований	22
2.2. Методика исследований	25
2.3. Технические средства и метрологическое обеспечение работ	28
2.4. Обработка и интерпретация эксперименталь- ных данных	31
ГЛАВА 3. ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ	35
3.1. Акустические колебания и процессы разруше- ния горной породы и изнашивания породораз- рушающего инструмента	35
3.2. Классификация процессов, протекающих в сква- жине при бурении, по частоте акустических колебаний	41
3.3. Генезис высокочастотных акустических коле- баний при бурении	46
3.4. Информативные параметры высокочастотного диа- пазона акустического поля	50
Выводы	54

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ	55
4.1. Акустический спектр и тип применяемого породоразрушающего инструмента	55
4.2. Зависимость акустических спектров от свойств горных пород	64
4.3. Влияние режима бурения на параметры акустического поля	76
4.4. Информативные параметры акустического поля и удельная объемная энергия разрушения	84
4.5. Связь параметров акустического поля с износом алмазной коронки	98
Выводы	107

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	110
5.1. Использование результатов спектрального анализа акустического поля при испытаниях породоразрушающего инструмента	110
5.2. Основные положения метода	112
5.3. Сравнительные испытания алмазных коронок типа ИС и 02ИЗ	116
5.4. Проверка качества изготовления партии серийно-выпускаемой коронки типа 02ИЗ	125
Выводы	129

ГЛАВА 6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	
МЕТОДА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ	130
6.1. Техничко-экономические преимущества метода . . .	130
6.2. Экономический эффект от использования ме-	
тода	131
Выводы	135
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	136
ЛИТЕРАТУРА	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Разработка и серийный выпуск новых типов алмазного породоразрушающего инструмента является важной задачей повышения эффективности бурения. Неотъемлемой частью процессов разработки и серийного выпуска инструмента являются испытания, в ходе которых проверяется эффективность заложенных конструктивных решений или оценивается качество изготовления. Однако, до настоящего времени методы испытаний алмазного инструмента не претерпели значительных изменений. Основным методом является отработка образцов инструмента в производственных условиях. Производственные испытания сопряжены с большой трудоемкостью и растянуты во времени, что определяет их высокую стоимость. При планировании испытаний в производственных условиях возникают трудности с выбором района испытаний и оптимальных режимов обработки инструмента. При этом информативность производственных испытаний совершенно недостаточна для принятия объективных решений по совершенствованию конструкции инструмента.

В этих условиях большое значение приобретает создание нового ускоренного метода испытаний алмазного породоразрушающего инструмента, который мог бы быть применен и при разработке и при серийном выпуске инструмента. Новый метод должен не только быстро определять работоспособность инструмента, но и давать информацию, позволяющую установить оптимальные режимы бурения, рациональные области применения инструмента. В дальнейшем такая информация может быть использована для выработки рекомендаций по совершенствованию конструкции инструмента.

Устранить недостаточную информативность испытаний и сократить время их проведения можно используя физические явления, сопровождающие процесс разрушения породы. Анализ акустических исследований, проведенных в процессе бурения, показал, что изу-

чение акустического поля, возникающего при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, является перспективным направлением для разработки методов и технических средств ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

Цель работы заключалась в разработке метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля.

Задачами исследований являлись:

1. Определение наиболее информативных параметров акустического поля для контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента.

2. Установление зависимости информативных параметров акустического поля от типа, состояния и интенсивности износа породоразрушающего инструмента, физико-механических свойств разбуриваемых горных пород, режима бурения и удельной объемной энергии разрушения.

3. Опробование разработанного метода для выяснения его возможностей при решении различных задач, возникающих при разработке и серийном выпуске породоразрушающего инструмента.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ :

1. Акустические колебания в диапазоне частот 7-20 кГц, возникающие при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, непосредственно связаны с процессом разрушения горной породы. Информативными параметрами акустического поля для объективного контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента являются параметры, характеризующие амплитудно-частотные свойства диапазона 7-20 кГц — энергия диапазона W_A и частота, разделяющая диапазон на две части с равными энергиями f_A .

2. Спектральный состав акустических колебаний, связанных с

разрушением породы, определяется типом породоразрушающего инструмента, свойствами горных пород и режимом бурения. Акустический спектр может быть использован в качестве "образа" типа породоразрушающего инструмента.

3. Информативные параметры акустического поля могут быть использованы для оценки механизма разрушения породы. С позиции обеспечения при бурении минимальных затрат энергии на разрушение, критерием оптимальности процесса разрушения породы является достижение при бурении с помощью регулирования режима бурения или подбором типа породоразрушающего инструмента минимальных значений частоты f_A при достаточно высоких значениях энергии W_A .

4. Процесс изнашивания породоразрушающего инструмента связан с энергией акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц. Измерение энергии W_A при бурении позволяет контролировать состояние инструмента и прогнозировать интенсивность износа (ресурс) импрегнированных алмазных коронок на различных режимах.

Научная новизна. Впервые разработан метод ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля. Метод защищен двумя авторскими свидетельствами.

Практическая ценность работы. Установлена возможность использования результатов анализа акустического поля для ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

Реализация результатов работы. Результаты исследований были использованы при составлении методических рекомендаций для ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля.

Методические рекомендации внедрены и используются во Всесоюзном научно-исследовательском институте методики и техники разведки при разработке алмазного породоразрушающего инструмента.

Апробация работы. Основные результаты исследований и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на 4 региональной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Северо-Запада "Научные и практические проблемы геолого-разведки" (1991г.), 2-м Международном симпозиуме по бурению скважин в осложненных условиях (1992г.). Серии работ по использованию акустических полей для решения практических задач бурения занимали призовые места в конкурсах внеплановых работ НТО "Горное" (1989г.-II место, 1990г.-I место, 1991г.-III место).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и содержит 150 страниц машинописного текста, 22 таблиц, иллюстрирована 30 рисунками. Список литературы включает 87 наименований.

В основу диссертации положены результаты научно-исследовательских работ, полученные в период с 1988 по 1992 год во Всесоюзном научно-исследовательском институте методики и техники разведки (ВИТР).

Работа над диссертацией проводилась под научным руководством доктора технических наук В.П.Онищина, которому автор выражает свою глубокую признательность.

Автор признателен старшим научным сотрудникам ВИТР Б.Б.Шатрову и О.С.Андрееву за ценные советы и замечания, за постоянное внимание в решении многих вопросов, а также всем сотрудникам отделов методов разведки и лабораторной техники, научно-экспериментальных исследований, алмазного породоразрушающего инструмента, технологии бурения и роботизированных буровых комплексов за участие и помощь в работе, ценные практические советы.

ГЛАВА I. АНАЛИЗ РАННЕ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ

I.1. Существующие методы испытаний алмазного породоразрушающего инструмента

Разработка и серийный выпуск новых высокопроизводительных типов алмазного породоразрушающего инструмента является важнейшей задачей повышения эффективности бурения. Испытания являются неотъемлемой частью процессов разработки и серийного выпуска инструмента. К настоящему времени в России сложилась система различных видов испытаний, которая охватывает как стадию разработки, так и серийный выпуск инструмента. На стадии разработки проводятся макетные, предварительные и приемочные испытания вновь разрабатываемых образцов инструмента /40/. Каждый вид испытаний имеет определенную цель: при макетных испытаниях отрабатывается оптимальная конструкция алмазных коронок, на предварительных испытаниях производится окончательная проверка готовности коронки к приемочным испытаниям, приемочные испытания устанавливают целесообразность постановки коронки на серийное производство. При серийном выпуске алмазных коронок проводятся контрольные испытания /41/, которые подразделяются на периодические (для контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска), инспекционные (для контроля стабильности качества продукции специально уполномоченными организациями) и сертификационные (для контроля соответствия характеристик свойств качества продукции национальным и международным нормативно-техническим документам).

Проблема испытаний алмазного породоразрушающего инструмента появилась одновременно с началом интенсивного развития алмазного бурения в СССР в 60-х годах. Первым документом, устанавливающим порядок проведения испытаний, была "Программа и методика приемоч-

ных испытаний породоразрушающего инструмента для геологоразведочного бурения", появившаяся в 1968 году /69/. Она была разработана Специальным конструкторским бюро Мингео СССР с участием ВИТРа и других организаций и вобрала в себя весь накопленный к тому времени в СССР опыт по испытаниям породоразрушающего инструмента. Согласно программе, приемочные испытания проводились в производственных условиях. В одних и тех же геолого-технических условиях отрабатывались опытные и базовые коронки, причем опытные коронки должны были отрабатываться на оптимальных режимах. При испытаниях фиксировались проходка за рейс, проходка на коронку и механическая скорость бурения. Результаты отработки опытной и базовой коронок обрабатывались методами математической статистики, после чего делался вывод о целесообразности принятия опытной коронки к серийному производству.

Многочисленные работы /21,26,2,27/ описывают результаты испытаний, проведенных по методике, установленной в программе. Аналогичная методика применялась при макетных, предварительных и контрольных испытаниях. Большой объем всех видов испытаний выявил характерные недостатки, присущие данному методу. Низкая точность априорного определения рациональной области применения опытного породоразрушающего инструмента вынуждала проводить испытания в широком диапазоне горных пород, что значительно удлиняло время испытаний /26/. Оптимальные режимы бурения носили предположительный характер и это делало необходимым применять при бурении большое количество сочетаний режимных параметров /21/. Испытания позволяли оценивать технико-экономическую эффективность породоразрушающего инструмента, но не давали информацию о причинах, обусловивших такие результаты. Это затрудняло определение направлений совершенствования конструктивных параметров породоразрушающего инструмента.

В 1987 году был введен в действие разработанный ВИТРОм отраслевой стандарт, устанавливающий общие положения проведения государственных приемочных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента, в котором методика испытаний не претерпела существенных изменений /44/. По-прежнему испытания проводятся в производственных условиях, которые должны соответствовать назначению и области применения опытных образцов алмазных коронок. Опытные и базовые образцы обрабатываются методом последовательного чередования по рейсам до снятия с испытаний. Режимы бурения устанавливаются на основании рекомендаций. Основными проверяемыми показателями качества опытных образцов являются полный средний ресурс, установленный ресурс и удельный расход алмазов. Кроме того, дополнительно учитываются средняя механическая скорость бурения, среднее углубление за рейс, средний выход керна и интенсивность искривления скважин. Эти данные определяются путем обработки результатов испытаний методами математической статистики. По результатам испытаний делается вывод о постановке опытного образца на серийное производство. Результаты испытаний коронок по данной методике содержится в работах /35,9,34,36,24/.

С целью установления состояния и тенденций развития вопроса испытаний алмазного породоразрушающего инструмента в нашей стране и за рубежом был произведен поиск патентных документов, относящихся к испытаниям инструмента. Предметом поиска с помощью автоматизированной информационно-поисковой системы АИПС ПД ВНИИПИ /5/ являлись "Способы и устройства испытаний породоразрушающего инструмента". База данных АИПС ПД содержит библиографическую информацию о 7678555 патентных документах (на 1 января 1992г.), включая все патентные документы, опубликованные после 01.01.82г. Глубина поиска была принята 10 лет. Поиск осуществлялся по странам, ведущим в разработке алмазного породоразрушающего инструмен-

та (СССР, США, Франция, Великобритания, Канада, Япония, Китай, Чехословакия, Швеция) и фирмам - производителям инструмента - "Acker drill" (USA), "Longyer" (USA), "Christensen" (USA), "Craelius AB" (Sweden), "Diamant Boart" (Belgium), "Dewegat Electric" (USA), "Levanto" (Finland), "Svenska Unicorn AB" (Sweden), "Koking Boring" (Japan).

В результате поиска документы, касающиеся новых способов и средств испытания алмазного породоразрушающего инструмента, не обнаружены. Поиск по реферативным и библиографическим изданиям ВНИИ "Изобретения за рубежом", Изобретения в СССР и за рубежом", РЖ ВНИИ "Геология" также дали отрицательный результат. Это позволяет утверждать, что область испытаний инструмента относится к "НУ ХАУ" и иностранные фирмы не склонны к публикациям последних достижений в данной области. Зато периодические научные издания содержат большое количество информации рекламного характера, касающегося показателей новых типов алмазного породоразрушающего инструмента /82,84/, но в этих материалах ничего не говорится о способах создания инструмента.

Общей линией в технической политике ведущих отечественных и зарубежных фирм-производителей алмазного породоразрушающего инструмента, как следует из анализа литературных источников, является развитие испытательных буровых станков /40,85,79/. Испытательные буровые станки полностью оснащены контрольно-измерительной аппаратурой для регистрации параметров процесса бурения /86/. Интерес фирм к проведению испытаний в станковых условиях объясняется значительной экономией времени и средств по сравнению с испытаниями в производственных условиях. Кроме этого, станковые испытания позволяют совместить процесс испытаний с работами иссле-

довательского характера, что особенно важно при разработке новых типов алмазных коронок. Однако, методика стендовых испытаний не отличается от методики испытаний инструмента в производственных условиях /40/. Это снижает эффективность стендовых испытаний. Поэтому не прекращаются попытки разработать новые методы испытаний, позволяющие значительно ускорить и повысить информативность испытаний.

Суммируя вышеизложенное, можно сказать, что в настоящее время имеется большая потребность в разработке нового, ускоренного метода испытаний, который позволял бы быстро определять эффективность конструкции алмазной коронки, оптимальные режимы бурения, давал возможность прогнозировать ресурс инструмента на различных режимах и устанавливать область рационального применения. Особенно эффективно этот способ мог бы использоваться на стадии макетных испытаний, когда необходимо быстро оценивать эффективность закладываемых конструктивных решений.

1.2. Исследования акустических полей в процессе бурения

Проблема перевода испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на качественно новый уровень может быть решена на основе объективной информации о работе инструмента на забое в процессе бурения. Перспективным источником информации для выяснения сущности процессов, протекающих на забое, является акустическое поле, возникающее при взаимодействии инструмента с горной породой. Наиболее интенсивно акустические исследования в процессе бурения ведутся при проходке скважин на нефть и газ /37/ для решения следующих задач:

- контроль работы породоразрушающего инструмента и оптимизации режима бурения;
- дифференциация геологического разреза;

- определение пространственного положения забоя скважины.

При акустических исследованиях в процессе бурения скважин на нефть и газ получили развитие в основном два направления: исследование динамических характеристик процесса турбинного бурения по изучению колебательных процессов, возникающих в буровой колонне, и исследование кинематических и динамических характеристик волнового поля по измерениям на поверхности земли.

Первое направление разрабатывалось в период 1965-1975 гг. Копыловым В.Е. и Гуреевым И.Л. и было подчинено в основном решению задачи контроля работы шарошечного долота на забое при турбинном бурении. Колебания колонны записывались непосредственно в производственных условиях для последующего лабораторного анализа. Колебания регистрировались с помощью датчика, который закреплялся на поверхности ведущей трубы (квадрата) и записывающего устройства. В качестве записывающего устройства использовались портативные магнитофоны 2 и 3 классов. При записи фиксировали осевую нагрузку, расход промывочной жидкости, параметры глинистого раствора и скорость бурения. Износ вооружения долота измеряли по оставшейся высоте зубьев после окончания рейса и подъема снаряда. В лабораторных условиях изучались амплитуды, частоты и формы колебаний, а также их частотный спектр. Для этого использовались: анализатор спектра АСЧХ-1, самописец Н-373, электронно-световой вольтметр Ф-563, реле времени, частотомер ЧЗ-7, звуковой генератор, осциллограф С1-13.

Основные результаты исследований отражены в работах /27, 15, 16, 17, 18, 19, 20/, а затем систематизированы и теоретически обоснованы в работе /28/, опубликованной в 1979г. Исследования позволили классифицировать по частоте источники колебаний, регист-

рируемых на ведущей трубе. Колебания инфранизких частот 0-5 Гц генерируются пульсациями давления промывочной жидкости, осадкой изогнутой колонны бурильных труб при подаче инструмента, колебаниями талевой системы и буровой вышки под действием ветровой нагрузки и т.д. Низкочастотные колебания 5-50 Гц возникают при движении шарошек по неровному забою. Колебания средних частот 100-500 Гц вызываются ударами зубьев долота о забой скважины. Высокочастотные колебания 500-5000 Гц обуславливаются кавитационными и турбулентными процессами в гидравлической системе скважины.

Для контролирования работы долота наибольший интерес представляла группа среднечастотных колебаний - колебаний зубьев долота. Возможность приема на устье скважины упругих волн, возбуждаемых ударами зубьев долота о забой, установлена до глубины 4184 м. Практическим результатом исследований явилось создание индикатора скорости вращения долота (ИВД). Принцип его действия заключается в измерении средней частоты колебаний зубьев, переводимой в скорость вращения долота. Этот прибор измеряет скорость вращения шарошек, которая зависит от износа вооружения, силового контакта долота с забоем, типа горной породы. Это позволяет использовать прибор для контроля протекания забойного процесса, выявления неисправностей в долоте. Опыт производственного применения ИВД показал эффективность управления процессом бурения по прибору. Наблюдалось увеличение механической скорости бурения вследствие улучшения загрузки турбобура.

Рогоцким Г.В. предложен новый метод управления процессом бурения на основе использования динамических явлений /54,55/. Для регулирования режима бурения используются энергетические характеристики упругих волн, распространяющихся по колонне бурильных труб и измеряемых на поверхности. Регулирование режима

бурения основано на поддержании оптимальных значений режимных параметров по минимуму энергии упругих волн в бурильной колонне. Считается, что при этом максимальное количество энергии передается в горную породу на разрушение. Предложенный способ управления процессом бурения с применением специально разработанного устройства измерения энергетических характеристик упругих волн прошел промышленное опробование. При этом был отмечен рост механической скорости и проходки долота за рейс.

Второе направление разрабатывается институтами ВНИИГТ и ВНИИБТ /37/. В 1973-1975 гг. в СССР были проведены первые исследования, связанные с изучением возможности измерения кинематических и динамических особенностей волновых процессов, возникающих при бурении скважин, с помощью наземной системы наблюдений. Исследовались кинематические и динамические характеристики упругих волн, которые образуются при работе турбобура и распространяются по колонне бурильных труб и в околоскважинном пространстве в верхнем слое земли.

Измерения проводились с помощью серийной сейсмической аппаратуры типа СС-24-61 М и "Поиск-48-МОВ". Упругие колебания регистрировались сейсмоприемниками на поверхности и после усиления записывали на магнитную ленту. Записанные сигналы подвергались спектральной и корреляционной обработке.

Проведенные исследования показали, что на основе поверхностных измерений упругого поля, возбуждаемого буровым инструментом, возможно определять текущие координаты долота в процессе бурения /56, 31, 48, 32/. Результаты определения пространственного положения ствола скважины путем акустических измерений в процессе бурения и инклинометрические замеры имели удовлетворительную сходимость.

Установлена возможность решения ряда геологических задач,

таких, как: расчленение геологического разреза, прогнозирование пластов с аномально-высокими пластовыми давлениями, расположение зон аномального поглощения промывочной жидкости и разломов, оценка деформационно-прочностных характеристик пройденных горных пород, определение расстояния от долота до первой литологической границы /57,58,59,37,22,60/. Решение этих задач основывается на функциональной связи физико-механических свойств разбуриваемых горных пород с параметрами образующихся продольных и поперечных упругих волн.

Исследования также проводились в направлении оптимизации режима бурения /61,62,63/. Отмечается, что дифференцированное применение параметров режима бурения в соответствии с акустическими параметрами горных пород позволяет повысить механическую скорость бурения.

Для алмазного бурения на твердые полезные ископаемые акустические исследования в процессе бурения проводились в основном с целью получения информации о горных породах. Беляковым В.И., Блиновым Г.А., Ивановым О.В. установлено, что параметры упругих вибраций породоразрушающего инструмента, возникающих при бурении, коррелируют с механическими характеристиками разрушаемых горных пород /6/. На основе отношения амплитуд электрических и упругих сигналов разработан способ определения свойств горных пород в процессе бурения /7/.

Шатровым Б.Б., Андреевым О.С., Сtryгиным Д.М., Рудаковой Н.П. и др. проводились исследования акустических полей с целью разработки метода диагностики горных пород в процессе бурения /72,73,74,75,76,1/. Акустические измерения осуществлялись в ближней зоне забоя бурящейся скважины. При исследованиях использовались пьезоэраметрические датчики, позволяющие регистрировать

акустические колебания в широком диапазоне частот. Изучался спектральный состав акустических колебаний при разбуривании различных типов горных пород. Для измерения спектров применялся анализатор СК4-56, соединенный с двухкоординатным самописцем. В результате исследований было установлено, что в спектре акустического поля существует область от 5 до 20 кГц, в пределах которой отмечаются максимумы амплитуды так называемых "характеристических частот", по которым возможно выделение различных горных пород в процессе бурения.

Однако эти работы не позволили установить связь параметров акустического поля с типом, состоянием и интенсивностью износа алмазной коронки, режимом бурения и показателями эффективности процесса бурения (механической скоростью бурения, мощностью, расходуемой на забое и удельной объемной энергией разрушения).

Особый интерес вызывают работы, показывающие связь акустических колебаний с процессами, протекающими на забое. Курочкин П.Н. /33/ экспериментально исследовал динамические нагрузки на алмазы, возникающие при бурении. Исследования проводились на специальных установках, обеспечивающих запись осевой и тангенциальной составляющей усилия резания единичного алмаза. Им установлено, что при бурении алмазными коронками, алмазы воспринимают динамические нагрузки, различные по частоте и амплитуде. При этом каждому импульсу силы соответствует единичный акт разрушения. Исаевым М.И. и Пономаревым П.В. /23/ была разработана волновая теория разрушения горной породы при алмазном бурении. Согласно этой теории, разрушение горной породы происходит за счет действия упругих волн растяжения-сжатия, возникающих при взаимодействии алмаза с породой. Интенсивность разрушения гор-

ной породы определяется параметрами упругих волн: длительностью, спектральным составом и напряжением, создаваемым волной. Характер процесса разрушения определяется свойством горной породы поглощать энергию упругой волны. К сожалению, волновая теория разрушения горной породы не получила дальнейшего развития и практического использования.

Вышеизложенные материалы позволяют утверждать, что акустическое поле, возникающее при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, имеет непосредственную связь с процессом разрушения горной породы. Поэтому акустические исследования при бурении являются перспективным направлением для выяснения физической сущности процессов, протекающих на забое, и разработки новых методов и технических средств ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

Выводы по главе I.

На основании проведенного анализа литературных источников по испытаниям алмазного породоразрушающего инструмента и исследованиям процесса бурения с помощью акустических полей можно сделать следующие выводы:

До настоящего времени методы испытаний алмазного породоразрушающего инструмента не претерпели значительных изменений. Основным методом является совместная отработка опытных и базовых образцов инструмента в производственных условиях.

Производственные испытания сопряжены с большой трудоемкостью и растянуты во времени, что определяет их высокую стоимость.

При планировании испытаний в производственных условиях возникают трудности с выбором района испытаний и оптимальных

режимов отработки.

Проверяемые при испытаниях показатели качества опытных образцов алмазных коронок (полный средний ресурс, установленный ресурс, удельный расход алмазов, а также механическая скорость бурения и др.) не позволяют определить сущность процессов, протекающих на забое при бурении. Поэтому, направления совершенствования конструкции породоразрушающего инструмента определяются на основе субъективных представлений разработчика о характере процесса разрушения породы и изнашивания инструмента, что не всегда приводит к правильным решениям.

Общей линией в технической политике ведущих отечественных и зарубежных фирм-производителей алмазного породоразрушающего инструмента является развитие испытательных буровых стендов. Испытания в стендовых условиях сокращают время и затраты на проведение испытаний и совместить процесс испытаний с работами исследовательского характера, что особенно важно при разработке новых типов инструмента. Однако методика стендовых испытаний не отличается от методики испытаний инструмента в производственных условиях, и это значительно снижает эффективность стендовых испытаний.

В настоящее время имеется большая потребность в разработке нового, ускоренного метода испытаний алмазного породоразрушающего инструмента, который мог бы быть применен и при разработке и при серийном выпуске инструмента. Новый метод должен не только быстро определять работоспособность инструмента, но и давать информацию об оптимальных режимах бурения и создать теоретическую базу для выработки рекомендации по областям рационального применения и направлениям совершенствования инструмента.

Акустическое поле, возникающее при бурении, является важным источником получения геолог-технической информации.

Основной объем акустических исследований проведен при турбинном бурении скважин на нефть и газ с помощью наземной системы измерений. Доказана принципиальная возможность использования акустических волн, для решения задач контролирования работы породоразрушающего инструмента, регулирования режима бурения, дифференциации геологического разреза и определения пространственного положения забоя скважины в процессе бурения.

При бурении на твердые полезные ископаемые акустические исследования проводились для решения чисто геологических задач. Установлена возможность исследования геологического разреза в процессе бурения по данным измерений спектров акустического поля, возбуждаемого породоразрушающим инструментом.

Ряд источников указывает на непосредственную связь акустического поля с взаимодействием алмазов с забоем и разрушением горной породы.

Акустические исследования при бурении являются перспективным направлением для выяснения физической сущности процессов, протекающих на забое и разработки новых методов и технических средств испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента. Этот метод должен сократить время и затраты на производство испытаний за счет оперативного получения объективной информации о работоспособности породоразрушающего инструмента не дожидаясь его полной отработки.

Рассматривая задачи, решаемые при различных видах испытаний, можно отделить испытания инструмента, проводимые на стадии его разработки от испытаний при серийном выпуске. При испытаниях на стадии разработки нового типа породоразрушающего инструмента важно оперативно оценить его работоспособность. Для этого необходимо получить информацию об оптимальных режимах бурения и прогнозировать ресурс инструмента. При серийном выпуске инструмента испытания должны решать вопрос контроля качества выпускаемой продукции.

Проблема определения для нового типа породоразрушающего инструмента оптимальных режимов бурения и прогноза ресурса требует специального рассмотрения. Определение оптимальных режимов бурения основывается на принятом критерии оптимальности процесса бурения. В настоящее время известно несколько критериев оптимальности процесса бурения, каждый из которых применяется для достижения определенных целей [25, 49]. С точки зрения физики процесса разрушения, наиболее объективным критерием оптимальности является величина удельной объемной энергии разрушения W_Q [49, 11, 64]. Величина W_Q определяется по формуле

$$W_Q = \frac{W_3}{Q}, \text{ Дж/м}^3, \quad (2.1)$$

где W_3 - энергия, расходуемая на забое, Дж; Q - объем разрушенной породы, м³.

Вообще, удельные энергозатраты являются объективным критерием любого физического процесса. Величина удельной энергии широко используется для оценки процесса дезинтеграции руд в обогащении /53/ и управления режимом резания в металлообрабатывающей промышленности /78/. Сложность применения критерия W_Q непосредственно к процессу бурения заключается в выделении энергии, расходуемой на забое W_3 из суммарных энергозатрат, куда кроме W_3 входят потери энергии на вращение снаряда и в трансмиссии станка. Для определения оптимальных режимов бурения для нового типа породоразрушающего инструмента необходимо иметь возможность контролировать величину W_Q непосредственно в процессе бурения.

Прогноз ресурса коронки, не дожидаясь ее полной отработки, можно осуществить только контролируя интенсивность износа коронки в процессе бурения. Под интенсивностью износа коронки J понимается величина отношения линейного износа по высоте матрицы к интервалу бурения.

$$J = \frac{\Delta h}{\Delta H}, \text{ мм/м}, \quad (2.2)$$

где Δh - линейный износ матрицы коронки по высоте, мм, ΔH - интервал бурения, м.

При известной интенсивности износа коронки ее ресурс H_K определяется по формуле

$$H_K = \frac{h_m}{J}, \text{ м}, \quad (2.3),$$

где h_m - высота алмазосодержащего слоя коронки, мм.

Для контроля интенсивности износа коронки J необходимо ус-

тановить ее связь с какой-либо величиной, которую можно измерять в процессе бурения.

Контроль качества при серийном выпуске породоразрушающего инструмента может быть решен путем создания "портрета" или "опорного образа" эталонного образца породоразрушающего инструмента. Тогда испытания по проверке качества серийно-выпускаемого инструмента сведутся к сравнению "портретов" эталонного и изготовленного образцов инструмента. Использование для создания "портрета" породоразрушающего инструмента геометрических измерений представляется автором неперспективным из-за трудоемкости и невысокой точности последних.

Величины удельной объемной энергии разрушения W_Q и интенсивности износа инструмента J являются производными процесса разрушения горной породы. Отсюда можно предположить, что информация о величинах W_Q и J содержится в параметрах физических явлений, сопровождающих процесс разрушения. Одним из таких физических явлений является акустическое поле. Анализ акустических исследований, проведенных в процессе бурения, показал, что изучение акустического поля является перспективным направлением для разработки новых методов и технических средств ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента. Акустическое поле может стать источником информации о величинах W_Q и J и служить своеобразным "портретом" типа породоразрушающего инструмента. Поэтому в качестве объекта исследований выбрано акустическое поле, возникающее при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем. По сути речь идет об исследовании самого процесса разрушения на основе акустических измерений. Исходя из этого, задачами исследований являлись:

- Определение наиболее информативных параметров акустичес-

кого поля для контроля процесса разрушения горной породы;

- Установление зависимости информативных параметров акустического поля от типа, состояния и интенсивности износа породоразрушающего инструмента, физико-механических свойств разбуриваемых горных пород, режима бурения и удельной объемной энергии разрушения;

- Опробование разработанного метода с целью выяснения его возможностей при решении различных задач, возникающих при разработке и серийном выпуске породоразрушающего инструмента.

2.2. Методика исследований

В основу исследований был положен эмпирический метод. Экспериментальные исследования акустического поля производились на стендах ВИТРа и на ряде месторождений Карело-Кольского региона и Донбасса.

В начале исследований были определены наиболее информативные параметры акустического поля для контроля процесса разрушения горной породы. С этой целью был изучен спектральный состав акустических колебаний, возникающих от различных процессов, протекающих в скважине при бурении и акустические шумы от работы бурового оборудования.

Для выяснения зависимости акустического поля от главных факторов, определяющих характер протекания процесса бурения, таких как: тип и состояние породоразрушающего инструмента, свойства горных пород и режим бурения, экспериментальные работы были разбиты на ряд этапов. Каждый этап имел целью установление влияния одного из факторов на информативные параметры акустического поля. При планировании экспериментальных работ по этапу было предусмотрено, что при изменении исследуемого фактора остальные остаются неизменными. Так, зависимость акустического поля от

типа породоразрушающего инструмента определялась по результатам бурения различными типами алмазных коронок на постоянном режиме. Для определения зависимости акустического поля от свойств горных пород сравнивались акустические спектры, зафиксированные при бурении различных пород одним типом породоразрушающего инструмента на постоянном режиме. Влияние режима бурения выяснялось при изменении в процессе бурения осевой нагрузки и частоты вращения (расход промывочной жидкости не изменялся и был равен $19 \text{ дм}^3/\text{мин}$). Для определения изменений акустического поля в зависимости от состояния породоразрушающего инструмента производилось бурение одним типом коронки на постоянном режиме с регистрацией акустического поля по мере ухудшения режущих свойств коронки.

Связь информативных параметров акустического поля с механической скоростью бурения, мощностью, расходуемой на забое и удельной объемной энергии разрушения изучалась при определении зависимости акустического поля от типа породоразрушающего инструмента, физико-механических свойств пород и режима бурения. Для определения связи информативных параметров акустического поля с интенсивностью износа коронки производилось бурение скважин глубиной 0,5 м на постоянных режимах с определением износа коронки по окончании бурения.

Обработка экспериментальных данных производилась в лабораторных условиях. Расчет зависимостей информативных параметров акустического поля от факторов, определяющих процесс бурения, осуществлялся на ЭВМ. В результате обработки экспериментальных данных были получены зависимости информативных параметров акустического поля от типа, состояния и интенсивности износа породоразрушающего инструмента, физико-механических свойств горных пород, режима бурения и удельной объемной энергии разрушения. Это позволило



Рис.2.1. Расположение датчика для измерения акустического поля в монолите горной породы:

1 - монолит горной породы, 2 - наблюдательная скважина, 3 - датчик, 4 - породоразрушающий инструмент, 5 - колонковая труба.

предложить принципиально новый метод ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента.

2.3. Технические средства и метрологическое обеспечение работ

При экспериментальных исследованиях использовался буровой стенд, оснащенный станком СКБ-7 с плавнорегулируемыми приводами вращения и подачи, контрольно-измерительной аппаратурой КУРС-613 и киловаттметром Д-342.

Для измерения акустического поля использовалась стандартная измерительная и регистрирующая аппаратура, а также специализированный датчик, регистрирующий акустические колебания в широком диапазоне частот. Датчик состоял из цилиндрического корпуса, в котором размещались два соединенных последовательно акустико-электрических преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19 в форме цилиндра диаметром 30 мм и высотой 40 мм и предварительный усилитель. Датчик устанавливался в наблюдательную скважину, пробуренную в монолите горной породы (Рис.2.1.).

Схема измерения акустического поля в стендовых условиях представлена на рис.2.2. В процессе бурения акустические колебания, образующиеся при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, распространялись по горной породе и принимались датчиком. Сигнал с датчика записывался на магнитную ленту магнитографом Н067. Частотный диапазон записи 0-20 кГц. Контроль прохождения сигнала с акустического датчика проводился осциллографом СИ-64 (Рис.2.3.).

При полевых исследованиях для измерения акустического поля использовался акустический датчик от аппаратуры межскважинного акустического просвечивания АПП-1. Акустический датчик располагался в скважине, находящейся в нескольких метрах от бурящейся,

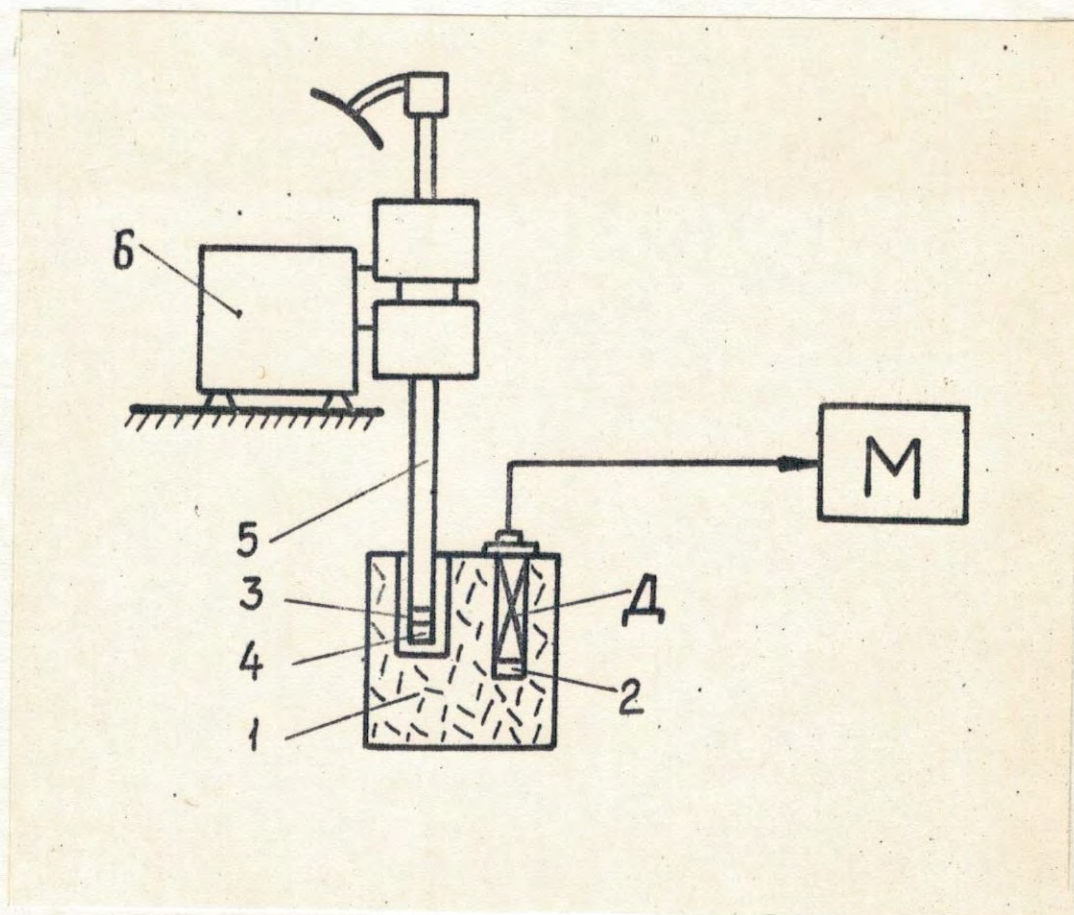


Рис.2.2. Схема измерения акустического поля в стендовых условиях:

1 - монолит горной породы; 2 - наблюдательная скважина;
3 - бурящаяся скважина; 4 - породоразрушающий инструмент;
5 - колонковая труба; 6 - буровой станок; СД - скважин-
ный датчик; М - магнитограф.



Рис.2.3. Аппаратура для записи акустического поля:

1 - магнитограф Н067; 2 - осциллограф С1-64

и спускался вниз синхронно с углубкой инструмента. Применявшаяся при полевых исследованиях регистрирующая аппаратура не отличалась от использовавшейся при стендовых работах.

Для измерения износа алмазных коронок использовался профилометр ПИК, обеспечивающий точность измерений $\pm 0,01$ мм.

При проведении экспериментальных исследований обеспечивался строгий метрологический контроль всех используемых средств измерений.

Контрольно-измерительная аппаратура КУРС-613, применявшаяся для регистрации параметров режима бурения и механической скорости, проходила метрологический контроль перед каждым этапом экспериментальных работ.

Акустические датчики прошли государственную поверку во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева, признаны годными и допущены к применению по классу 2 дБ при доверительной вероятности 0,95 (МН-1620-87).

Использовавшиеся радиоизмерительные приборы проходили периодический контроль в специализированных метрологических организациях.

Проведенные мероприятия по метрологическому контролю, использовавшихся при исследованиях средств измерений, обеспечили проведение высокоточных измерений акустического поля и параметров процесса бурения.

2.4. Обработка и интерпретация экспериментальных данных

Для определения параметров акустического поля, записанные в ходе экспериментов на магнитную ленту акустические сигналограммы, подвергались амплитудно-временному и спектральному анализам. Амплитудно-временной анализ позволял определить

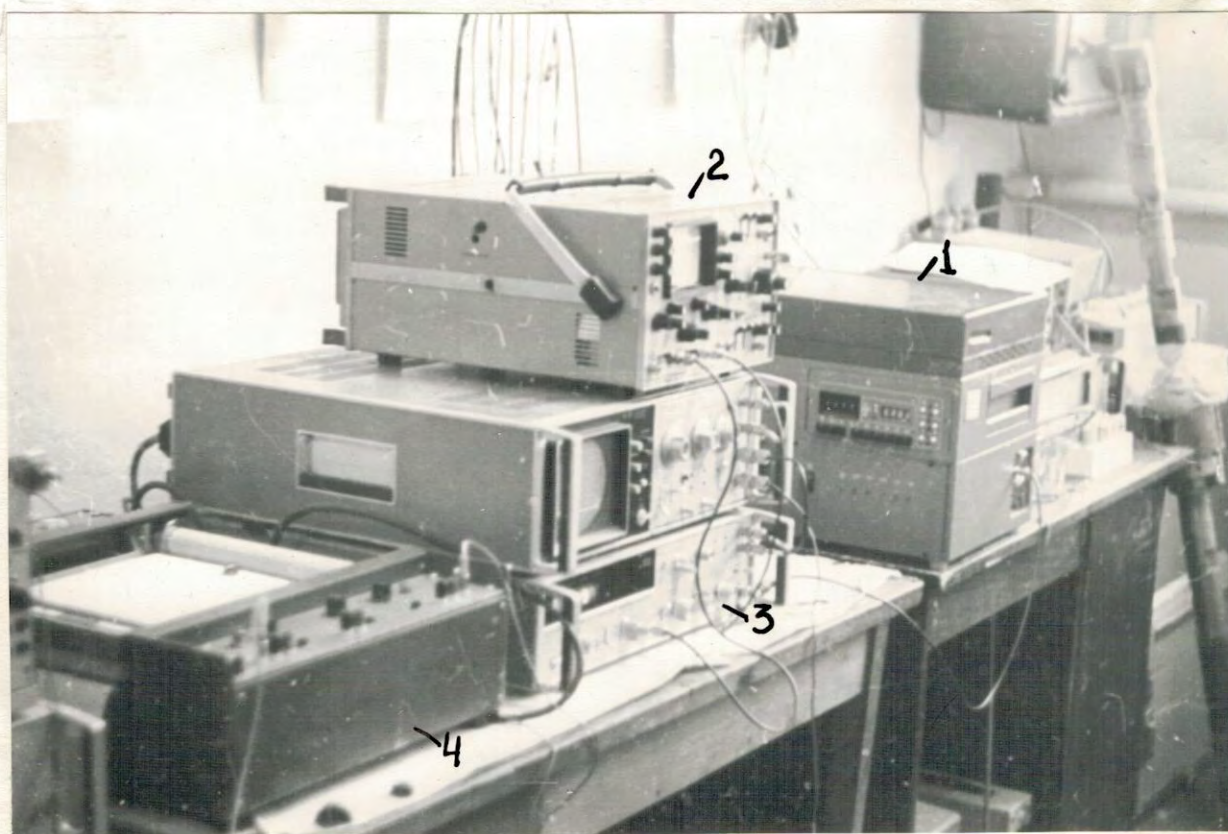


Рис.2.4. Аппаратура для спектрального анализа акустических сигналов:

1 - магнитограф Н067; 2 - осциллограф С1-64;

3 - анализатор спектра СКЧ-58; 4 - двухкоординатный самописец

изменение формы акустического сигнала в течении времени. Для анализа небольших временных интервалов сигналограмм применялся запоминающий осциллограф С8-13. Осциллограммы, полученные при различных скоростях развертки осциллографа, фотографировались фотоаппаратом "Зенит-ЗЕ" для последующего детального изучения. Для анализа более длительных временных интервалов сигналограмм использовался самописец Н3020-5. Спектральный анализ позволял определять совокупность простых гармонических составляющих регистрируемого акустического поля. Для спектрального анализа акустических сигналограмм применялась система, состоящая из анализатора спектра СКЧ-58, соединенного с двухкоординатным самописцем Н307/2 (Рис.2.4.).

Выбор информативных параметров акустического поля и метода их вычисления по акустическим спектрам описаны в главе 3 диссертационной работы.

Механическая скорость бурения определялась непосредственно в ходе экспериментальных работ по показаниям датчика контрольно-измерительной аппаратуры КУРС-613.

Мощность, расходуемая на забое, определялась как разность мощностей, расходуемых на бурение и холостое вращение, измеренных киловаттметром Д-342.

Величина удельной объемной энергии разрушения W_Q рассчитывалась по следующей формуле:

$$W_Q = \frac{N_3}{V_m S}, \text{ Дж/м}^3, \quad (2.4)$$

где N_3 - мощность, расходуемая на забое, Вт, V_m - механическая скорость бурения, м/с, S - площадь забоя, м².

Интенсивность износа коронки J определялась путем деления среднего значения износа коронки по высоте Δh , измерен-

ного профилометром, на величину проходки ΔH .

Обработка экспериментальных данных производилась на ЭВМ типа ЭВМ РС АТ и СМ-1420. Из информативных параметров акустического поля, параметров режима бурения (осевой нагрузки и частоты вращения), физико-механических свойств горных пород (плотности, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, скорости распространения продольных упругих колебаний и предела прочности пород на сжатие), механической скорости бурения, мощности, расходуемой на забое, удельной объемной энергии разрушения и интенсивности износа коронки составлялись числовые матрицы. Для их обработки использовались пакеты прикладных программ "Параметрическая идентификация систем" (ППИ ПАРИС) и "Статистическая обработка данных" (ППИ САНД) /46,47/, предназначенные для решения на малых ЭВМ типа СМ задач статистического исследования многофакторных матриц наблюдений.

ГЛАВА 3. ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

3.1. Акустические колебания и процессы разрушения гор- ной породы и изнашивания породоразрушающего инстру- мента

Разрушение горной породы и износ породоразрушающего инструмента являются следствием процесса взаимодействия пары "инструмент-порода". Процессы разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента до настоящего времени остаются слабо изученными. Объясняется это практическим отсутствием методов контроля забойных процессов при бурении. Именно поэтому большинство гипотез процесса разрушения рассматривают чисто внешние признаки разрушения породы (глубину и форму борозды, образующуюся на забое под действием алмаза и т.д.) и кинематику движения резца, не анализируя физической сущности явления разрушения /67, 87, 80, 68, 39/. Аналогичная ситуация сложилась и с процессом изнашивания породоразрушающего инструмента: большинство работ рассматривает только внешние признаки износа /50, 8/.

В различных областях науки и техники уже накоплен определенный объем знаний о физике процесса изнашивания взаимодействующих тел. Особое место занимает триботехника, исследующая контактное взаимодействие взаимоперемещающихся тел. Согласно И.В.Крагельскому обычно износ поверхности происходит при внешнем трении /29/. Внешнее трение определяется как процесс диссипации энергии, протекающий при относительном тангенциальном перемещении соприкасающихся тел, осуществляемом в зонах реального контакта этих тел, образовавшегося под действием внешних нагрузок /30/. Результаты исследований процессов разрушения и ме-

ханического изнашивания материалов позволили М.В.Ханину /70/ выдвинуть гипотезу о том, что механическое изнашивание при трении представляет собой процесс усталостного разрушения поверхностного слоя, происходящего в результате вынужденных колебаний частиц материала, на выступающие части которых действуют переменные силы. При бурении алмазная коронка находится в контакте с горной породой и одновременно совершает вращательное движение. Физика процессов, протекающих в зоне контакта "инструмент-порода" должна быть во многом схожа с явлениями рассматриваемыми трибо-техникой. Для обоснования предположения о возможной связи интенсивности износа коронки и параметров акустического поля рассмотрим ряд положений методики расчета деформации поверхностного слоя материала при механическом изнашивании, предложенной М.В.Ханиным применительно к процессу изнашивания алмазной коронки.

При бурении энергия от двигателя станка подводится к породоразрушающему инструменту. В процессе взаимодействия инструмента с горной породой происходит преобразование кинетической энергии вращающегося снаряда в другие виды энергии. На установившемся режиме механического изнашивания уравнение баланса энергии в любом сечении матрицы параллельном торцу коронки может быть представлена в виде:

$$q_v = I_m + \int_0^x Q(z) dz \quad (3.1)$$

где I_m - удельный поток энергии, проходящей через данное сечение материала матрицы коронки, $Q(z)$ - удельный поток энергии, поглощаемый единицей высоты матрицы, z - высота матрицы.

Для вывода выражения для удельного потока энергии I_m , проходящего вглубь матрицы, примем, что источниками возмущающих колебаний являются частицы материала поверхностного слоя. При их

колебаниях в окружающей среде распространяются звуковые волны, затухающие по мере удаления от торца коронки. Причем затухание звука зависит не только от свойств среды, но также и от частоты звука. Так как поверхностный слой матрицы является источником звуковых колебаний для нижележащих слоев, то для плоской наружной поверхности, каким является торец коронки, можно принять звуковую волну плоской с конечной величиной смещения

$$A = A_m \sin \omega \left(\tau - \frac{\chi}{a} \right) \quad (3.2)$$

где A_m - амплитуда колебаний, ω - круговая частота колебаний, $a = \sqrt{E/\rho}$ - скорость звука, E - модуль упругости, ρ - плотность, τ - время, χ - текущая координата расстояния.

Известно, что из основных уравнений динамики -

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + v \frac{\partial v}{\partial \chi} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \chi} \quad - \text{уравнение движения} \quad (3.3)$$

$$\frac{dp}{d\tau} + \rho \frac{dv}{d\chi} = 0 \quad - \text{уравнение неразрывности} \quad (3.4)$$

где v - колебательная скорость частиц материала, p - звуковое давление выводится волновое уравнение:

$$\frac{\partial A}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 A}{\partial \chi^2} \quad (3.5)$$

Это уравнение позволяет определить ускорение, получаемое частицей среды в волне.

Давление в плоской волне, распространяющейся в среде с плотностью ρ и скоростью звука a , может быть получено из уравнения движения, пренебрегая в нем конвективным членом $v \frac{\partial v}{\partial x}$. Это можно сделать, так как при $v = A_m \omega \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right)$,

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + v \frac{\partial x}{\partial x} \right) = \rho \left[-\omega^2 A_m \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) + \frac{\omega^3 A_m}{a} \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) \right] \quad (3.6)$$

Из уравнения второго члена к первому в правой части уравнения

$$\begin{aligned} \frac{\omega^2 A_m^2 \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right)}{\left(\frac{a}{\omega} \right) \omega^2 A_m \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right)} &= \\ &= \frac{A_m}{\left(\frac{a}{\omega} \right)} \cos \left(\tau - \frac{x}{a} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

видно, что им действительно можно пренебречь, потому что

$A_m \ll \frac{a}{\omega}$. Таким образом, $\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = - \frac{\partial p}{\partial x}$. Интегрируем

$$\begin{aligned} \int \rho \frac{\partial v}{\partial \tau} dx &= - \int dp \\ \int \rho A_m \omega^2 \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) dx &= \int dp \\ \rho \omega A a \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) &= p + C \end{aligned} \quad (3.8)$$

Амплитуда звукового давления $P_m = A_m \omega \rho a$

Энергия звуковой волны, содержащаяся в единице объема матрицы, представляет собой сумму потенциальной и кинетической

энергий, средние значения которых равны друг другу. Среднее значение кинетической энергии в единице объема матрицы коронки $W_{\text{кр}}$ может быть найдено путем интегрирования выражения для кинетической энергии за время, равное периоду

$$\begin{aligned} W_{\text{кр}} &= \frac{\int_0^T \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_m^2 \cos^2 \omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right) d\tau}{T} = \\ &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_m^2 \frac{\frac{1}{2} \int_0^T [1 + 2 \cos 2\omega \left(\tau - \frac{x}{a} \right)] d\tau}{T} = \\ &= \frac{1}{4} \rho \omega^2 A_m^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Так как потенциальная энергия равняется той же величине, то полная энергия в единице объема матрицы равна:

$$E = \frac{1}{2} \rho A_m^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \quad (3.10)$$

Это есть плотность звуковой энергии.

Количество энергии, проходящей в единицу времени, через единичную площадь поверхности, расположенной неподвижно перпендикулярно направлению распространению звука, называется интенсивностью или силой звука. Так как волна распространяется со скоростью звука a , то интенсивность равна энергии, заключенной в объеме с единичной площадью поперечного сечения и высотой a . Так как в единице объема содержится энергия равная E , то интенсивность $I_m = E a$. Если звуковое давление и скорость находятся в фазе, то:

$$I_m = E a = \frac{1}{2} \rho a A_m^2 \omega^2 = \frac{1}{2} P_m V_m \quad (3.11)$$

Часть потока энергии I_m , проходящей вглубь материала матрицы коронки, поглощается материалом матрицы и идет на изменение его структуры и соответственно прочности. Величина поглощенной энергии $Q(z)$ должна зависеть от свойств материала и ее наибольшее значение будет определять

$$Q(z) = \frac{\partial I_m}{\partial z} = -\rho a \omega^2 A_m \frac{\partial A_m}{\partial z} \quad (3.12)$$

Анализ выражения (3.12) показывает, что величина $Q(z)$ зависит от частоты и амплитуды колебаний поверхностного слоя матрицы коронки. Чем больше амплитуда и частота колебаний, тем больше энергии будет поглощаться материалом матрицы на изменение его структуры.

Аналогичные выводы о влиянии колебаний, возникающих при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, но уже на процесс разрушения горной породы сделаны М.В.Исаевым и П.В. Пономаревым /23/. По их мнению, разрушение горной породы определяется количеством энергии колебаний поглощенных в породе на совершение работы разрушения, при этом поглощение энергии зависит от амплитудно-частотных свойств колебаний.

Из вышеизложенного следует, что в амплитудно-частотных характеристиках акустических колебаний, зарегистрированных на некотором расстоянии от поверхности забоя, содержится информация о потерях энергии на изменение структуры материала матрицы коронки и разрушение горной породы.

3.2. Классификация процессов, протекающих в скважине при бурении по частоте акустических колебаний

Акустические колебания обусловлены динамическими явлениями, возникающими при работе механизмов. Источниками акустических колебаний при бурении являются скважинные процессы и работа бурового оборудования. Для выбора наиболее информативных параметров акустического поля, которые можно было бы использовать для объективного контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента, был изучен спектральный состав акустических колебаний всех источников формирующих акустическое поле при бурении. После анализа схемы измерения был составлен перечень возможных источников акустических колебаний:

1. Работа механизмов, не связанных с бурением (фоновый акустический шум)
2. Работа бурового оборудования
3. Протекание промывочной жидкости
4. Вибрации снаряда
5. Работа породоразрушающего инструмента

В результате исследований были установлены частотные диапазоны акустических колебаний различных источников.

Фоновый акустический шум. Исследования показали, что при расположении акустического датчика в монолите горной породы, акустические шумы от работы механизмов, не связанных с бурением не фиксируются. Акустический спектр фонового шума (Рис.3.1., кривая I) показывает отсутствие колебаний во всем частотном диапазоне.

Работа бурового оборудования. Буровое оборудование стенда состояло из бурового станка, маслостанции, тиристорного преоб-

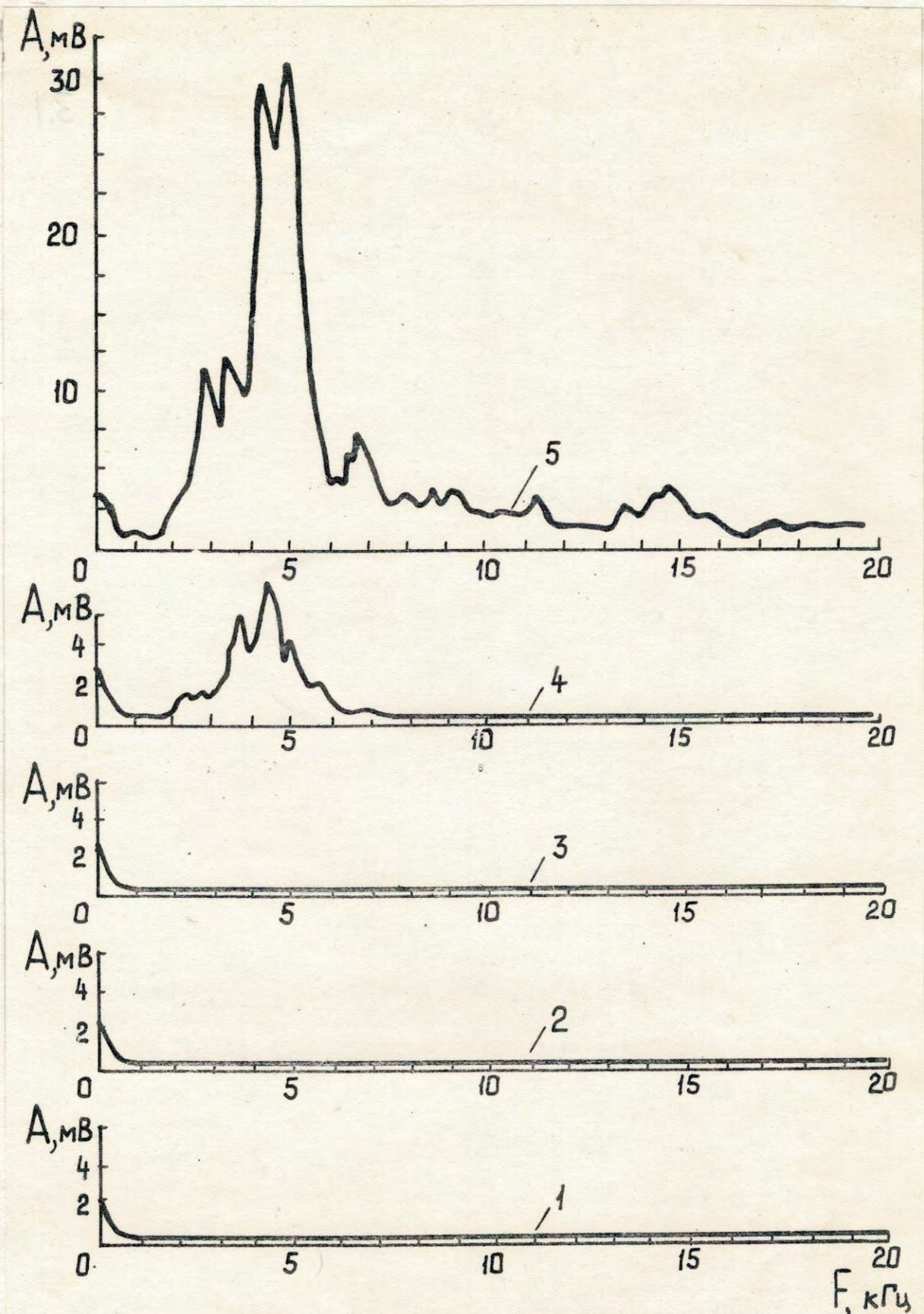


Рис.3.1. Акустические спектры, зафиксированные при неработающем буровом оборудовании (1), вращении снаряда над монолитом (2), протекании промывочной жидкости (3), холостом вращении снаряда в скважине (4), бурении (5).

разователя, промывочного насоса. Каждый из этих агрегатов при бурении создает собственное акустическое поле. Однако, датчик расположенный в монолите горной породы, не принимал колебаний, связанных с работой бурового оборудования. Акустический спектр, полученный при вращении снаряда над монолитом, т.е. при работающем буровом оборудовании, показывает отсутствие колебаний во всем частотном диапазоне (Рис.3.1., кривая 2).

Протекание промывочной жидкости. Акустические колебания, возникающие при протекании промывочной жидкости при расходе $Q=19 \text{ дм}^3/\text{мин}$ акустический датчик не фиксировал (Рис.3.1., кривая 3).

Вибрация снаряда. Под вибрацией снаряда при бурении обычно понимают колебательные движения, совершаемые системой "бурильный вал - станок". С вибрацией тел и конструкций тесно связаны и акустические колебания, возникающие в окружающей вибрирующее тело среде. При этом акустические колебания представляют собой колебательную энергию конструкций, излученную в виде колебаний. Экспериментальные исследования показали, что при надежном креплении монолита и станка и использовании неискривленных колонковых труб, в стендовых условиях акустические шумы от вибраций снаряда не превышают по частоте 7 кГц. Акустический спектр при холостом вращении снаряда в скважине, т.е. при протекании процесса взаимодействия боковой поверхности снаряда со стенками скважины показан на рис.3.1. (кривая 4). При холостом вращении снаряда в скважине сохраняются вибрации системы бурильный вал-станок существующие в процессе бурения, но в акустическом спектре колебания частотой выше 7 кГц отсутствуют.

Работа породоразрушающего инструмента. Работа породоразрушающего инструмента при бурении сопровождается возникновением

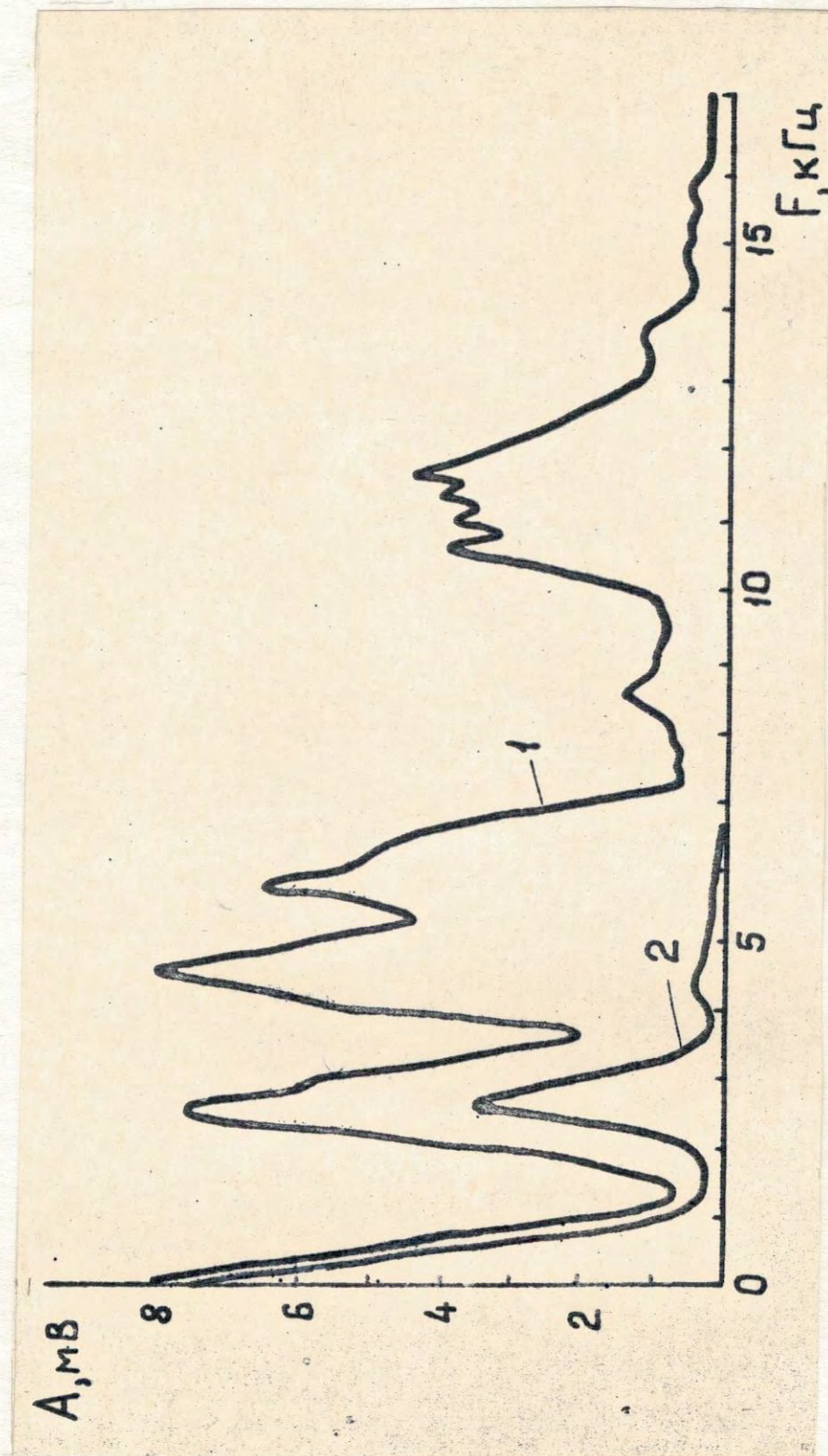


Рис.3.2. Акустические спектры при бурении импрегнированной алмазной коронкой типа ИМВ-3 в нормальном состоянии (1) и при полной потере режущих свойств (2)

акустических колебаний в широком диапазоне частот от 0 до 20 кГц (Рис.3.1., кривая 5). Экспериментальные исследования показали, что высокочастотные акустические колебания в диапазоне 7-20 кГц возникают только при разрушении горной породы. На рис.3.2 приведены акустические спектры при бурении импрегнированной алмазной коронкой типа ИМВ-3 в нормальном состоянии и при полной потере режущих свойств на постоянном режиме $P = 1000$ даН, $n = 640$ мин.⁻¹, $Q = 19$ дм³/мин. При бурении коронкой полностью потерявшей режущие свойства разрушения горной породы не происходило (механическая скорость бурения равнялась нулю). При этом в акустическом спектре (рис.3.2., кривая 2) отсутствуют высокочастотные колебания. Появление процесса разрушения горной породы при бурении коронкой в нормальном состоянии (механическая скорость бурения равнялась 1,8 м/ч) сопровождалось появлением в акустическом спектре высокочастотных колебаний в диапазоне 7-20 кГц (Рис.3.2., кривая 1).

Анализ результатов экспериментальных исследований акустических колебаний, возникающих при работе бурового оборудования и протекании скважинных процессов показывает, что спектральный анализ акустического поля, возникающего в горной породе в процессе бурения позволяет выделить акустические колебания непосредственно связанные с разрушением горной породы. Это дает возможность использовать параметры высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля для контроля процесса разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента при алмазном бурении.

3.3. Генезис высокочастотных акустических колебаний в процессе бурения

Рассматривая предполагаемый генезис высокочастотных акустических колебаний, необходимо учитывать тот факт, что колебания в диапазоне 7-20 кГц возникают только при протекании процесса разрушения горной породы и исчезают при его прекращении. Анализируя известные экспериментальные данные о процессе разрушения горных пород можно выделить два наиболее вероятных физических процесса, которые могут быть источниками акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц.

П.Н. Курочкин /33/ экспериментально показал, что характер взаимодействия алмазов с забоем при бурении носит динамический характер. Это обуславливает возникновение акустических волн непосредственно в процессе взаимодействия алмаза с горной породой. Учитывая динамический характер взаимодействия, образующиеся акустические волны должны иметь широкополосный спектр в диапазоне 0-20 кГц и выше.

В последнее время в связи с появлением новых физических методов исследований рядом исследователей были получены данные, касающиеся самой природы явления разрушения /66, 65, 49/. С помощью высокоскоростной киносъемки забоя при разбурировании блочного стекла С.Я. Сологубом установлено, что механизм разрушения горной породы при бурении связан с образованием трещин под воздействием резца /66/. При вращательном бурении в предрезцовой зоне возникает система трещин. Разрушение породы на забое происходит в виде сколков различной величины и формы ослабленной трещинами породы. Аналогичным методом установлено, что предразрушенная зона интенсивной трещиноватости при бурении распространяется от поверхности забоя вглубь массива породы на 2-3 мм /49/.

Образованная сетью микротрещин, зона предразрушения зафиксирована при экспериментальных исследованиях на люминисцентном микроскопе /65/. На основе механизма трещинообразования построены наиболее известные теории разрушения горной породы А.Гриффитса, Е.Орована и Дж.Тейлора.

Исследованиями физики разрушения твердых тел установлено явление излучения акустических волн (волн напряжений), обусловленное возникновением и развитием дефектов структуры материалов при их деформации и разрушении /42, 43/. Это явление получило название "акустическая эмиссия" или "эмиссия волн напряжений". Акустическая эмиссия определяется как процесс излучения материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала /14/. Рядом работ экспериментально установлено возникновение акустических сигналов при деформировании и разрушении горных пород /10, 12, 51, 53, 71, 81, 83/. Исследования микроструктуры образцов горных пород, подвергающихся деформации показали, что источником акустических сигналов является процесс образования и развития трещин. Частотный диапазон спектра акустической эмиссии при неограниченном сжатии монолитов горных пород находится в пределах до 50 кГц, причем основная энергия заключена в диапазоне до 20 кГц /83/. Исследованиями спектральных характеристик акустических эмиссионных спектров при различных типах нагрузок на горные породы установлено, что изменение спектров отражает ход развития аварийных процессов в материалах /81/. Необходимо отметить идентичность частотного диапазона акустических сигналов при деформации и разрушении образцов горных пород и фиксируемых в процессе бурения.

Основываясь на установленных фактах динамического характера

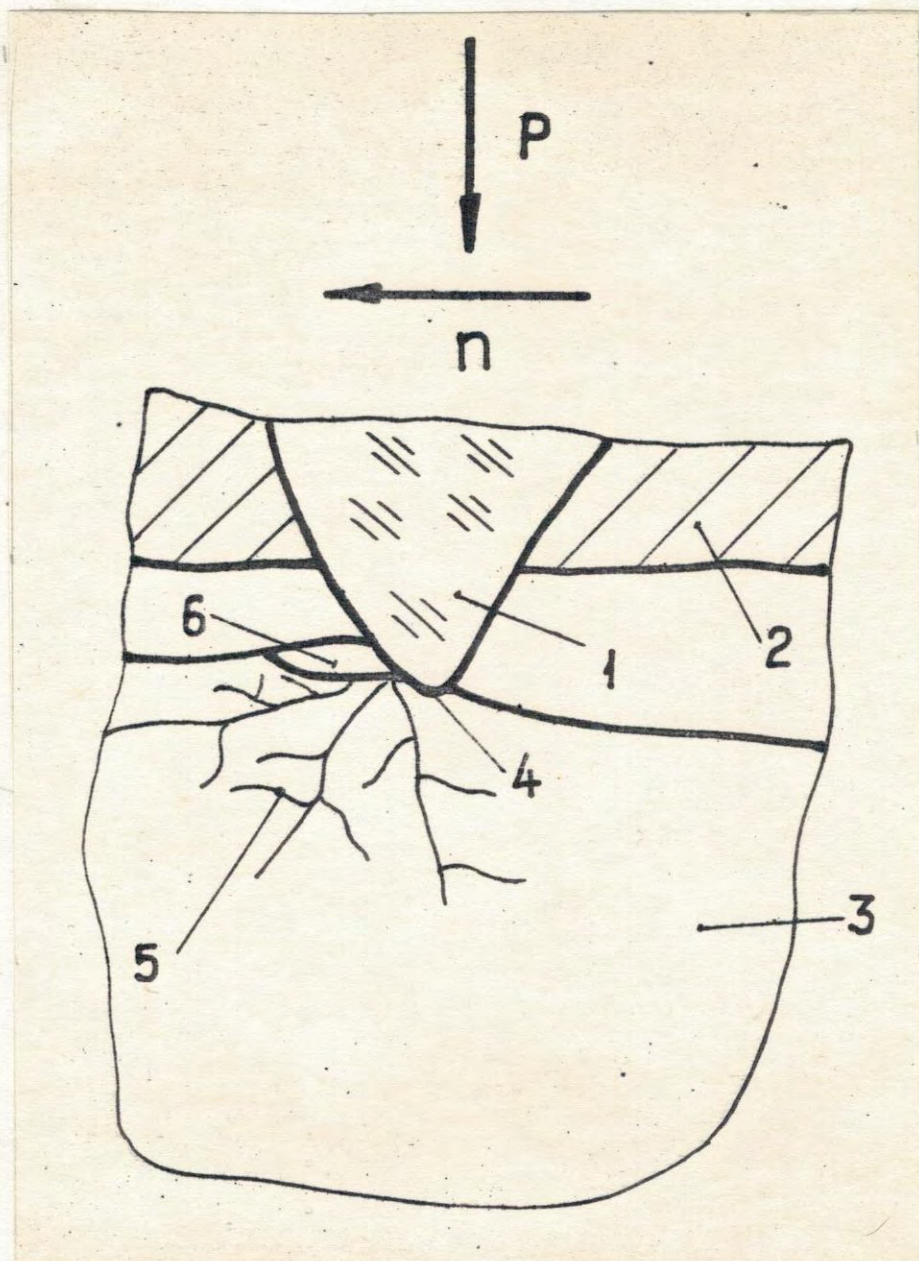


Рис.3.3. Схема механизма разрушения горной породы при алмазном бурении:

1 - алмаз, 2 - матрица коронки, 3 - горная порода,
4 - площадка контакта, 5 - образующиеся трещины,
6 - участок скола породы

взаимодействия алмазов с забоем и возникновения акустических волн при зарождении и развитии трещин в горных породах при их деформации, можно высказать гипотезу о генезисе высокочастотных колебаний в диапазоне 7-20 кГц, регистрируемых при бурении. Наиболее вероятными источниками акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц при бурении являются процесс взаимодействия резцов инструмента с забоем и процесс трещинообразования, протекающий в горной породе при ее разрушении. На рис.3.3 показана схема, поясняющая гипотезу. При взаимодействии алмаза с забоем на площадке контакта возникают колебания, распространяющиеся в матрицу и в горную породу. Под действием алмаза в горной породе образуются трещины, которые также являются источниками колебаний. При движении алмаза периодически происходит скол участка породы, ослабленной системой микротрещин.

Данная гипотеза позволяет предсказать и объяснить зависимость параметров высокочастотных акустических колебаний от типа и состояния породоразрушающего инструмента, свойств горных пород и режима бурения. Изменение любого из этих факторов вызывает изменение характера взаимодействия алмазов с забоем и образующейся в горной породе трещиноватости и, как следствие, параметров высокочастотных акустических колебаний. Соответственно изменяется удельная объемная энергия разрушения и интенсивность износа алмазной коронки.

3.4. Информативные параметры высокочастотного диапазона акустического поля

С точки зрения получения объективной информации о процессах разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента наибольший интерес представляют акустические колебания в диапазоне частот 7-20 кГц. Диапазон 7-20 кГц акустического спектра свободен от акустических шумов, не связанных с процессом разрушения породы и поэтому является логичным использовать параметры этого диапазона для контроля процесса разрушения. Задачей является выбор наиболее информативных параметров высокочастотного диапазона. При этом необходимо свести количество параметров к минимуму, чтобы не усложнять процесс обработки.

Как было показано выше, информация о процессах разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента заложена в амплитудно-частотных свойствах акустического сигнала. Отсюда следует, что информативные параметры должны отражать как амплитудные, так и частотные свойства сигнала. Также информативные параметры должны объективно представлять изменения в диапазоне 7-20 кГц акустического спектра при всех сочетаниях типа инструмента-горная порода-режим бурения.

Одним из важнейших параметров акустического сигнала, который напрямую связан с амплитудой колебаний, является энергия (мощность). Из вибродиагностики машин и механизмов известно, что мощность акустического сигнала пропорциональна кинетической энергии взаимодействия деталей [13]. Поэтому одним из информативных параметров, отражающих амплитудные свойства сигнала, принято значение энергии высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля. Учитывая то, что обрабатывается временная выборка сигнала, необходимо рассмотреть связь энергетических

параметров сигнала, определенных во временной и частотной областях.

Средняя мощность стационарного сигнала на временном интервале $(0, T)$ определяется /38/ по формуле:

$$P_{xx}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt, \quad (3.13)$$

где x - амплитуда сигнала, t - время.

Энергия сигнала равна интегралу от мощности по всему промежутку существования сигнала

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} P_{xx}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (3.14)$$

В частотной области полная энергия сигнала вычисляется в виде интеграла по частоте:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df, \quad (3.15)$$

где f - частота сигнала.

Согласно равенству Парсеваля, полная энергия сигнала не зависит от формы представления, при этом

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df \quad (3.16)$$

В частотной области энергия акустических колебаний в диапазоне 7-20 кГц вычисляется по формуле:

$$E_A = \int_7^{20} |x(f)|^2 df \quad (3.17)$$

Однако, вычислять энергию сигнала по результатам обычного спектрального анализа оказалось не совсем удобным, поэтому для отражения изменения энергии сигнала была выбрана величина W_A , определяемая как интеграл от спектра по частоте в диапазоне 7-20 кГц

$$W_A = \int_7^{20} x(f) df \quad (3.18)$$

На рис.3.4 показан акустический спектр с выделенным высокочастотным диапазоном. Величина W_A , которую для удобства понимания ее физической сущности назовем энергией W_A , определяется площадью, ограниченной кривой спектра (заштрихованная область на рис.3.4). Площадь, ограниченная кривой спектра в диапазоне частот 7 - 20 кГц, вычислялась как сумма площадей прямоугольных трапеций с высотами, равными интервалу снятия отсчетов амплитуды по частоте и основаниями - значениями амплитуды соседних отсчетов. Интервал снятия отсчетов амплитуды по частоте составлял 0,5 или 1 кГц. Размерность величины W_A является единица мВ×кГц, которая в дальнейшем тексте заменена на условные единицы (1 мВ×кГц = 1 усл.ед.).

Для характеристики частотных свойств акустического сигнала была выбрана величина f_A , которая представляет собой частоту, разделяющую диапазон 7 - 20 кГц на две части с равными энергиями (Рис.3.4). Внутри диапазона 7-20 кГц акустического спектра с левой и правой сторон от частоты f_A площади спектра равны.

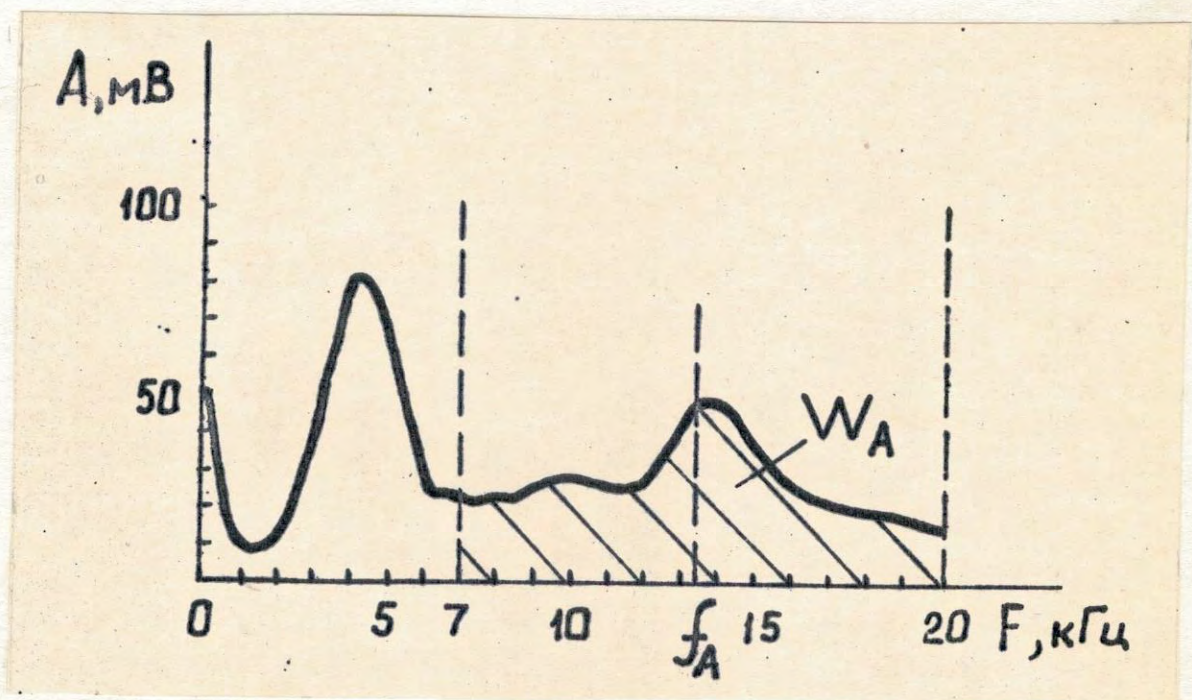


Рис.3.4. Акустический спектр с выделенным высокочастотным диапазоном 7 - 20 кГц

Смещение частоты f_A в сторону высоких частот показывает увеличение доли высокочастотных колебаний в общем балансе энергии и, наоборот, уменьшение f_A свидетельствует об увеличении доли низкочастотных колебаний. Для нахождения частоты f_A производилось суммирование площади, ограниченной кривой спектра от нижней границы диапазона - 7 кГц до достижения суммы значения равного половине площади всего диапазона 7 - 20 кГц. Размерность частоты f_A - кГц.

Энергия W_A и частота f_A позволяют оценивать изменения в акустическом сигнале, как в амплитудной, так и в частотной областях. Это позволяет использовать их в качестве информативных параметров для контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента при алмазном бурении.

Выводы по главе 3.

Процессы разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента связаны с колебаниями частиц материала (инструмента или породы), возникающими при взаимодействии инструмента с забоем.

Спектральный анализ акустического поля, возникающего при бурении, позволяет выделить акустические колебания в диапазоне 7 - 20 кГц, непосредственно связанные с разрушением горной породы.

Наиболее вероятными источниками акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц при бурении являются процесс взаимодействия резцов инструмента с забоем и процесс трещинообразования, протекающий в горной породе перед ее разрушением.

Информативными параметрами акустического поля для объективного контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента являются параметры высокочастотного диапазона 7-20 кГц: энергия W_A и частота, разделяющая диапазон на две части с равными энергиями f_A .

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ

4.1. Акустический спектр и тип породоразрушающего инструмента

В настоящее время серийно выпускается большое количество типов алмазных коронок, предназначенных для бурения в различных геолого-технических условиях. Для определения возможности использования акустического поля, для создания "образа" типа алмазной коронки, сравнивались акустические спектры, зафиксированные при бурении различными типами алмазных коронок на постоянном режиме в породах VI-X категории по буримости. Конструктивные параметры алмазных коронок, акустические спектры которых рассматриваются в данной главе, приведены в табл. I.

На рис. 4.1 приведены акустические спектры при бурении коронками типа А4ДП, АКУ, И4ДП и макетом коронки гранито-гнейса (IX категории по буримости) при $P=1000 \text{ даН}$, $n=400 \text{ мин}^{-1}$,

$Q=19 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Из рис. 4.1 видно, что в высокочастотном диапазоне 7-20 кГц, спектр каждой коронки имеет характерное расположение максимумов амплитуды по оси частот и распределение энергии внутри диапазона. Информативные параметры акустического поля: энергия W_A и частота f_A отличаются у коронок различных типов. Так, у коронки типа А4ДП энергия $W_A=422 \text{ усл.ед.}$, частота $f_A=9,8 \text{ кГц}$, коронки типа АКУ - $W_A=161 \text{ усл.ед.}$, $f_A=11,2 \text{ кГц}$, коронки типа И4ДП - $W_A=229 \text{ усл.ед.}$, $f_A=11,1 \text{ кГц}$. Спектр макета не содержит колебаний выше 7 кГц.

На рис. 4.2 показаны акустические спектры при бурении коронками типа ВС, И6ДХ, И4ДП и А4ДП биотитового гранита (VIII категории по буримости) при $P=750 \text{ даН}$, $n=500 \text{ мин}^{-1}$, $Q=19 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Из рис. 4.2 видны отличия в акустических спектрах.

Таблица I.

Конструктивные параметры алмазных коронок диаметром 59 мм

Тип коронки	Число промыв. каналов	Качество алмазов		Зернистость алмазов шт./карат		Масса алмазов карат	
		объем.	подр.	объем.	подр.	объем.	подр.
А4ДП	4	XXXV Гр "б"	XXXI Гр "б"	30-20	30-20	6,0	3,5
А4У	4	XXXV Гр "а"	XXXIV Гр "б"	30-20	30-20	6,5	3,7I
И4ГС	4	АСПК	XXXIV Гр "б"	400-150	50-30	10,8	2,0
И6КС	6	АСПК	XXXIV Гр "б"	400-150	50-30	10,8	2,0
И4ДП	4	XXXV Гр "а"	XXXIV Гр "б"	400-200	50-30	12,0	2,15
И6ДХ	6	XXXV Гр "а"	XXXIV Гр "б"	600-400	50-30	12,0	1,69
ИК	4	XXXV Гр	XXXIV Гр "б"	600-400	90-60	10,8	1,9
ВС	10	АС	XXXIV Гр "б"	1200-800	50-30	13,0	2,2
Макет	4	-	-	-	-	-	-
							9,5
							10,2I
							12,8
							12,8
							14,15
							13,69
							12,7
							15,2
							-

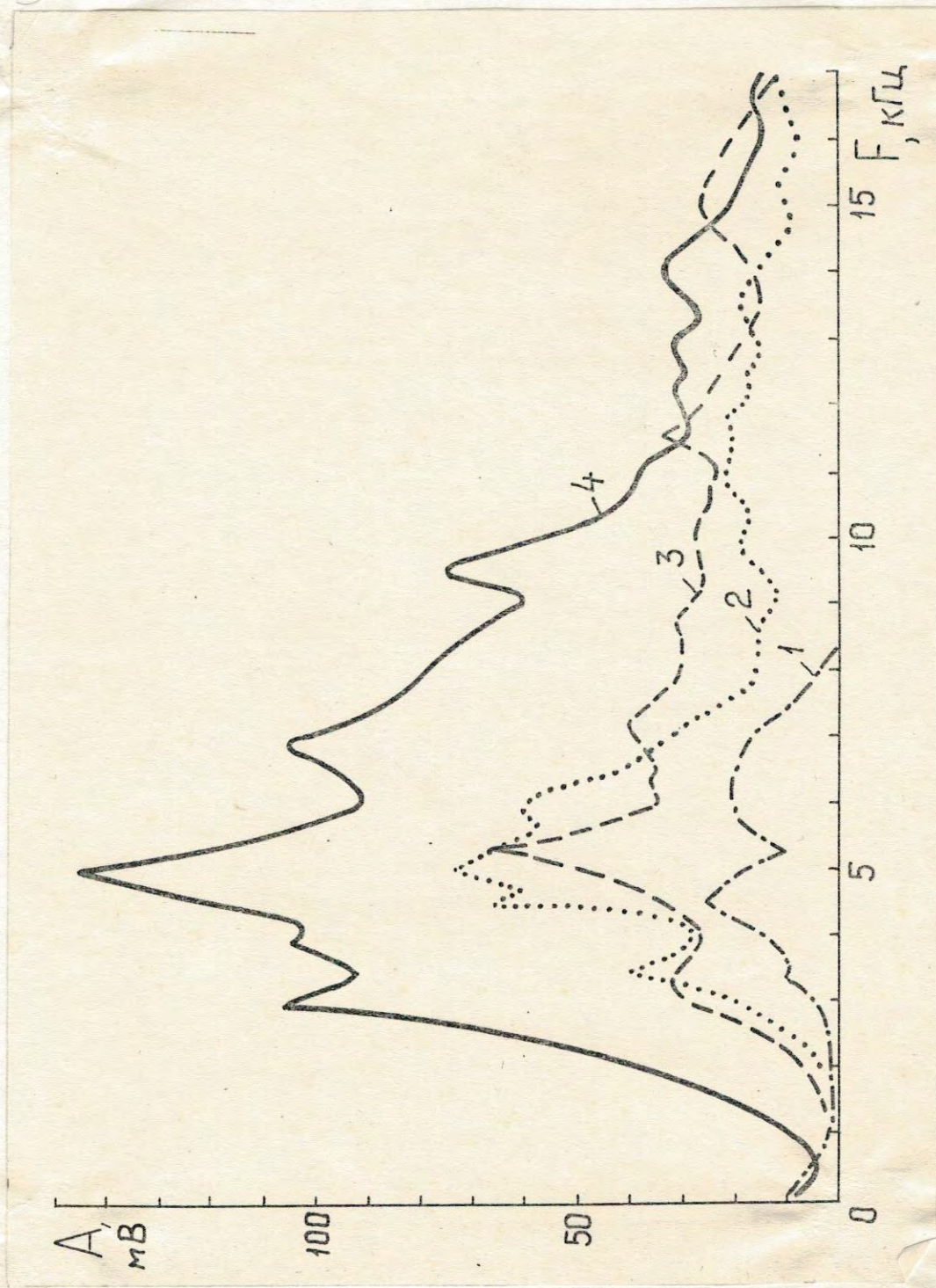


Рис.4.1. Акустические спектры при бурении гранито-гнейса коронками типа АКУ (2), И4ДП (3), А4ДП (4) и макетом коронки (1).

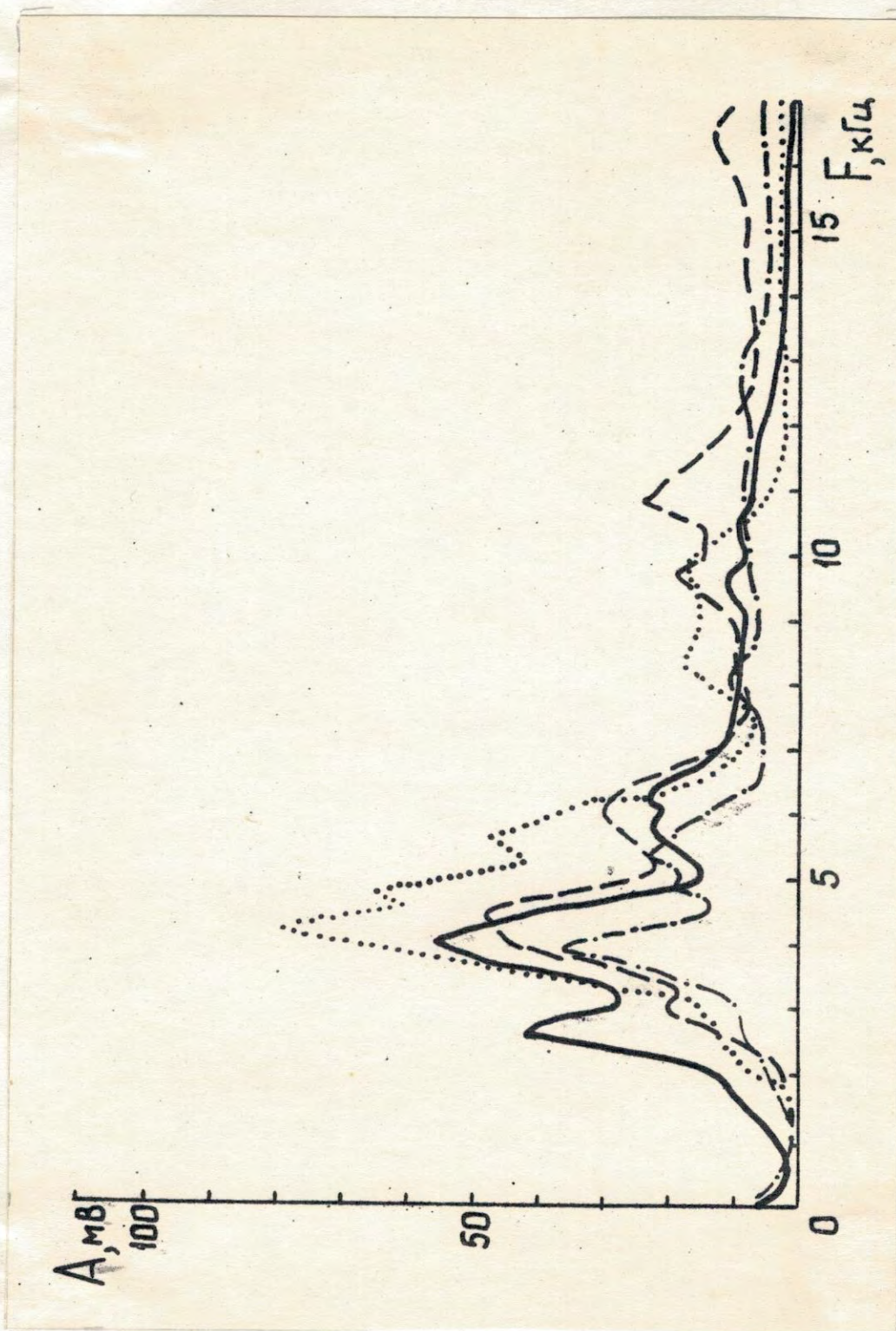


Рис. 4.2: Акустические спектры при бурении биотитового гранита коронками типа

$BC, И6ДХ, И4ДП$ и $А4ДП$

— BC , — $И6ДХ$, - · - · — $И4ДП$, / — $А4ДП$

Информативные параметры акустического поля у коронки типа БС равны $W_A = 67$ усл.ед., $f_A = 11,5$ кГц, коронки типа И6ДХ -

$W_A = 64$ усл.ед., $f_A = 9,6$ кГц, коронки типа И4ДП - $W_A = 108$ усл.ед., $f_A = 11,3$ кГц и коронки типа А4ДП - $W_A = 52$ усл.ед., $f_A = 9,9$ кГц.

На рис.4.3 приведены акустические спектры при бурении импрегнированными алмазными коронками типа ИЖ, И6ДХ, И6КС и И4ГС биотитового гранита (Х категории по буримости) при $P=750$ даН,

$n=700$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. Из рис.4.3 видно, что каждая коронка имеет характерный акустический спектр. Параметры высокочастотного диапазона акустического поля неодинаковы у коронок различных типов. Коронка типа ИЖ имеет $W_A = 104$ усл.ед. и $f_A = 11,5$ кГц, коронка типа И6ДХ - $W_A = 118$ усл.ед. и $f_A = 11,5$ кГц, коронка типа И6КС - $W_A = 181$ усл.ед. и $f_A = 11,4$ кГц, коронка типа И4ГС - $W_A = 198$ усл.ед. и $f_A = 11,2$ кГц.

При экспериментальных работах были изучены акустические поля при бурении коронками одного типа. На рис.4.4 приведены акустические спектры при бурении коронками типа И6КС биотитового гранита (Х категории по буримости) при $P=750$ даН, $n=700$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. Из рис.4.4 видно, что акустические спектры коронок типа И6КС имеют незначительные отличия, положения максимумов амплитуды по оси частот совпадают у обеих коронок. Соответственно параметры высокочастотного диапазона акустического поля W_A и f_A имеют близкие значения. У коронки типа И6КС № 2 - $W_A = 220$ усл.ед. и $f_A = 11,0$ кГц, у коронки типа И6КС № 251 - $W_A = 181$ усл.ед. и $f_A = 11,4$ кГц. Отличия в значениях W_A и f_A у коронок одного типа видимо обусловлено несовершенством технологии изготовления коронок.

Экспериментальные работы показали, что каждый тип алмазной

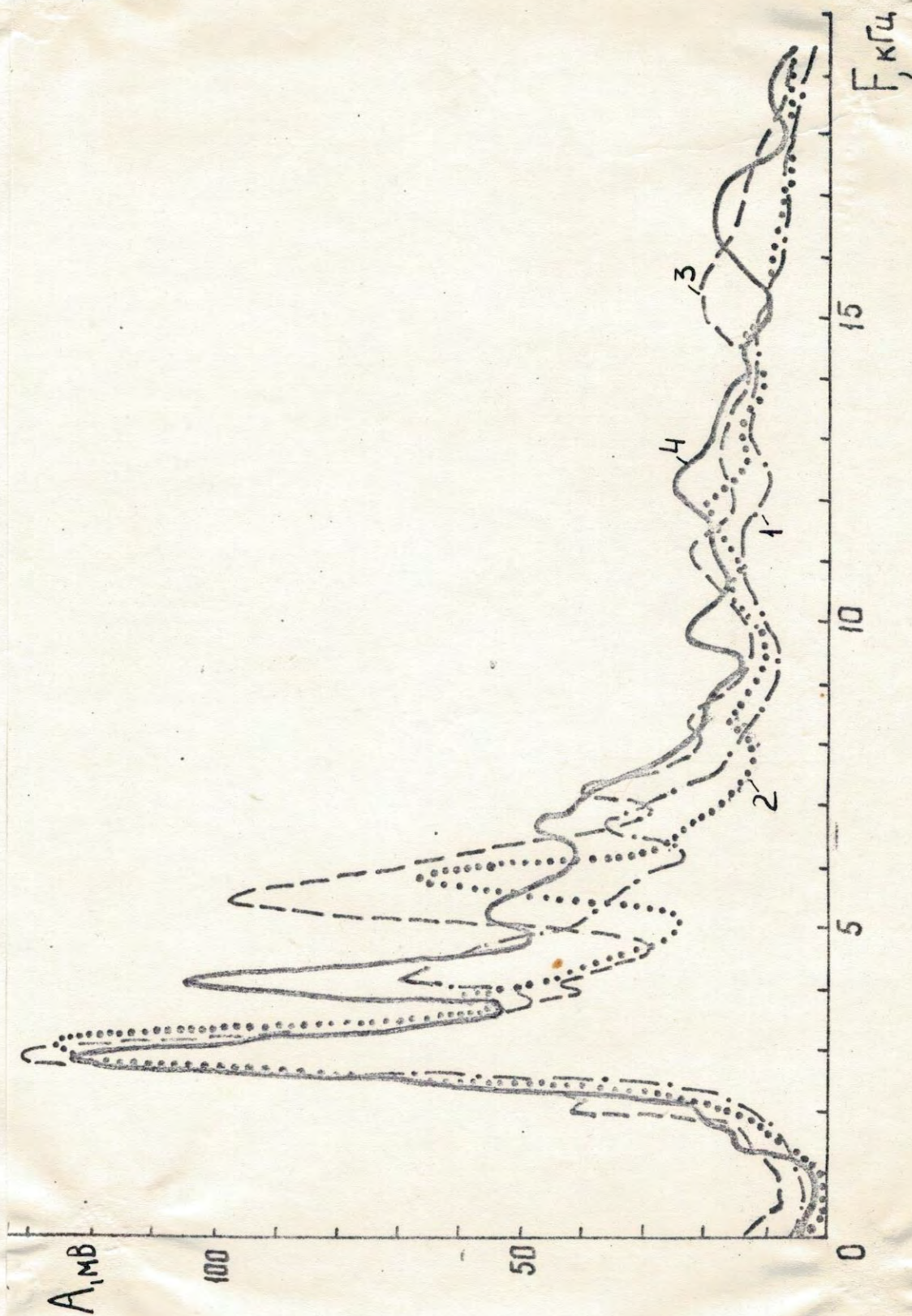


Рис. 4.3. Акустические спектры при бурении биотитового гранита коронками типа

ИМ (1), ИБДХ (2), ИБКС (3), ИЛГС (4)

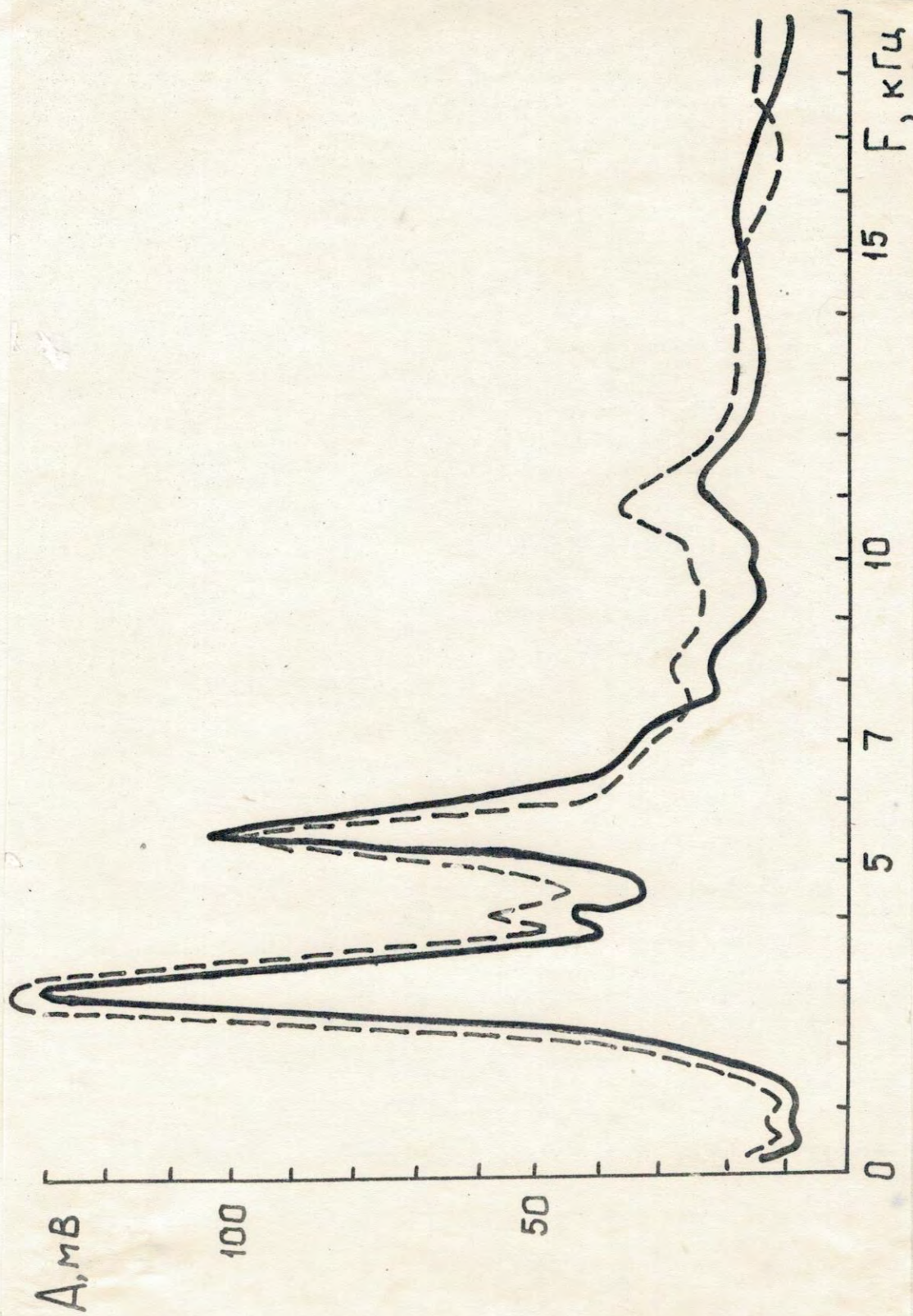


Рис. 4.4. Акустические спектры при бурении биотитового гранита коронками типа ИБКС
— коронка типа ИБКС № 251, - - - коронка типа ИБКС № 25I

создает акустическое поле определенного спектрального состава, в тоже время однотипные коронки при бурении имеют близкие акустические спектры. Высокочастотный диапазон 7-20 кГц акустического спектра каждой коронки имеет характерное расположение максимумов амплитуды по оси частот и распределение энергии внутри диапазона. Информативные параметры акустического поля - энергия W_A и частота f_A достаточно полно отражают особенности акустического спектра.

Зависимость акустических спектров от типа алмазной коронки можно объяснить конструктивными особенностями коронок. При обработке экспериментальных данных была сделана попытка установить зависимость информативных параметров акустического поля от зернистости алмазов $З$. Для нахождения общих зависимостей $W_A = f(З)$ и $f_A = f(З)$ значения W_A и f_A , полученные при бурении различными типами коронок в монолитах биотитового гранита (УШ и Х категорий по буримости) и гранито-гнейсе, были нормированы по формуле:

$$X' = \frac{X}{\bar{X}}, \quad \text{где} \quad (4.1)$$

X' - нормированное значение параметра акустического поля, X - значение параметра акустического поля при бурении одним типом коронки, $\bar{X}$ - среднее значение параметра акустического поля при бурении всеми типами коронок в одной горной породе.

Значения зернистости алмазов $З$ в коронках, использовавшихся для бурения и нормированные значения информативных параметров акустического поля приведены в таблице 2. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между зернистостью алмазов и нормированными значениями W'_A и f'_A . Коэффициент корреляции зависимости $W_A = f(З)$ составляет $r = -0,15$, зависимости $f_A = f(З)$

- $r = 0,51$. Величины коэффициента корреляции (особенно у зависимости $W_A = f(3)$) невелики. Это указывает на наличие более сложной связи между зернистостью и параметрами высокочастотного диапазона акустического поля. По-видимому, нельзя искать зависимость параметров акустического поля от одного из конструктивных параметров коронки, не учитывая изменения других конструктивных параметров, так как акустическое поле определяется всей конструкцией породоразрушающего инструмента.

Таблица 2

Значения зернистости алмазов 3 в коронках и нормированные значения информативных параметров акустического поля

Нормированные значения	Зернистость, шт/карат											
	25			300				500			1000	
W_A'	0,59	1,55	0,71	0,84	1,50	1,21	1,32	0,69	0,79	0,88	0,91	
f_A'	1,04	0,90	0,96	1,03	1,09	1,00	0,98	1,01	1,01	0,93	1,11	

Для установления влияния отдельных конструктивных параметров коронки на спектральный состав акустического поля необходимо при проведении экспериментов контролировать изменение всех конструктивных параметров используемого породоразрушающего инструмента, таких как качество алмазов, зернистость алмазов, насыщенность алмазами матрицы, выступ алмазов из тела матрицы и других. Это возможно осуществить при проведении специальных исследований, направленных на установление зависимости между конструктивными параметрами алмазных коронок и параметрами акустического поля.

4.2. Зависимость акустических спектров от свойств горных пород

Исследования проводились при бурении осадочных, магматических и метаморфических пород и охватили большой диапазон изменения физико-механических свойств и петрографических особенностей горных пород. При полевых исследованиях вместе с измерением акустических спектров собирались данные, характеризующие физико-механические свойства пород, такие как: плотность γ , модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ , скорость распространения продольных упругих (акустических) волн U_p , предел прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$. Горные породы при стендовых исследованиях подверглись более детальному изучению. Прочностные характеристики были дополнены значениями предела упругости σ_y и относительной энергоемкости разрушения при одноосном сжатии Π_0 , которые были определены при раздавливании выбуренных кернов на специализированном прессе. Из выбуренных кернов были изготовлены шлифы и проведен петрографический анализ, в результате которого определены тип, текстурно-структурные особенности и минеральный состав пород. При обработке экспериментальных данных определялась связь свойств горных пород с информативными параметрами акустического поля.

Возможность сравнения экспериментальных данных, полученных при полевых исследованиях на различных месторождениях, зависела от таких факторов как используемые для бурения тип породоразрушающего инструмента, режимы бурения и условия приема акустического поля (расстояние между бурящейся и наблюдательной скважинами). Поэтому при определении зависимости информативных параметров акустического поля от физико-механических свойств горных пород использовались данные, полученные в практически

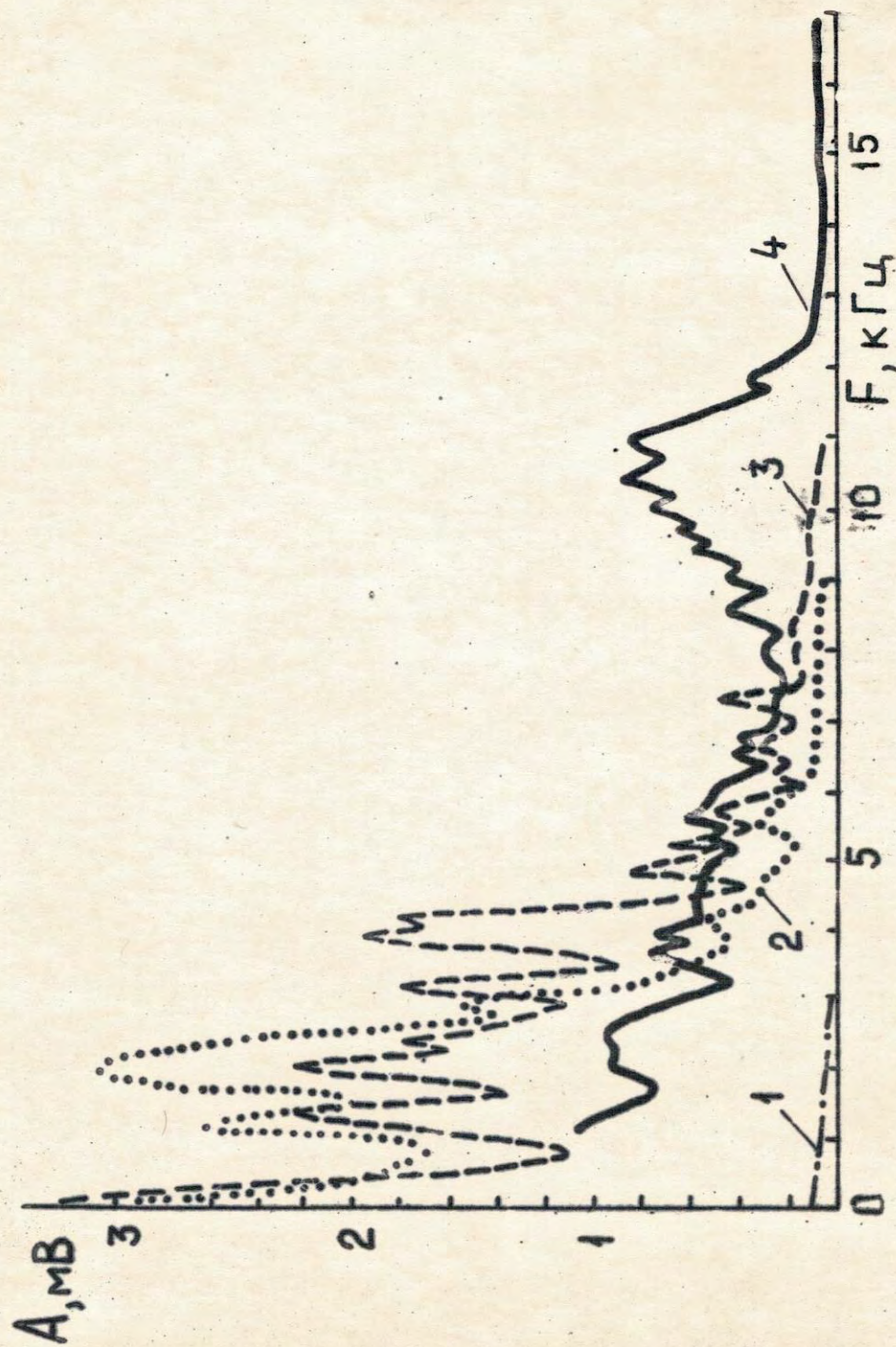


Рис. 4.5. Акустические спектры при бурении алмазными коронками типа ОІАЗ горных пород Донбасса и месторождения Кальйок:
1 - сланец глинистый, 2 - сланец песчаный, 3 - песчаник, 4 - ловчоррит

идентичных условиях, т.е. при бурении одним типом алмазной коронки на одинаковом режиме и при равных условиях приема акустического поля.

На рис. 4.5 показаны акустические спектры при бурении алмазными коронками типа ОІАЗ осадочных горных пород Донбасса и магматических пород месторождения Кальйок (Хибины), а в таблице 3 приведены физико-механические свойства пород и информативные параметры высокочастотного диапазона акустического поля.

Таблица 3

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры акустического поля при исследованиях на месторождениях Донбасс и Кальйок

Горная порода	Район исследований	γ	E	μ	U_p	$\sigma_{сж}$	W_A	f_A
		г/см ³	мПа	-	км/с	мПа	усл.ед	кГц
Сланец глинистый	Луганская обл., Донбасс	2,87	1,2	0,37	2,2	19	0	7
Сланец песчанистый	"	2,81	3,27	0,32	2,8	56	0,12	8
Песчаник	"	2,75	5,19	0,21	3,3	83	0,47	8,4
Ловчоррит	М-ние Кальйок, Хибины	2,81	7,16	0,28	6,3	195	2,81	9,3

Графические зависимости величин γ , E , μ , U_p и $\sigma_{сж}$ от W_A и f_A показаны на рис.4.6 и 4.7. Из рис.4.5 видно, что при бурении одним типом алмазной коронки в каждой горной породе возникает акустическое поле определенного спектрального состава. При бурении осадочных пород, в основном, возникают низкочастот-

ные колебания, энергия высокочастотного диапазона акустического поля 7-20 кГц незначительна. Бурение магматических пород сопровождается расширением акустического спектра в сторону высоких частот. Корреляционный анализ показал четкую положительную связь между прочностными и упругими свойствами пород и информативными параметрами акустического поля (Табл.4). Рост величин, характеризующие прочностные и упругие свойства пород - E , U_p и $\sigma_{сж}$ сопровождается увеличением энергии W_A и частоты f_A . В то же время связь информативных параметров акустического поля с плотностью γ и коэффициентом Пуассона пород не выражена. Это хорошо видно из зависимостей, приведенных на рис.4.6 и 4.7.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции информативных параметров акустического поля и физико-механических свойств пород Донбасса и месторождения Кальйок

	γ	E	M	U_p	$\sigma_{сж}$
W_A	-0,15	0,85	-0,29	0,99	0,98
f_A	-0,60	0,99	-0,66	0,91	0,95

Зависимость величин W_A и f_A от скорости распространения продольных упругих волн U_p и предела прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$ при расположении датчика акустического поля на расстоянии 10 м от забоя бурящейся скважины аппроксимируется линейной функцией:

$$\begin{aligned} W_A &= 0,72 U_p - 1,8 & f_A &= 0,48 U_p + 6,4 \\ W_A &= 1,7 \cdot 10^{-2} \sigma_{сж} - 0,7 & f_A &= 1,2 \cdot 10^{-2} \sigma_{сж} + 7,1 \end{aligned}$$

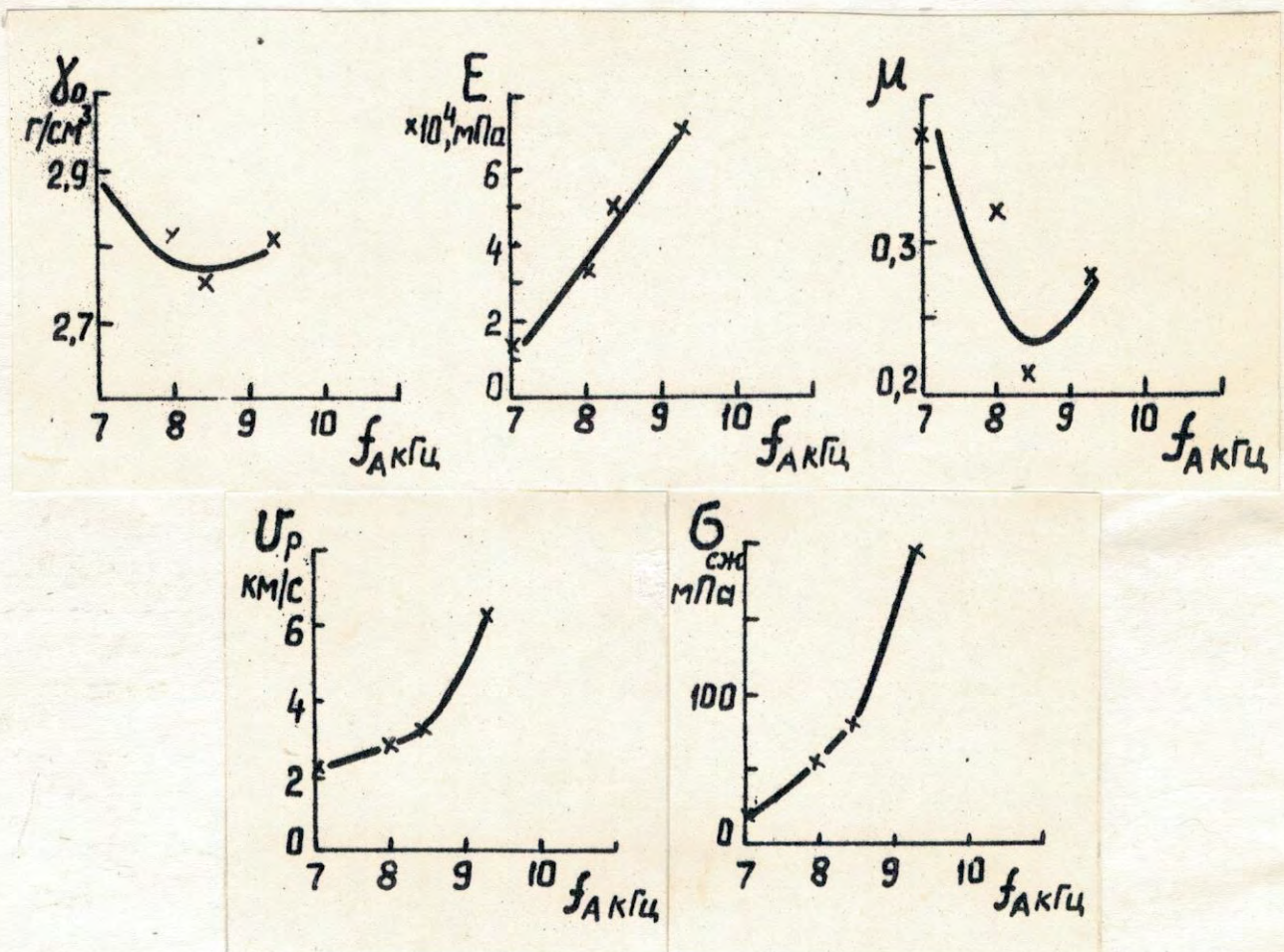


Рис.4.6. Зависимость физико-механических свойств пород от частоты f_A при исследованиях на месторождениях Донбасс и Кальйок

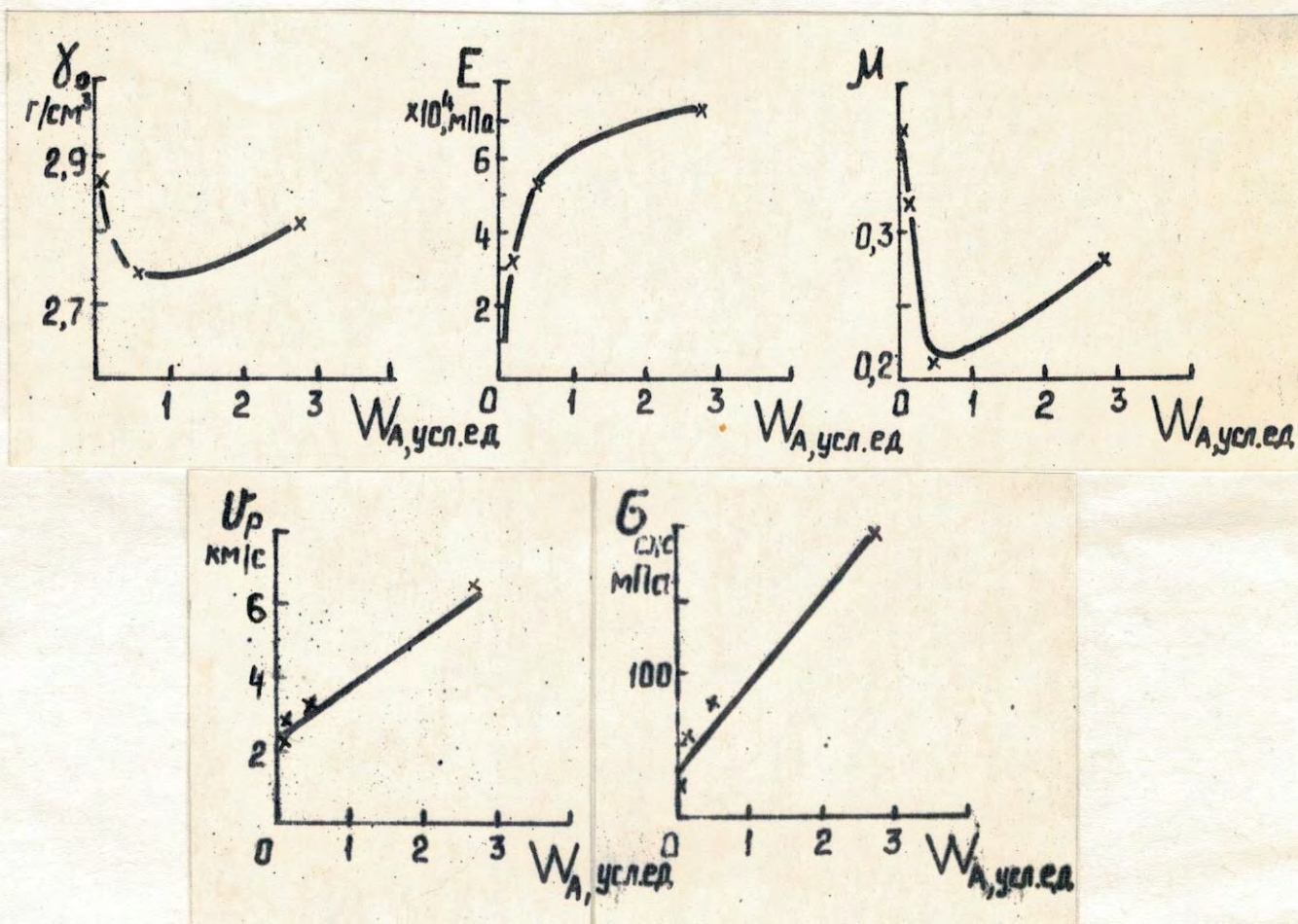


Рис. 4.7. Зависимость физико-механических свойств пород от энергии W_A при исследованиях на месторождениях Донбасс и Кальйок

Исследования при бурении толщи магматических пород проводились на месторождении Коашва (Хибины)*. Бурение осуществлялось однослойными алмазными коронками типа О1А4 на постоянном режиме $P=1500$ даН, $n=407$ мин⁻¹, $Q=20$ дм³/мин. В таблице 5 приведены физико-механические свойства пород и информативные параметры акустического поля при исследованиях на м-ние Коашва. Корреляционный анализ экспериментальных данных (Табл.6) показывает положительную связь величин W_A и f_A со скоростью распространения продольных упругих волн U_p и пределом прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$ с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ . Связь энергии W_A с плотностью пород выражена слабо.

Таблица 6

Коэффициенты корреляции информативных параметров акустического поля и физико-механических свойств пород при исследованиях на месторождении Коашва.

	γ	E	μ	U_p	$\sigma_{сж}$
W_A	-0,1	0,65	0,53	0,69	0,78
f_A	0,68	0,95	0,81	0,85	0,96

При стендовых исследованиях разбуривались магматические и метаморфические горные породы. На рис.4.8 приведены акустические спектры при бурении гематитового кварцита, гранито-гнейса и биотитового гранита импрегнированной алмазной коронкой типа И4ДП на постоянном режиме $P=1000$ даН, $n=400$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. В таблице 7 и таблице 8 приведены соответственно физико-механические свойства и петрографические особенности пород.

* Экспериментальные данные по м-нию Коашва получены Б.В.Шатовым, Д.М.Стрыгиным, Н.П.Рудаковой, С.А.Авдеевым

Таблица 5

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры акустического поля при исследованиях на месторождении Коашва

Горная порода	γ	E	μ	V_p	$\sigma_{сж}$	W_A	f_A
	г/см ³	мПа	-	км/с	мПа	усл.ед.	кГц
Руда апатит-нефелиновая	2,98	6,5	0,22	4,8	165	0,22	11,0
Уртит массивный	2,70	7,5	0,26	5,6	195	1,95	11,3
Ювит массивный	2,65	7,5	0,21	5,8	215	2,11	11,5
Иолит трахитоидный	3,00	10,0	0,28	6,1	260	2,08	13,6
Мельтейгит	3,20	12,0	0,28	6,4	275	2,33	13,7

Из рис.4.8 видно, что при бурении коронкой типа И4ДП в каждой горной породе возникает акустическое поле определенного спектрального состава. Изменение энергии высокочастотного диапазона акустического поля W_A совпадает с изменением прочностных и упругих свойств пород (табл.7). Величины предела упругости σ_y , предела прочности $\sigma_{сж}$ и относительной энергоемкости разрушения Π_0 при одноосном сжатии возрастают в последовательности биотитовый гранит - гранито-гнейс - гематитовый кварцит и в этой же последовательности возрастает энергия W_A . Однако частота f_A минимальна у гранито-гнейса, который имеет промежуточные между кварцитом и гранитом значения прочностных и упругих свойств. Этот факт требует специальных объяснений.

Анализируя результаты обработки экспериментальных данных,

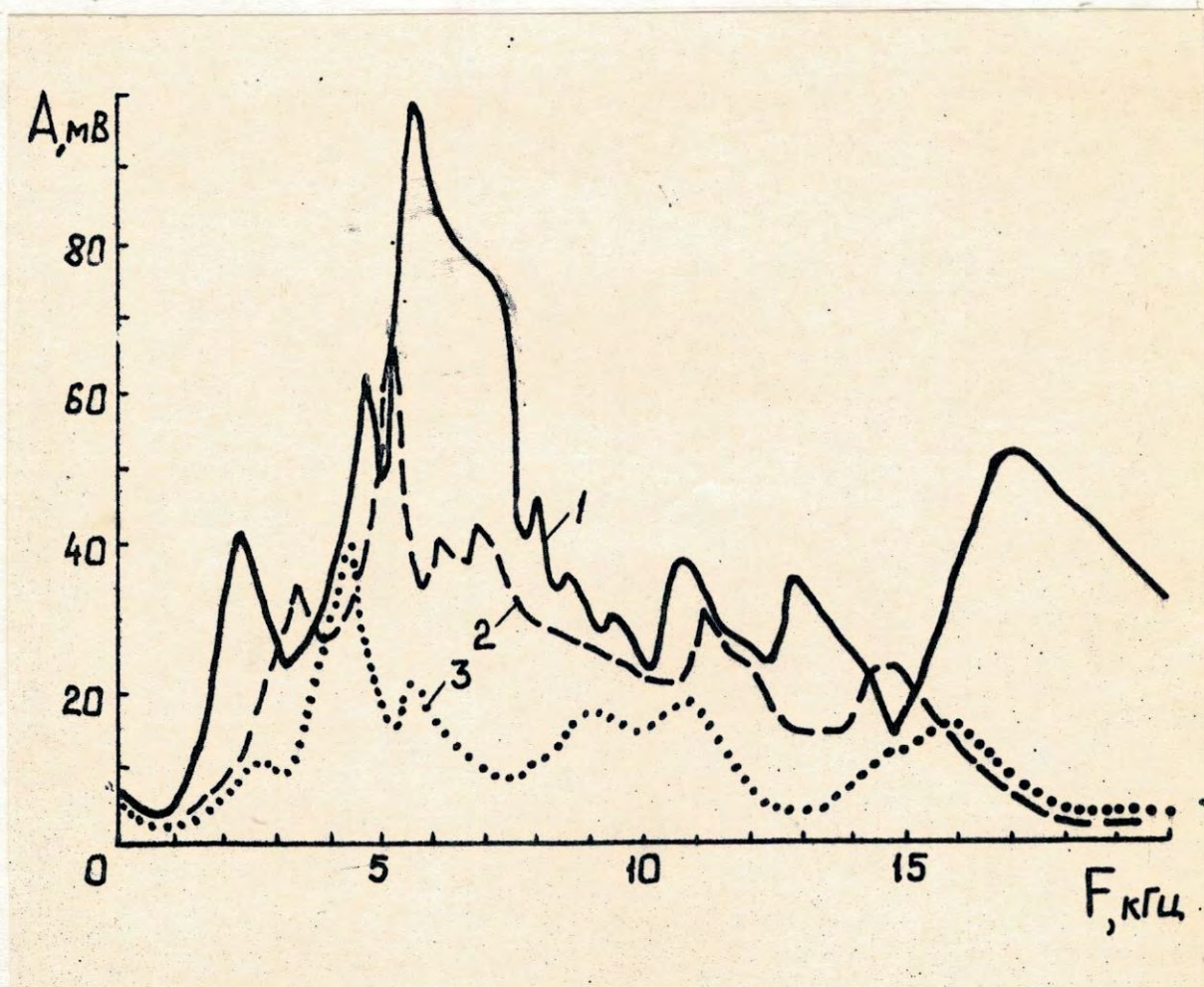


Рис.4.8. Акустические спектры при бурении в стендовых условиях монолитов гематитового кварцита (1), гранито-гнейса (2) и биотитового гранита (3) алмазной коронкой типа И4ДП

Таблица 7

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры акустического поля при исследованиях в стендовых условиях

Горная порода	γ	E	μ	v_p	σ_y	$\sigma_{сж}$	P_0	W_A	f_A
	г/см ³	мПа	-	км/с	мПа	мПа	мПа × отн.ед.	усл. ед.	кГц
Кварцит гематитовый	3,59	5,47	0,24	6,00	361	361	1,19	471	13,5
Гранито-гнейс	2,64	3,45	0,24	5,65	120	136	0,24	229	11,5
Гранит биотитовый	2,71	3,22	-	4,69	98	110	0,19	136	13,0

Таблица 8

Петрографические характеристики горных пород, разбуренных в ходе стендовых исследований

Горная порода	Структура	Текстура	Минеральный состав				
			Породообразующие минералы			Вторичные и акцессорные минералы	
			название минерала	содержание, %	размер зерен, мм	название минерала	содержание, %
Гематитовый кварцит	микро-грано-бластовая	полосчатая	кварц	55	0,01-0,1	-	-
			гематит	45	0,1 -0,5	-	-
Гранито-гнейс	гетеро-бластовая	атакси-говая	микро-клин	45-50	0,2-3,5	плагиоклаз	5
			кварц	35-45	0,05-1	гранат	1
			биотит	5-6	0,3-0,7	мусковит серпичит апатит хлорит	0,5 - 1 -
Биотитовый гранит	порфировидная	массивная	плагиоклаз	30-35	2-5	сфен апатит титано-магнетит серпичит хлорит	- - - - -
			микро-клин	30-35	2-7	-	-
			кварц биотит	25-30 10-15	0,1-2,5 -	-	-

полученных в ходе полевых и стендовых исследований, можно отметить, что в целом при увеличении прочностных и упругих свойств разбуриваемых горных пород происходит увеличение энергии высокочастотного диапазона акустического поля W_A и расширение спектра в сторону высоких частот (рост частоты f_A). Для прогноза параметров акустического поля при бурении горных пород, имеющих сильные различия в прочностных и упругих свойствах можно использовать формулы, устанавливающие линейную связь величин W_A и f_A со скоростью распространения продольных упругих волн U_P и пределом прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$ (см. выше). Но на основе только физико-механических свойств пород, определенных на макрообразцах горных пород не представляется возможным объяснить характер изменения спектрального состава акустического поля при бурении горных пород с близкими физико-механическими свойствами. Это показывает, что спектральный состав акустического поля в большей степени зависит от свойств микрослоя породы, непосредственно подвергающемуся воздействию резцов породоразрушающего инструмента. Поэтому, для нахождения строгой зависимости между спектральным составом акустического поля и свойств горных пород, необходимо исследовать процессы, протекающие на микроуровне непосредственно в зоне контакта резца с породой и предрезцовой зоне.

Следует отметить, что генетический тип породы (осадочный, магматический или метаморфический) не является определяющим фактором для акустического поля. Так как в каждом генетическом комплексе горные породы имеют большой диапазон изменения физико-механических свойств. Этот вывод подтверждается результатами бурения глинистых сланцев в Донбассе и апатит-нефелиновых руд на месторождении Коашва (Хибины). В обоих случаях в акусти-

ческих спектрах практически отсутствовали высокочастотные составляющие, хотя породы и относятся к разным генетическим комплексам.

4.3. Влияние режима бурения на параметры акустического поля

Влияние режима бурения на параметры акустического поля изучалось при бурении алмазными коронками типа 02ИЗ, И4ДП, И6ДХ, БС, А4ДП, АКУ, К-01 диаметром 59 мм и коронками типа К-01-3, ИМВ-3 диаметром 46 мм в породах УП-Х категории по буримости. Диапазон изменения режимных параметров составлял по осевой нагрузке P от 500 до 2000 даН, по частоте вращения n от 100 до 1500 мин⁻¹. Расход промывочной жидкости при бурении не изменялся и был равен 19 дм³/мин.

На рис. 4.9 и 4.10 приведены акустические спектры при бурении гематитового кварцита импрегнированной алмазной коронкой типа И4ДП диаметром 59 мм на различных режимах бурения. Видно, что регулирование режима бурения вызывает изменения в акустическом спектре, причем осевая нагрузка P и частота вращения n неадекватны по характеру вносимых в акустический спектр изменений.

Исследования показали, что характер изменения акустического спектра при регулировании режимных параметров также зависит от типа применяемого породоразрушающего инструмента. В таблице 9 приведены информативные параметры акустического поля (энергия W_A и частота f_A), зафиксированные при бурении импрегнированной коронкой типа И4ДП и однослойной коронкой типа А4ДП диаметром 59 мм гранито-гнейса (IX категории по буримости) при различных сочетаниях осевой нагрузки P и частоты вращения n . Из таблицы 9 видно, что при изменении P и

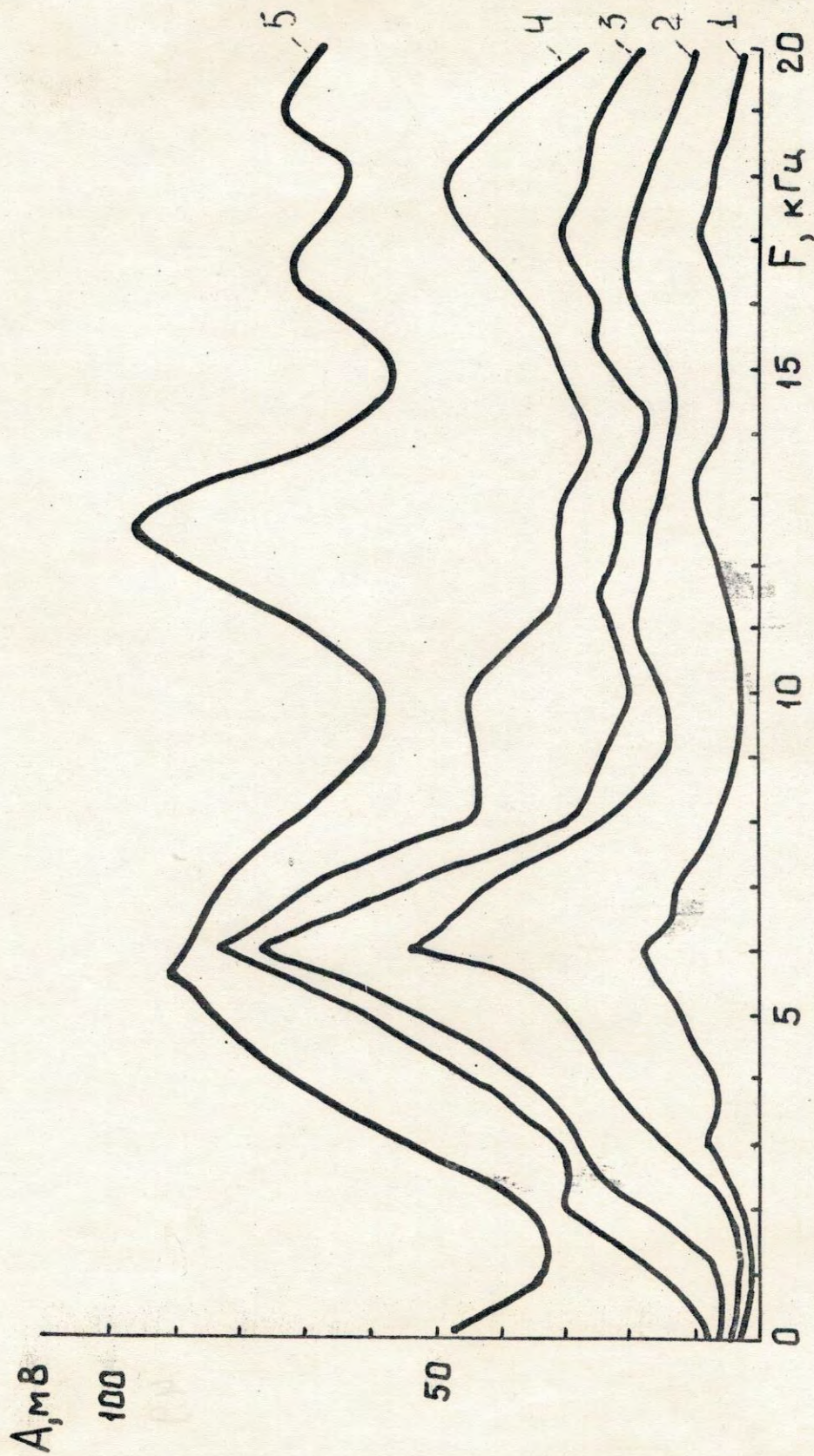


Рис. 4.9. Акустические спектры при бурении коронкой типа И4ДП гематитового кварцита на различных частотах вращения n ($P=1000 \text{ даН}$, $Q=19 \text{ дм}^3/\text{мин}$):
 1 - $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, 2 - $n = 200 \text{ мин}^{-1}$, 3 - $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, 4 - $n = 400 \text{ мин}^{-1}$,
 5 - $n = 500 \text{ мин}^{-1}$

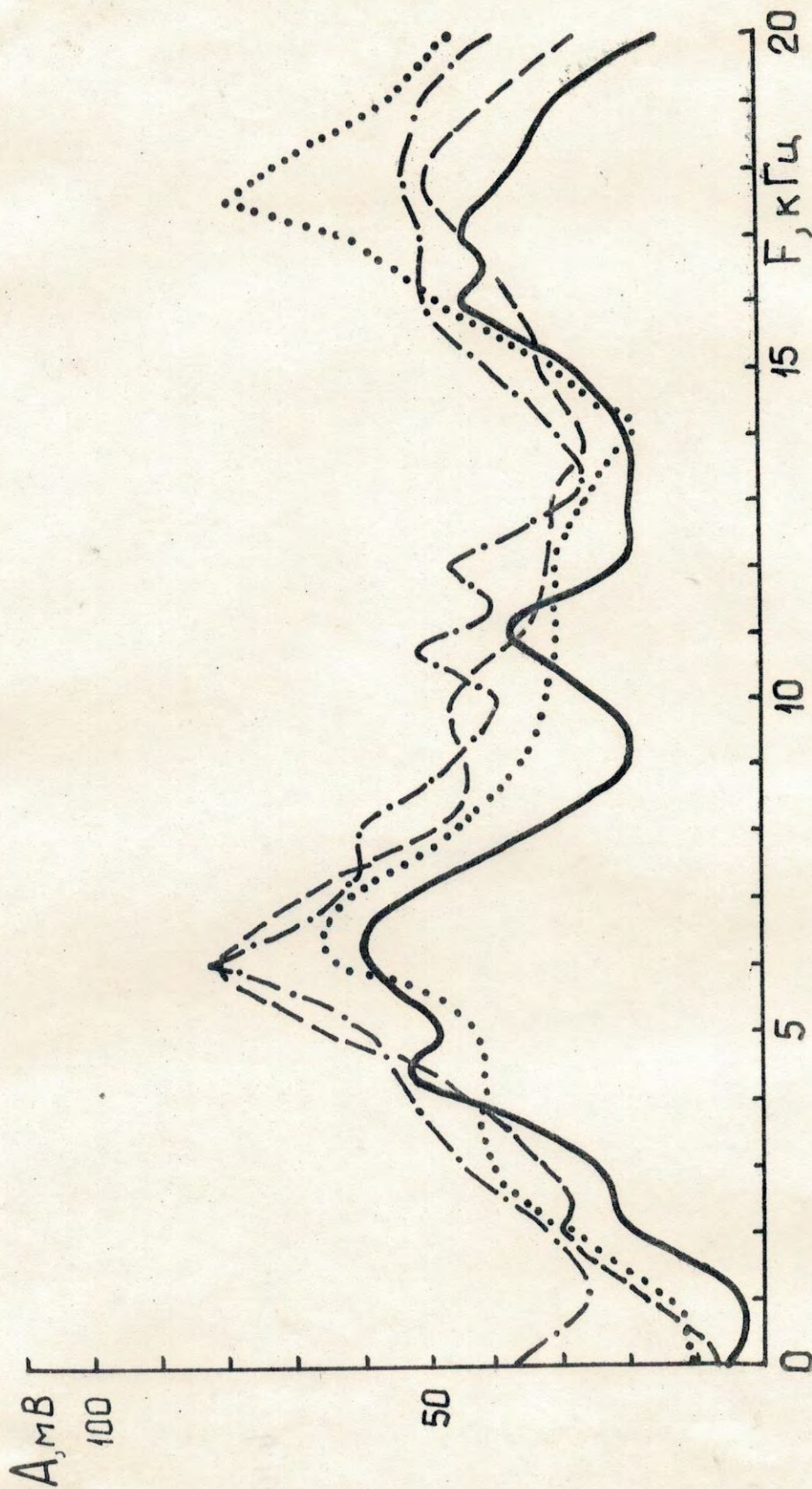


Рис. 4.10. Акустические спектры при бурении коронкой типа И4Ш гематитового кварцита при различных осевых нагрузках P ($\nu = 400 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 19 \text{ дм}^3/\text{мин}$):
 / — $P = 500 \text{ даН}$, / — $P = 1000 \text{ даН}$, / — $P = 1500 \text{ даН}$, ··· — $P = 2000 \text{ даН}$

Таблица 9

Информативные параметры акустического поля, зафиксированные при различных сочетаниях осевой нагрузки P и частоты вращения n при бурении коронками типа И4ДП и А4ДП гранито-гнейса

Тип коронки	И4ДП				А4ДП			
$\frac{P, \text{даН}}{n, \text{мин}^{-1}}$	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
1. Энергия W_A , усл.ед.								
100	6	5,5	7	5,5	4	7,5	10,5	8
200	8,5	7	9	15	4,5	9	14	11
300	10,5	11,5	14,5	17	4,5	14	19,5	13,5
400	16,5	22,5	25,5	25,5	5	24,5	24	36
500	21	36	39,5	30,5	9	67,5	46,5	49
2. Частота f_A , кГц								
1000	11,2	11,3	12,3	12,4	12,6	11,7	11,3	11,8
200	10,5	11,4	11,8	10	12,9	10,9	10,8	11,2
300	10,4	11,6	11,9	11,1	12,1	10,5	10,7	10,8
400	10,3	10,4	11,6	11,3	11,8	10,4	10,6	10,5
500	10,4	10,3	11,1	10,8	10	10,4	10,7	10,4

n происходит изменение энергии W_A и частоты f_A . Между режимными параметрами и информативными параметрами акустического поля были рассчитаны коэффициенты корреляции, которые приведены в табл. 10.

Таблица 10

Коэффициенты корреляции режимных параметров и информативных параметров акустического поля при бурении коронками типа И4ДП и А4ДП гранито-гнейса

Тип коронки	И4ДП		А4ДП	
Параметр режима бурения	W_A	f_A	W_A	f_A
P	0,24	0,53	0,34	-0,4
n	0,89	-0,53	0,7	-0,65

Характер изменения величин W_A и f_A от частоты вращения одинаков для обеих коронки. При увеличении частоты вращения в целом происходит увеличение энергии W_A и смещение спектра в сторону низких частот (уменьшение f_A). Особенно тесная связь наблюдается у частоты вращения n с энергией высокочастотного диапазона W_A . Для обеих коронки зависимость $W_A = f(n)$ с достаточной точностью аппроксимируется линейной функцией:

$$\text{И4ДП} \quad W_A = 6,3 \cdot 10^{-2} n - 2,2$$

$$\text{А4ДП} \quad W_A = 85 \cdot 10^{-2} n - 6,4$$

Коэффициент корреляции осевой нагрузки P и энергии W_A имеет невысокие значения у обеих коронки. Это указывает на сложный характер зависимости $W_A = f(P)$. В тоже время при бурении различными типами коронки изменение осевой нагруз-

ки приводит к неодинаковому изменению акустического спектра. Если при бурении коронкой типа И4ДП увеличение осевой нагрузки в целом приводит к росту f_A , то при бурении коронкой типа А4ДП рост P сопровождается уменьшением f_A .

При бурении однослойной коронкой типа А4ДП диаметром 59 мм биотитового гранита (УШ категории по буримости) осевая нагрузка P изменялась в диапазоне от 500 до 2000 даН с шагом 250 даН, частота вращения n от 100 мин⁻¹ до 1000 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹. Всего было получено 70 сочетаний P и n , на каждом из которых были зафиксированы информативные параметры акустического поля. Между режимными параметрами и информативными параметрами акустического поля были рассчитаны коэффициенты корреляции. Коэффициент корреляции энергии W_A с частотой вращения n равен $r = 0,96$, осевой нагрузкой P равен $r = 0,34$. Коэффициент корреляции частоты f_A с частотой вращения n равен $r = -0,89$, осевой нагрузкой P равен $r = 0,78$. Величина и знаки коэффициентов корреляции показывают тесную положительную связь частоты вращения с энергией W_A и отрицательную - с частотой f_A . Увеличение частоты вращения n при бурении коронкой типа А4ДП приводит к росту энергии W_A и снижению частоты f_A . Зависимости $W_A = f(n)$ и $f_A = f(n)$ достаточно точно аппроксимируются линейными функциями:

$$W_A = 0,11n + 3,3 \quad f_A = -1,4 \cdot 10^{-3}n + 6,6$$

При увеличении осевой нагрузки в целом происходит смещение энергии в сторону высоких частот (рост частоты f_A). Линейная связь осевой нагрузки P и энергией W_A не выражена. Не слишком высокие коэффициенты корреляции осевой нагрузки с параметрами акустического поля указывают на возможность появления внутри диапазона регулирования P экстремумов в зависимостях $W_A = f(P)$

и $f_A = f(P)$. На рис. 4.11 приведены зависимости W_A и f_A от частоты вращения n и осевой нагрузки P при бурении коронкой типа А4ДП. Видно, что зависимости $W_A = f(P)$ и $f_A = f(P)$ носят нелинейный характер. При $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ в диапазоне $P = 1250-1500 \text{ даН}$ наблюдается максимум функции $W_A = f(P)$ и минимум функции $f_A = f(P)$.

Экспериментальные исследования показали зависимость параметров акустического поля от частоты вращения и осевой нагрузки. При регулировании режима бурения характер изменения акустического спектра также зависит от типа применяемого породоразрушающего инструмента. Сходные результаты по зависимости энергии W_A и частоты f_A от режимных параметров получены при бурении в различных горных породах. Увеличение частоты вращения n приводит к росту энергии W_A и снижению частоты f_A . Зависимость $W_A = f(n)$ аппроксимируется линейной функцией вида $W_A = kn + b$. Зависимости $W_A = f(P)$ и $f_A = f(P)$ носят более сложный характер. Внутри диапазона регулирования осевой нагрузки возможно появление экстремумов в зависимостях $W_A = f(P)$ и $f_A = f(P)$. Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что изменение режимных параметров не в полной мере отражает изменение параметров акустического поля. По-видимому, энергия W_A и частота f_A являются функцией процессов, протекающих при разрушении горной породы, которые в свою очередь сложным образом связаны с режимом бурения.

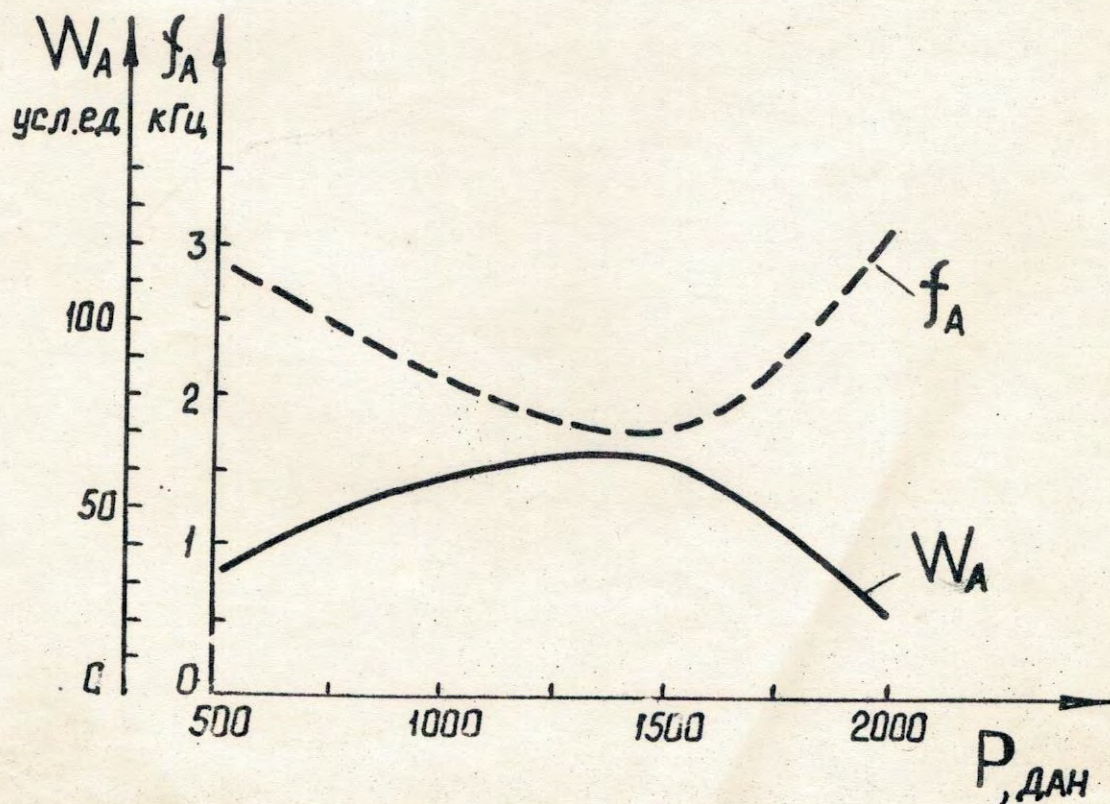
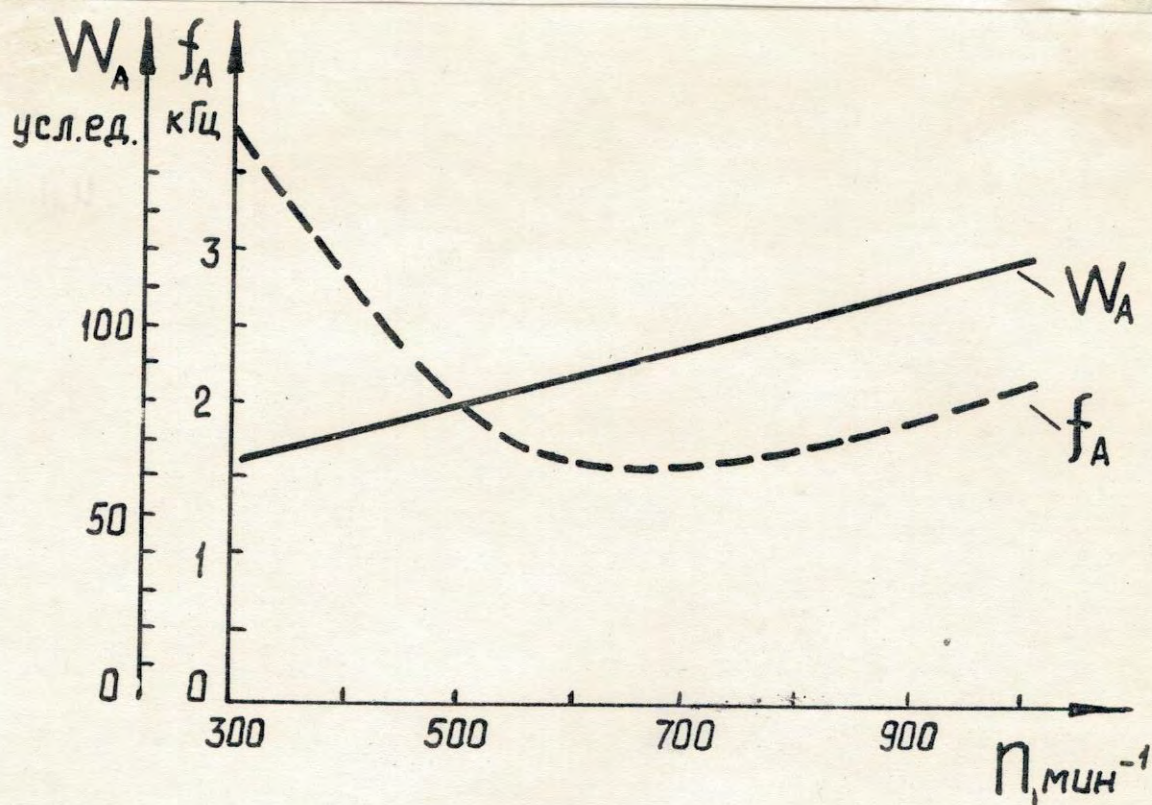


Рис.4.11. Зависимость энергии W_A и частоты f_A от частоты вращения n ($P=1500$ даН, $Q=19$ дм³/мин) (а) и осевой нагрузки P ($n=600$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин) (б) при бурении коронкой типа А4Д1 биотитового гранита

4.4. Информативные параметры акустического поля и удельная объемная энергия разрушения

Связь информативных параметров акустического поля с удельной объемной энергией разрушения W_Q изучалась при определении зависимости акустического поля от типа применяемого породоразрушающего инструмента, физико-механических свойств горных пород и режима бурения. Исследования показали, что изменение при бурении типа алмазной коронки, горной породы или режима бурения приводит к изменению не только параметров акустического поля, но и значений механической скорости бурения, мощности, расходуемой на забое, и удельной объемной энергии разрушения.

В табл. II приведены значения механической скорости бурения V_M , мощности, расходуемой на забое, N_3 , удельной объемной энергии разрушения W_Q и информативные параметры акустического поля - энергия W_A и частота f_A , полученные при бурении различными типами алмазных коронок на постоянных режимах в биотитовом граните, гранито-гнейсе и гематитовом кварците. Из данных, приведенных в таблице II видно, что в каждой горной породе между величинами W_Q и f_A прослеживаются одинаковые зависимости. При увеличении удельной объемной энергии разрушения W_Q происходит рост частоты f_A . Для совместной обработки экспериментальных данных, полученных при бурении различными типами алмазных коронок в биотитовом граните, гранито-гнейсе и железистом кварците величины W_Q , W_A и f_A (табл. II) были нормированы по формуле:

$$\dot{X} = \frac{X}{\bar{X}}$$

где $\dot{X}$ - нормированное значение параметра, X - измеренное

Таблица II

Значения механической скорости бурения V_m , мощности, расходуемой на забое N_3 , удельной объемной энергии разрушения W_q и информативных параметров акустического поля при бурении различными типами алмазных коронок диаметром 59 мм горных пород УШ-Х категорий по буримости

Тип алмазной коронки	Тип горной породы	Категория по буримости	Режим бурения			V_m м/ч	N_3 кВт	W_q дж/м	W_A усл.ед.	f_A кГц
			Р	п	Q					
			даН	мин ⁻¹	дм ³ /мин					
ИЖ ИЖС ИЖС	биотитовый гранит	Х	750	700	19	3,2	4,5	0,39	104	11,5
						6,0	4	0,16	181	11,4
						8,1	4	0,13	198	11,2
МАКЕТ И4ДП АКУ А4ДП	гранитогнейс	IX	1000	400	19	0	5	0,35	0	11,1
						2,1	2,5	0,42	229	11,2
						1,3	1	0,04	161	9,8
ЕС И6ДП И4ДП А4ДП	биотитовый гранит	УШ	750	500	19	1,1	3	0,77	67	11,5
						1,6	2	0,37	64	9,6
						1,1	2	0,52	108	11,3
						0,4	2	0,39	52	9,9

значение параметра, $\bar{X}$ - среднее значение параметра в каждой породе. Нормированные значения удельной объемной энергии разрушения W_Q , энергии W_A и частоты f_A приведены в табл.12, а на рис.4.12 показаны зависимости $W_Q=f(f_A)$ и $W_Q=f(W_A)$. Эти зависимости аппроксимируются линейными функциями вида

$y=kx+b$. Для зависимости удельной объемной энергии разрушения от частоты f_A аппроксимирующая функция равна $W_Q=5,7f_A-4,8$ и коэффициент корреляции $r=0,76$, а для зависимости $W_Q=f(W_A)$ - $W_Q=-0,98W_A+0,7$ и коэффициент корреляции $r=-0,7$. Величины и знаки коэффициентов корреляции показывают, что при изменении типа алмазной коронки существует положительная связь удельной объемной энергии разрушения с частотой f_A и отрицательная с энергией W_A .

Связь информативных параметров акустического поля с удельной объемной энергией разрушения при регулировании режима бурения изучалась при бурении алмазными коронками различных типов (см.раздел 4.3) в породах УШ-Х категорий по буримости. Учитывая, что частота вращения снаряда n и осевая нагрузка P неадекватным образом влияют на акустический спектр, отдельно исследовались зависимости $W_Q=f(f_A)$ и $W_Q=f(W_A)$ при изменении P и при изменении n . Алмазной коронкой типа А4ДП диаметром 59 мм осуществлялось бурение биотитового гранита УШ категории по буримости. Всего при бурении было использовано 70 режимов. Осевая нагрузка P изменялась в диапазоне от 500 до 2000 даН с шагом 250 даН, частота вращения n - от 100 до 1000 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹. Расход промывочной жидкости не изменялся и был равен 19 дм³/мин. При нахождении зависимостей $W_Q=f(f_A)$ и $W_Q=f(W_A)$ использовались средние значения величин W_Q , W_A и f_A при каждом значении осевой

Таблица 12

Нормированные значения удельной объемной энергии разрушения W_d и информативных параметров акустического поля при бурении различными типами алмазных коронок

W_d	W_A	f_A
0,1	1,55	0,9
0,45	1,32	0,98
0,55	1,21	1,0
0,73	0,88	0,93
0,76	0,71	0,96
1,0	1,5	1,09
1,3	0,84	1,03
1,34	0,69	1,01
1,51	0,91	1,11
1,55	0,59	1,04

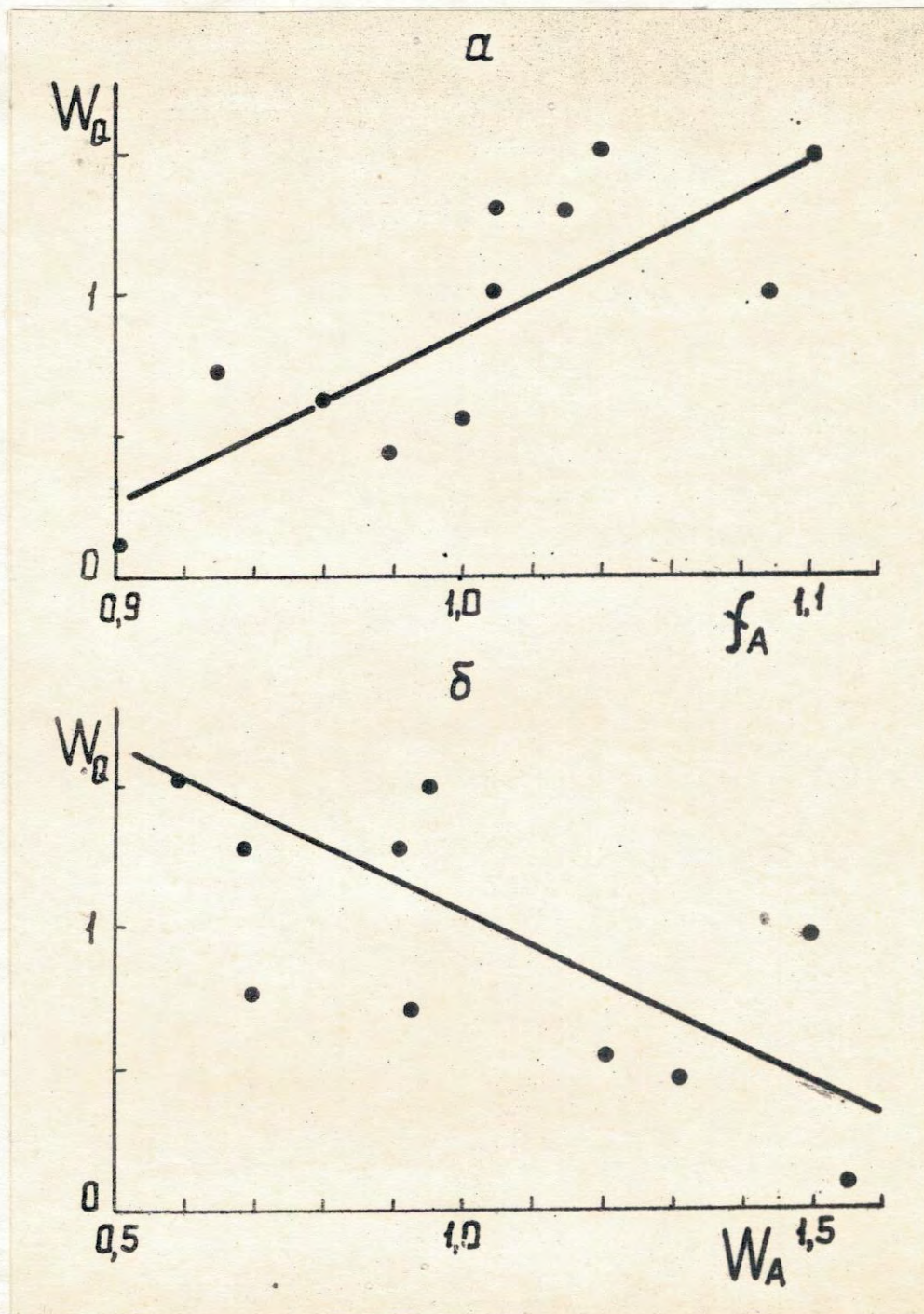


Рис.4.12. Зависимости нормированных значений удельной объемной энергии разрушения W_Q от частоты f_A (а) и энергии W_A (б) при бурении различными типами алмазных коронок

нагрузки и частоты вращения (табл. I3).

На рис. 4. I3 показаны зависимости удельной объемной энергии разрушения W_Q от частоты f_A и энергии W_A при бурении коронкой типа А4ДП. Отдельно показаны точки, полученные при изменении частоты вращения и осевой нагрузки. Из рис. 4. I3 видно, что увеличение частоты f_A однозначно приводит к росту удельной объемной энергии разрушения (рис. 4. I3 "а"). Причем не важно, получены ли эти точки при изменении частоты вращения или осевой нагрузки. Зависимость $W_Q = f(f_A)$ уверенно аппроксимируется линейной функцией $W_Q = 6 \cdot 10^{-2} f_A - 4,6$, коэффициент корреляции равен $r = 0,78$. Но данные по W_Q и W_A имеют большую диффузность. Дополнительный анализ показал, что нельзя рассматривать влияние энергии W_A на удельную объемную энергию разрушения W_Q без учета частоты f_A . Речь идет о комплексном подходе к акустическому спектру. Но при постоянной частоте f_A в акустическом спектре, увеличение энергии W_A приводит к снижению W_Q . На рис. 4. I4 приведена зависимость удельной объемной энергии разрушения W_Q от энергии W_A (в акустическом спектре частота f_A постоянна) при бурении коронкой типа И4ДП той же горной породы. Видно, что рост энергии W_A сопровождается снижением удельной объемной энергии разрушения W_Q . Зависимость $W_Q = f(W_A)$ является линейной функцией: $W_Q = -1,9 \cdot 10^{-3} W_A + 0,5$, коэффициент корреляции $r = -0,88$.

Влияние смены горной породы на зависимости удельной объемной энергии разрушения W_Q от энергии W_A и частоты f_A изучалось по результатам бурения алмазных коронок типа А4ДП, И4ДП, АКУ, И6ДХ и К-01 на постоянных режимах в породах УШ-Х категорий по буримости. Для всех типов коронок установлено, что увеличение удельной объемной энергии разрушения сопровож-

Таблица 13

Средние значения удельной объемной энергии разрушения W_R и информативных параметров акустического поля при бурении коронкой типа А4ДП на различных режимах

n	P	W_R	W_A	f_A
мин ⁻¹	даН	дж/м ³	усл.ед.	кГц
200	500 - 2000	0,15	14	10,5
300		0,19	21	10,3
400		0,13	59	9,9
500		0,14	74	9,8
600		0,1	50	9,5
700		0,07	65	9,1
800		0,12	92	9,4
900		0,14	118	9,5
1000		0,14	108	9,5
200 - 1000	750	0,08	53	9,3
	1000	0,09	73	9,4
	1250	0,11	67	9,6
	1500	0,11	75	9,3
	1750	0,13	66	10,2
	2000	0,16	59	10,0

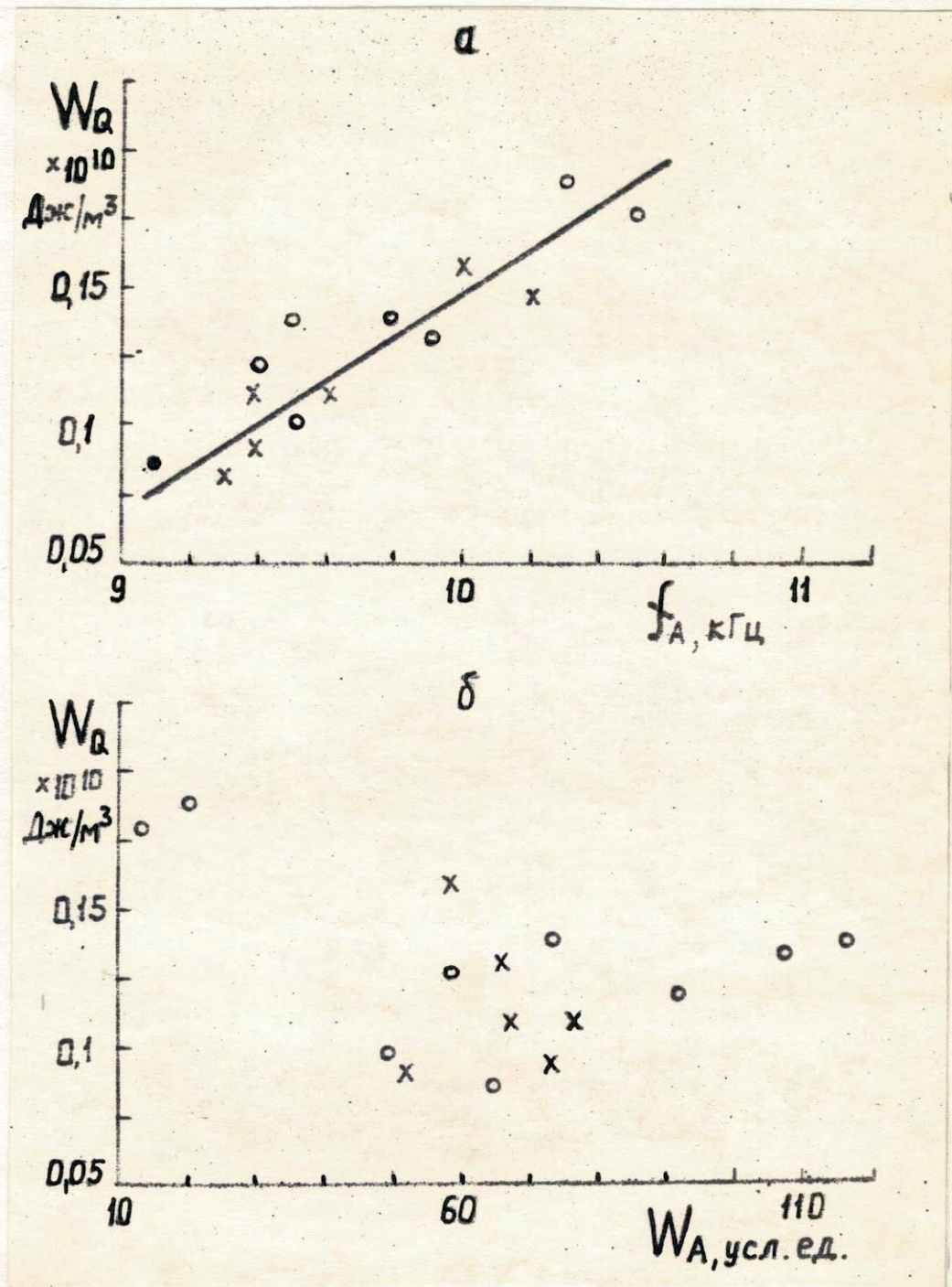


Рис.4.13. Зависимости удельной объемной энергии разрушения W_Q от частоты f_A (а) и энергии W_A (б) при бурении коронкой типа А4Д1 на различных режимах:

- - изменение частоты вращения,
- × - изменение осевой нагрузки

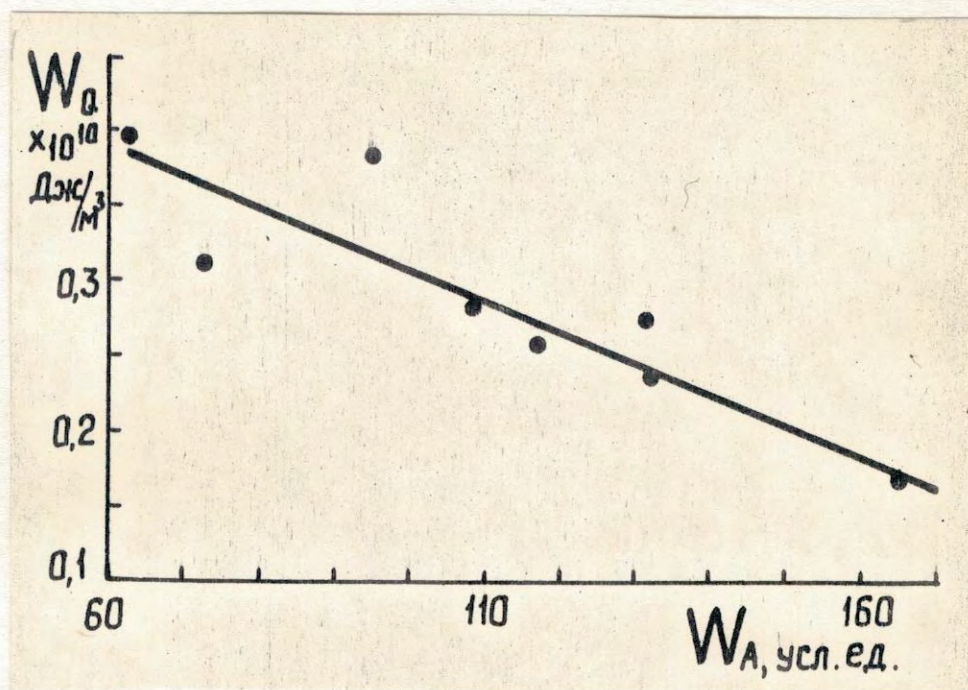


Рис.4.14. Зависимость удельной объемной энергии разрушения W_Q от энергии W_A при бурении коронкой типа И4ДП на режимах с постоянной частотой f_A

дается ростом энергии W_A и частоты f_A . В табл. I4 приведены значения удельной объемной энергии разрушения W_Q , энергии W_A и частоты f_A , зафиксированные при бурении коронкой типа И4ДП диаметром 59 мм на постоянном режиме ($P=1000$ даН, $n=400$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин) биотитового гранита VIII и X категорий по буримости, гранито-гнейса IX категории по буримости и гематитового кварцита X категории по буримости. На рис. 4.15 показаны зависимости удельной объемной энергии разрушения от энергии W_A и частоты f_A при бурении коронкой типа И4ДП различных горных пород. Из рис. 4.15 видно, что при увеличении частоты f_A и энергии W_A происходит рост W_Q . Коэффициент корреляции удельной объемной энергии разрушения W_Q и частоты f_A равен $r = 0,85$, W_Q и энергии W_A - $r = 0,89$.

Для всех факторов, определяющих характер протекания процесса разрушения горной породы (тип породоразрушающего инструмента, режим бурения и горная порода) выявлена качественно одинаковая связь удельной объемной энергии разрушения W_Q с частотой f_A . При возрастании частоты f_A удельная объемная энергия разрушения увеличивается. Таким образом, именно спектральный состав высокочастотных колебаний является определяющим фактором для энергоемкости разрушения. Связь энергии W_A с W_Q при изменении типа породоразрушающего инструмента и режима бурения в целом отличается от зависимости $W_Q = f(W_A)$ при смене горной породы. В первом случае рост удельной объемной энергии разрушения происходит вместе с увеличением частоты f_A , но увеличение энергии W_A (при неизменной частоте f_A) приводит к снижению W_Q . При смене горной породы рост удельной объемной энергии разрушения сопровождается как увеличением частоты f_A , так и ростом энергии W_A .

Характер изменения удельной объемной энергии разрушения

Таблица I4

Показатели эффективности процесса бурения и параметры
высокочастотного диапазона акустического поля при бурении
импрегнированной алмазной коронкой типа И4ДП № 247 различ-
ных горных пород на постоянном режиме $P=1000$ даН, $n=400$ мин⁻¹,
 $Q=19$ дм³/мин

Тип горной породы	Категория по бури- мости	V_m м/ч	N_3 кВт	W_Q $\times 10^{10}$ Дж/м ³	W_A усл.ед.	f_A кГц
Гематито- вый квар- цит	X	1,8	3,5	0,56	471	13,5
Биотитовый гранит	IX	3,6	3,7	0,27	127	11,4
Гранито- гнейс	IX	2,1	2,5	0,35	229	11,1
Биотитовый гранит	УШ	1,8	2,5	0,4	136	13

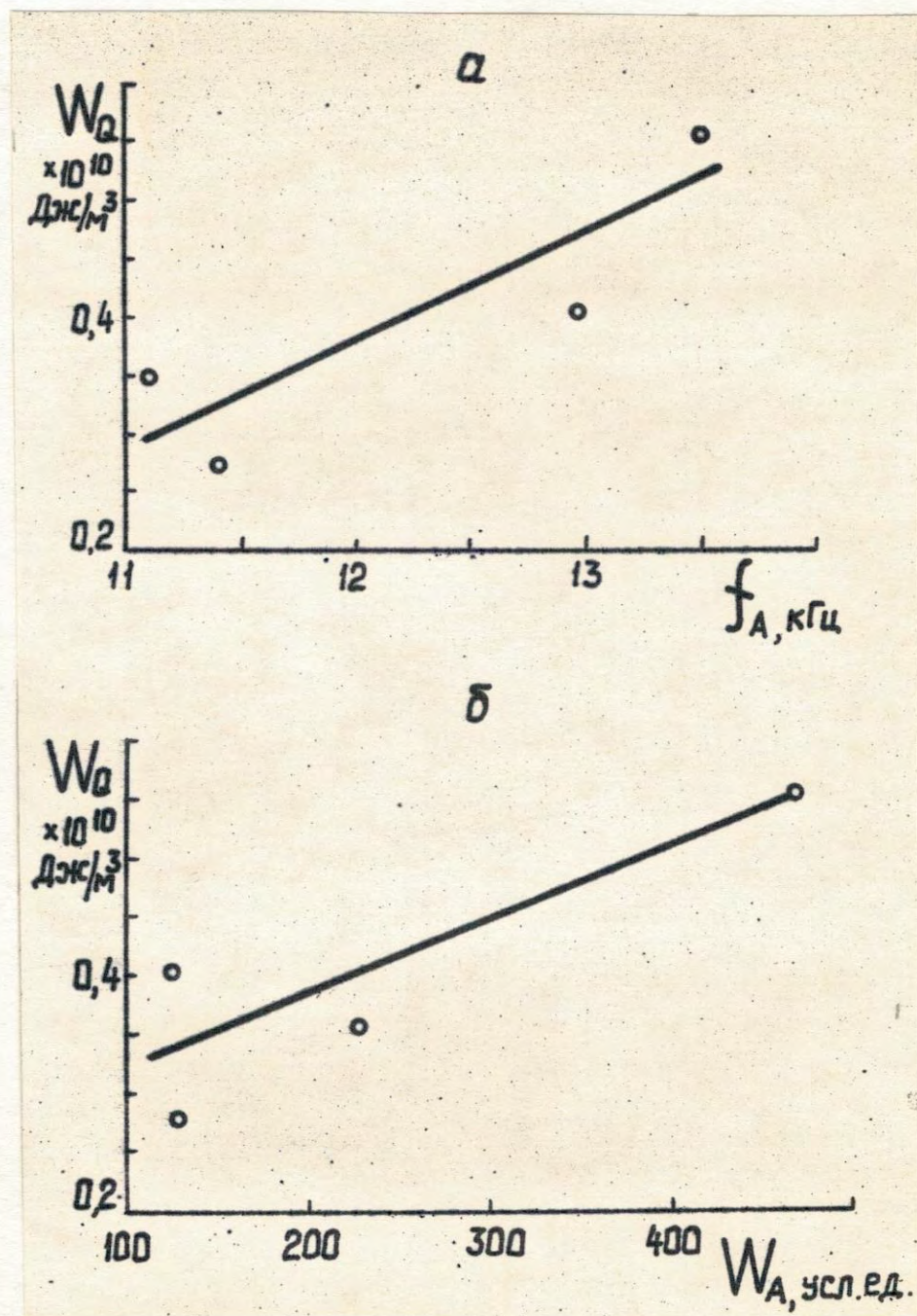


Рис.4.15. Зависимость удельной объемной энергии разрушения W_Q от частоты f_A (а) и энергии W_A (б) при бурении коронкой типа И4ДП различных горных пород

и информативных параметров акустического поля при смене горной породы можно объяснить на основе установленной зависимости параметров акустического поля от физико-механических свойств пород (см. раздел 4.2.). Установлено, что при увеличении прочностных свойств пород при бурении происходит рост энергии W_A и частоты f_A . Таким образом, увеличение энергии W_A и частоты f_A говорит об увеличении прочностных свойств породы, и, как следствие, о трудности их разбуривания. Именно поэтому повышении энергии W_A и частоты f_A сопровождается ростом удельной объемной энергии разрушения. Речь идет уже о микропроцессах, протекающих при разрушении горной породы. Выяснение физики процесса разрушения при бурении может стать предметом дальнейших исследований, однако, уже сейчас результаты экспериментальных исследований позволяют сформулировать критерий оптимальности процесса бурения на основе спектрального анализа акустического поля. На основе экспериментально установленной зависимости удельной объемной энергии разрушения с информативными параметрами высокочастотного диапазона 7 - 20 кГц акустического поля критерий оптимальности процесса разрушения можно сформулировать в виде:

$$\begin{aligned} f_A &\longrightarrow \min \\ W_A &\longrightarrow \max \end{aligned} \quad (4.1)$$

Физический смысл этого критерия заключается в необходимости разрушать горную породу с максимальной интенсивностью, но с наименьшей энергоемкостью.

Критерий процесса разрушения на основе спектрального анализа акустического поля не входит в противоречие с известными формулами П.Риттингера, Ф.Кика, Ф.Бонда, П.А.Ребиндера /4,52/ в той

или иной степени устанавливающие зависимость расхода энергии на разрушение с размерами образующихся частиц. Во всех формулах затраты энергии на разрушение возрастают с уменьшением размеров образующихся частиц (с увеличением площади вновь образованной поверхности). Связь спектрального состава акустического поля и размеров образующихся частиц можно предположить исходя из масштабного фактора и основываясь на гипотезе о генезисе высокочастотных акустических колебаний в процессе бурения (см. главу 3, раздел 3). Горная порода представляет собой неоднородные образования с наличием многочисленных дефектов структуры. В большом объеме породы вероятность нахождения дефектов структуры, снижающих прочность, высока; уменьшение объема, напротив, снижает вероятность появления дефектов. Поэтому, разрушение более мелких объемов породы будет означать разрыв более прочных связей, и, как следствие, повышение энергоемкости разрушения и появление более высокочастотного сигнала.

4.5. Связь параметров акустического поля с износом алмазной коронки

При экспериментальных исследованиях изучалась связь энергии высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля с состоянием коронки и интенсивность ее износа.

Для установления связи энергии W_A и состояния коронки различные типы однослойных и импрегнированных алмазных коронок отбуривались на постоянных режимах. Состояние коронки определялось по окончании бурения. В результате исследований установлено, что при бурении импрегнированными коронками на режимах, обеспечивающих самозатачиваемость, энергия W_A в течении всего времени бурения практически не изменяется. На рис. 4.16 показана зависимость энергии W_A от глубины бурения при бурении коронкой типа ИБДХ диаметром 59 мм биотитового гранита при $P = 1500$ даН, $n = 400$ мин⁻¹, $Q = 19$ дм³/мин. Из рис. 4.16 видно, что при бурении импрегнированной коронкой типа ИБДХ величина W_A не изменяется. Изменение энергии W_A происходит только при полном износе алмазосодержащего слоя матрицы импрегнированной коронки. При полной потере режущих свойств импрегнированной коронки в акустическом спектре отсутствуют колебания выше 7 кГц и, соответственно, энергия W_A равна нулю. Это хорошо видно из рис. 3.2, кривая 2.

Ухудшение режущих свойств алмазов в коронках при бурении сопровождается уменьшением энергии W_A . На рис. 4.17 показана зависимость энергии W_A от глубины бурения H_8 коронкой типа А4ДП диаметром 59 мм гематитового кварцита при $P=5000$ даН, $n=600$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. Анализ состояния алмазной коронки по окончании бурения выявил заполирование у части объемных алмазов. На алмазах образовались столообразные поверхности

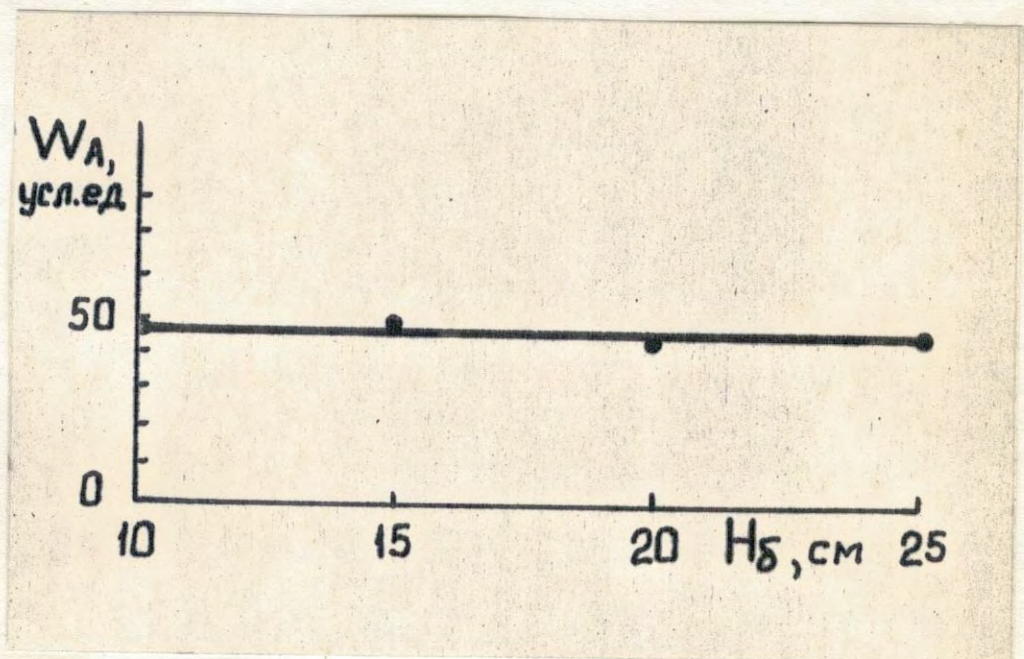


Рис. 4.16. Зависимость энергии W_A от глубины бурения H_δ при бурении импрегнированной коронкой типа ИБДХ биотитового гранита при $P=1500$ даН, $n=400$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин

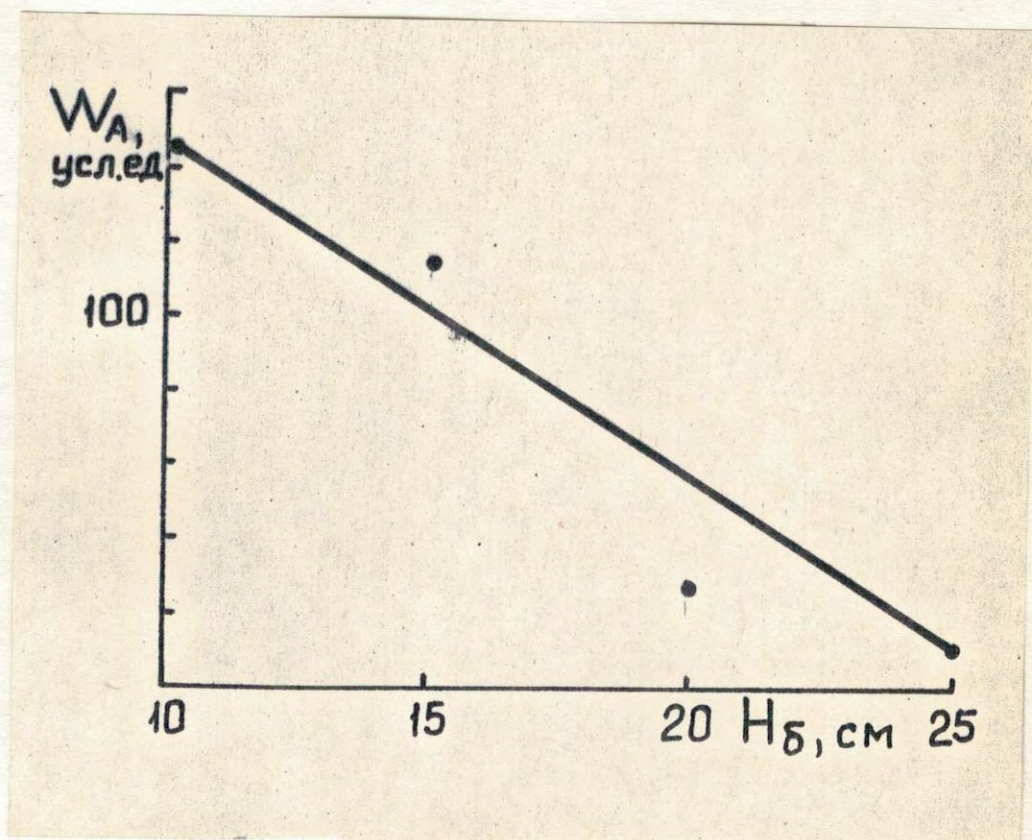


Рис.4.17. Зависимость энергии W_A от глубины бурения H_δ при бурении коронкой типа А4ДП гематитового кварцита при $P=500$ даН, $n=600$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин

со стеклянным блеском. Из рис. 4.17 видно, что по мере углубки происходит уменьшение энергии W_A , которое обусловлено ухудшением режущих свойств алмазов коронки. Таким образом, уменьшение энергии W_A можно использовать в качестве контролирующего признака ухудшения режущих свойств коронки в процессе бурения.

Зависимость интенсивности износа J импрегнированной коронки от энергии W_A устанавливалась по результатам обработки коронок типа ИБДХ, И4ДП, БС и ИЖ диаметром 59 мм и коронки типа ИМВ диаметром 46 мм в монолите биотитового гранита IX категории по буримости. Для получения зависимости $J=f(W_A)$ каждым типом коронки бурилось несколько скважин глубиной 0,5 м при различном сочетании осевой нагрузки P и частоты вращения n . Расход промывочной жидкости не изменялся и был равен 19 дм³/мин. Частота вращения снаряда изменялась в пределах 100-1000 мин⁻¹, осевая нагрузка - 500-1500 даН. Средний износ матрицы коронки по высоте определялся профилометром по 15 точкам на торце коронки по окончании бурения. Интенсивность износа коронки J на данном режиме подсчитывалась по формуле (2.2). При расчетах использовалось среднее значение энергии W_A по 5 точкам измерения, расположенным через интервал 0,1 м по глубине скважины.

Анализ экспериментальных данных показал, что при малых значениях энергии W_A интенсивность износа незначительна, рост энергии W_A сопровождается увеличением интенсивности износа коронки. На рис. 4.18 приведены зависимости интенсивности износа коронки J от энергии W_A при бурении коронками типа ИБДХ, ИЖ и ИМВ. Из рис. 4.18 видно, что зависимость $J=f(W_A)$ носит одинаковый характер для всех типов коронок. Но при одном значении энергии W_A величины интенсивности износа J различаются у коронок различных типов. Так, при $W_A = 60$ усл.ед. интенсив-

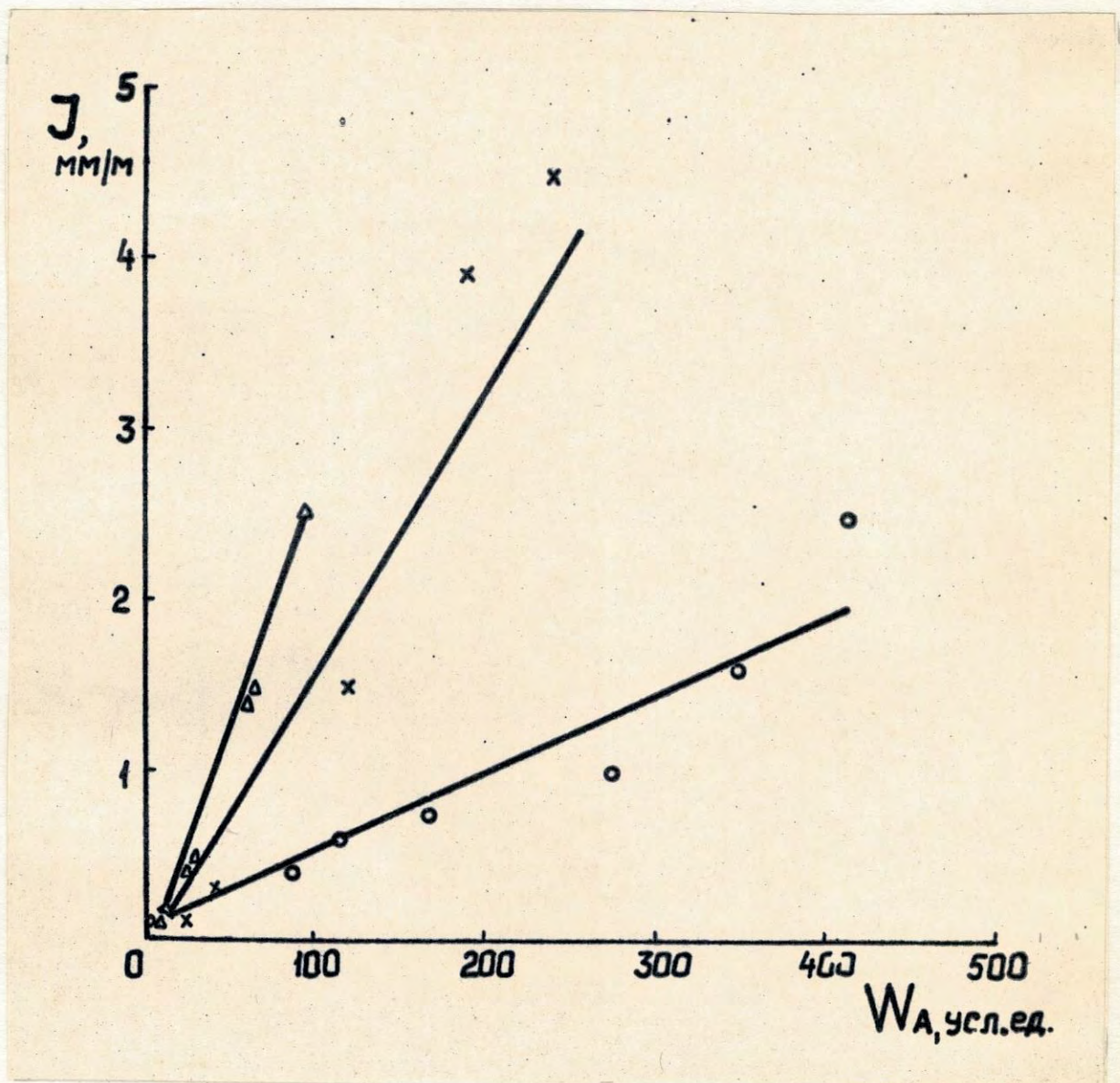


Рис.4.18. Зависимости интенсивности износа коронки J от энергии высокочастотного диапазона акустического поля W_A при бурении коронками типа ИБДХ, ИЖ и ИМВ:
 o - ИБДХ, x - ИЖ, Δ - ИМВ

ность износа у ИБДХ $J = 0,2$ мм/м, ИЖ - $J = 0,5$ мм/м, ИМВ - $J = 1,4$ мм/м. По-видимому, это можно связать с износостойкостью матрицы и качеством алмазов конкретной коронки. Экспериментальные зависимости интенсивности износа J от энергии W_A для коронок типа ИБДХ, ИЖ и ИМВ уверенно аппроксимируются линейными функциями вида $y = kx + b$. Высокие значения коэффициентов корреляции r указывают на небольшой разброс экспериментальных данных:

ИБДХ	$J = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot W_A - 6,9 \cdot 10^{-2}$	$r = 0,95$
ИЖ	$J = 2,2 \cdot 10^{-2} \cdot W_A - 6,2 \cdot 10^{-1}$	$r = 0,99$
ИМВ	$J = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot W_A - 1,1 \cdot 10^{-1}$	$r = 0,99$

В табл. 15 приведена оценка погрешности исходных данных при линейной аппроксимации зависимости $J = f(W_A)$ для коронок ИБДХ, ИЖ и ИМВ. Из табл. 15 видно, что при малых значениях энергии W_A погрешность смещения ΔJ экспериментальных $J_{\text{э}}$ и теоретических $J_{\text{т}}$ (определенных по аппроксимирующей функции) значений интенсивности износа находится в пределах 0-0,1 мм/м. При возрастании энергии W_A для коронок типа ИБДХ и ИЖ погрешность определения J несколько возрастает. Среднеквадратическое отклонение σ экспериментальных и теоретических значений J определяется в основном погрешностями при достаточно высоких энергиях W_A .

Из физических соображений очевидно, что если высокочастотные акустические колебания появляются только при протекании процесса разрушения горной породы, то их отсутствие в акустическом спектре ($W_A = 0$) будет указывать на прекращение взаимодействия алмазов с забоем и прекращение процесса изнашивания коронки. Поэтому свободный член в линейной зависимости интенсивности износа J от энергии W_A можно опустить и сама

Таблица 15

Оценка погрешности исходных данных при линейной аппроксимации зависимости $J = f(W_A)$ для коронок типа ИБДХ, ИЖ и ИМБ

ИБДХ					ИЖ					ИМБ				
W_A	J_{Δ}	J_r	ΔJ	σ	W_A	J_{Δ}	J_r	ΔJ	σ	W_A	J_{Δ}	J_r	ΔJ	σ
усл.ед.	мм/м	мм/м	мм/м	мм/м	усл.ед.	мм/м	мм/м	мм/м	мм/м	усл.ед.	мм/м	мм/м	мм/м	мм/м
2	0,1	0,1	0		26	0,1	0,1	0		5	0,1	0	0,1	
85	0,4	0,4	0		42	0,3	0,3	0		8	0,2	0,1	0,1	
115	0,6	0,5	0,1		120	1,5	2,0	0,5		25	0,4	0,5	0,1	
164	0,7	0,8	0,1	0,24	190	3,9	3,6	0,3	0,29	28	0,5	0,6	0,1	0,1
276	1,0	1,4	0,4		240	4,5	4,6	0,1		60	1,4	1,4	0	
350	1,6	1,7	0,1							63	1,5	1,5	0	
413	2,5	2,1	0,4							91	2,3	2,2	0,1	

зависимость примет вид $y = kX$. Это дает возможность прогнозировать интенсивность износа коронки на различных режимах, проведя тарировочное бурение и установив коэффициент K на одном из режимов ($K = J/W_A$). Интенсивность износа коронки на некотором режиме при известном значении энергии W_A на этом режиме можно определить по формуле:

$$J = K W_A, \text{ мм/м} \quad (4.2)$$

Бурение при повышенных значениях энергии W_A может привести к образованию на торце матрицы коронки борозд-канавок. На рис. 4.19 показано состояние коронки типа БС диаметром 59 мм после бурения на режиме с энергией $W_A = 41$ усл.ед. и на режиме с энергией $W_A = 293$ усл.ед. Если бурение на режиме с энергией $W_A = 41$ усл.ед. сопровождалось равномерным износом торца коронки, то бурение на режиме с энергией $W_A = 293$ усл.ед. (рост по W_A в 7 раз) привело к образованию канавки на торце коронки типа БС. Это показывает необходимость установления для каждого типа алмазной коронки предельного уровня энергии W_A , превышение которого может привести к развитию аномальных видов износа.

В целом, проведенные экспериментальные исследования подтвердили предположение о тесной связи акустических колебаний с процессом изнашивания породоразрушающего инструмента. На основе измерения энергии высокочастотного диапазона 7 - 20 кГц. акустического поля можно осуществлять контроль состояния коронки и интенсивность ее износа в процессе бурения.

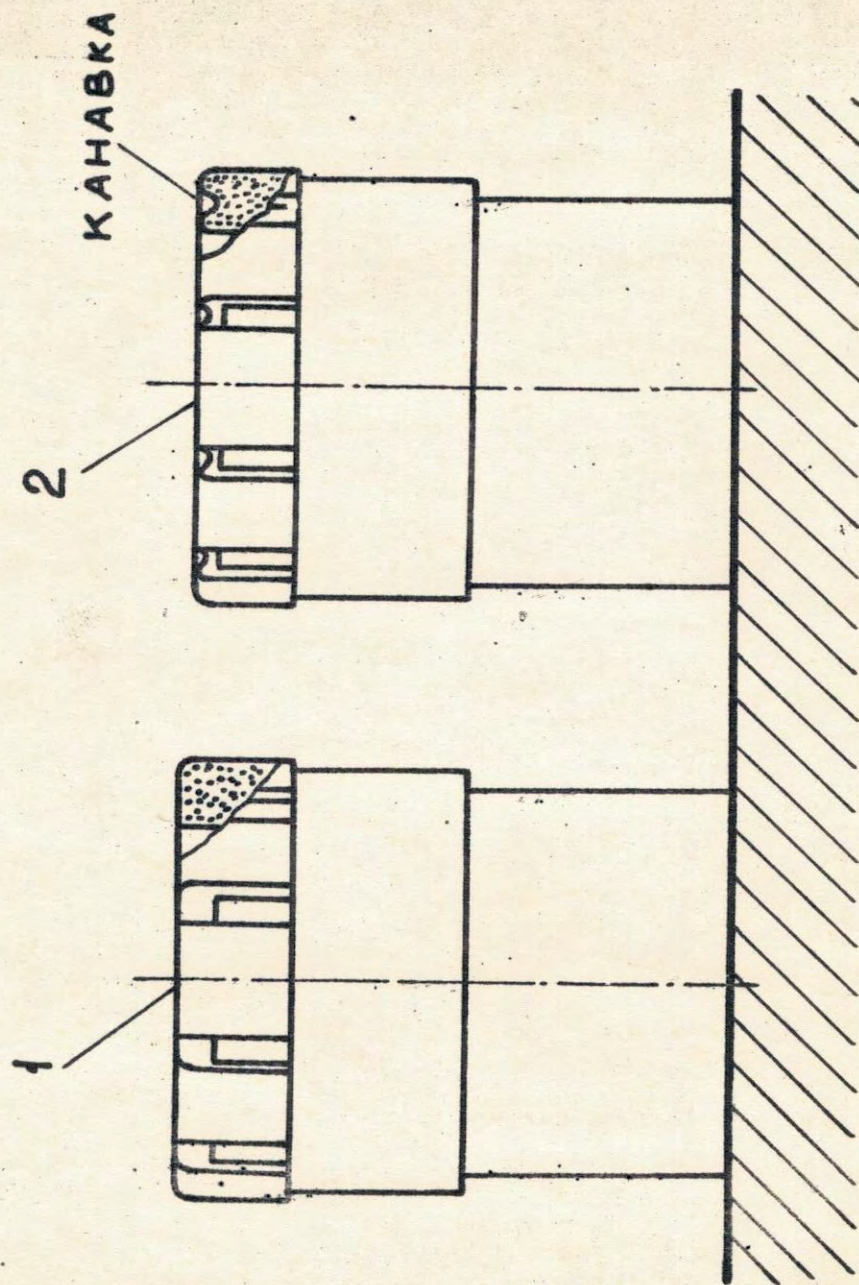


Рис. 4.19. Состояние коронки типа БС после бурения:

на режиме с энергией $W_A = 41$ усл.ед. (1) и на режиме с энергией $W_A = 293$ усл.ед. (2)

Выводы по главе 4

В результате экспериментальных исследований акустического поля, возникающего при бурении, сделаны следующие основные выводы:

Каждый тип алмазной коронки при бурении создает акустическое поле определенного спектрального состава, в то же время однотипные коронки имеют близкие акустические спектры. Высокочастотный диапазон 7-20 кГц акустического спектра каждого типа коронки имеет характерное расположение максимумов амплитуды по оси частот и распределение энергии внутри диапазона. Акустический спектр может быть использован в качестве "образа" типа алмазной коронки. Информативные параметры высокочастотного диапазона акустического поля - энергия W_A и частота f_A достаточно полно отражают особенности акустического спектра.

При увеличении прочностных и упругих свойств разбуриваемых горных пород происходит увеличение энергии высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля и смещение энергии в сторону высоких частот внутри диапазона. Зависимость информативных параметров акустического поля энергии W_A и частоты f_A от скорости распространения продольных упругих волн в породе v_p и предела прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$ для пород, имеющих сильные различия в прочностных и упругих свойствах, носит линейный характер.

Регулирование режима бурения приводит к изменению акустического спектра. Частота вращения снаряда и осевая нагрузка неадекватны по характеру воздействия на акустический спектр. Увеличение частоты вращения снаряда приводит к росту энергии акустического поля в диапазоне 7-20 кГц и смещению энергии

гии в сторону низких частот внутри диапазона. Зависимость энергии высокочастотного диапазона акустического поля W_A от частоты вращения снаряда аппроксимируется линейной функцией вида $y = kx + b$. Зависимость информативных параметров акустического поля от осевой нагрузки нелинейна, внутри диапазона регулирования осевой нагрузки возможно появление экстремумов в зависимостях энергии W_A и частоты f_A от осевой нагрузки.

Спектральный состав высокочастотных акустических колебаний непосредственно связан с удельной объемной энергией разрушения. При возрастании частоты f_A удельная объемная энергия разрушения увеличивается.

При постоянной частоте f_A увеличение энергии W_A сопровождается снижением удельной объемной энергии разрушения при изменении типа породоразрушающего инструмента и режима бурения.

Критерием оптимальности процесса разрушения породы является достижение при бурении минимальных значений частоты f_A при повышенных значениях энергии W_A ($W_A \rightarrow \max, f_A \rightarrow \min$).

Ухудшение режущих свойств алмазов сопровождается уменьшением энергии высокочастотного диапазона акустического поля. При бурении импрегнированными алмазными коронками на режимах, обеспечивающих самозатачиваемость коронки, энергия W_A с течением времени не изменяется.

Интенсивность износа импрегнированной алмазной коронки J (величина отношения среднего износа матрицы коронки по высоте к интервалу бурения) и энергия высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля W_A взаимосвязаны. Зависимость интенсивности износа импрегнированной коронки J от энергии W_A является линейной функцией вида $J = k W_A$. Коэффициент

K зависит от типа коронки. Прогнозировать интенсивность износа коронки на различных режимах по значениям энергии W_A можно, проведя тарировочное бурение и установив коэффициент на одном из режимов ($K = J / W_A$).

Бурение при повышенных уровнях энергии W_A может привести к образованию на торце коронки борозд-канавок (развитию аномальных видов износа). Для каждого типа коронки необходимо установить предельный уровень энергии W_A , превышение которого может привести к развитию аномальных видов износа.

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛМАЗНОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

5.1. Использование результатов спектрального анализа акустического поля при испытаниях породоразрушающего инструмента

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что на основе спектрального анализа акустического поля может быть решен ряд задач, возникающих при испытаниях алмазных коронок, таких как:

- оценка эффективности механизма разрушения породы конкретным типом инструмента;
- поиск оптимального режима бурения;
- прогноз интенсивности износа импрегнированных коронок на различных режимах;
- выбор области рационального применения инструмента;
- определение наличия отклонений в конструкции однотипных коронок.

Оценка эффективности механизма разрушения породы и поиск оптимального режима бурения для конкретного типа коронки базируется на экспериментально установленной зависимости удельной объемной энергии разрушения и информативных параметров акустического поля (глава 4, раздел 4). Критерий оптимальности процесса разрушения (обеспечение наименьшей энергоемкости разрушения) был сформулирован в виде $W_A \rightarrow \max, f_A \rightarrow \min$. Алмазная коронка, при бурении которой фиксируется акустическое поле с высокими значениями энергии W_A и низкими значениями

частоты f_A , с точки зрения энергоемкости, обладает более эффективным механизмом разрушения, чем коронка, создающая при бурении акустическое поле с низкой энергией W_A и высокой частотой f_A . Оптимальными режимами бурения для конкретного типа коронки являются режимы, при которых фиксируются наименьшие значения частоты f_A при достаточно высоких уровнях энергии W_A .

Связь энергии высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля W_A и интенсивности износа коронки (глава 4, раздел 5) дает возможность прогнозировать интенсивность износа (ресурс) импрегнированной коронки на различных режимах. Определив по результатам тарировочного бурения коэффициент K ($K = \gamma / W_A$), по формуле:

$$\gamma = K W_A, \text{ мм/м}$$

можно найти интенсивность износа на любом режиме, подставляя в неё значение энергии W_A , измеренное на этом режиме. И затем рассчитать ресурс по формуле (2.3).

Выбор области рационального применения инструмента основан на зависимости информативных параметров акустического поля от типа алмазной коронки, физико-механических свойств пород, удельной объемной энергии разрушения и интенсивности износа коронки (глава 4, разделы 1, 2, 4, 5). С точки зрения энергоемкости, коронки, создающие акустическое поле с высокими значениями энергии W_A и низкими значениями частоты f_A имеют более оптимальный механизм разрушения породы, чем коронки с акустическим полем с низкими значениями энергии W_A и высокими значениями частоты f_A . Однако, увеличение энергии W_A сопровождается ростом интенсивности износа коронки, вплоть до развития аномальных видов износа. При исследовании зависимости акустического поля от физико-механических свойств горных

пород было установлено, что увеличение прочностных свойств пород приводит к росту энергии W_A . Из этого следует, что коронки, обладающие при бурении высокой энергией W_A при бурении прочных горных пород будут подвергаться большему риску повышенного износа, чем коронки, создающие акустическое поле с низкой энергией W_A . Однако, как следует из формулы (3.12) при снижении амплитуды колебаний для увеличения интенсивности разрушения необходимо возрастание частоты колебаний. Поэтому, в целом, коронки, имеющие высокую энергию W_A и низкую частоту γ_A должны применяться в менее крепких породах, чем коронки с низкими значениями W_A и высокими значениями частоты γ_A . При отсутствии в настоящее время классификации буримости горных пород по акустическим спектральным характеристикам, определение области рационального применения новых типов алмазных коронок следует производить на основе прямого сравнения акустических спектров нового типа коронки и коронки с уже известной областью применения.

Определение наличия отклонений в конструкции однотипных коронок базируется на установленной идентичности акустических спектров однотипных коронок (глава 4, раздел I). Незнученность зависимости параметров акустического поля от отдельных конструктивных особенностей инструмента позволяет определять только наличие или отсутствие отклонений. При наличии банка опорных акустических спектров различных типов коронок проведение испытаний по проверке качества серийно выпускаемой продукции будет сводиться к сравнению акустического спектра изготовленной коронки с опорным акустическим спектром.

5.2. Основные положения метода

Метод может применяться при разработке и серийном выпуске

алмазного породоразрушающего инструмента.

Объектом испытаний являются макеты, экспериментальные образцы, опытные образцы и образцы серийно-выпускаемого алмазного породоразрушающего инструмента.

Основными проверяемыми показателями качества инструмента является спектральный состав акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц и ресурс.

Целью испытаний является получение объективной информации о работоспособности инструмента. Задачами испытаний является:

- оценка эффективности механизма разрушения породы;
- определение оптимальных режимов бурения;
- прогноз интенсивности износа импрегнированной алмазной коронки на различных режимах;
- определение области рационального применения инструмента;
- оценка работоспособности опытных образцов инструмента по сравнению с лучшими образцами серийной продукции;
- проверка качества серийно выпускаемой продукции.

Бурение осуществляется в монолитах пород с физико-механическими свойствами близкими к свойствам пород предполагаемой области применения инструмента.

Акустические шумы от вибраций механизмов стенда в месте расположения датчика для измерения акустического поля, возникающего при разрушении горной породы, не должны по частоте превышать 7 кГц.

При бурении осуществляется запись на магнитную ленту и последующий спектральный анализ акустических сигналов, возникающих при разрушении горной породы.

Аппаратура должна обеспечивать измерение и анализ акусти-

ческих колебаний в диапазоне частот 0-20 кГц.

По акустическим спектрам вычисляются информативные параметры высокочастотного диапазона 7-20 кГц акустического поля — энергия W_A и частота f_A . Энергия W_A определяется как площадь, ограниченная кривой спектра в диапазоне частот 7 — 20 кГц. Частота f_A является частотой, разделяющей диапазон 7-20 кГц на две части с равными энергиями.

При испытаниях ведется журнал наблюдений, где фиксируется дата, смена, условия приема акустических колебаний, состав аппаратуры для измерения акустического поля, режимы и интервалы бурения, номер магнитной записи и краткая характеристика выполняемой операции.

Сравнительные испытания различных типов инструмента

Испытания проводятся для определения работоспособности макетов, экспериментальных образцов, опытных образцов коронок по сравнению с лучшими образцами серийной продукции.

В качестве базы сравнения при проведении испытаний должен приниматься серийно выпускаемый инструмент, указанный в ТЗ и принятый за базу сравнения в карте технического уровня и качества продукции.

Области оптимальных режимов бурения для каждого типа породоразрушающего инструмента определяются путем перебора сочетаний параметров режима бурения. Оптимальными режимами бурения являются режимы, при которых фиксируется акустическое поле с наименьшими значениями частоты f_A при достаточно высоких значениях энергии W_A .

Диапазон изменения параметров режима бурения выбирается исходя из предельно допустимых режимов, применяемых в производственных условиях.

Шаг изменения параметров режима бурения выбирается исходя

из требуемой точности выделения области оптимальных режимов бурения.

Прогноз интенсивности износа (ресурса) импрегнированной коронки на различных режимах осуществляется по формуле $J = K W_A$ (J - прогнозируемая интенсивность износа, W_A - значение энергии W_A , зафиксированное на этом режиме). Коэффициент K для конкретного типа инструмента определяется тарифовочным бурением на постоянном режиме.

Область рационального применения опытного образца инструмента определяется в результате сравнения акустических спектров опытного и базового образцов инструмента. Инструмент, создающий акустическое поле с высоким значением частоты f_A и низким значением энергии W_A должен применяться в более крепких породах, чем инструмент с низкими значениями частоты f_A и высокими значениями энергии W_A .

Испытания по проверке качества серийно выпускаемого инструмента

Испытания проводятся для проверки качества серийно выпускаемого инструмента.

Объектом испытаний являются партии серийно выпускаемого инструмента. Количество коронок в партии выбирается на основе статистических данных.

Бурение каждой коронкой осуществляется на постоянном режиме интервала 0,1 - 0,5 м.

Критерием качества изготовления партии коронок является минимум отклонений в акустических спектрах.

5.3. Сравнительные испытания коронок типа ИС и 02ИЗ

Целью испытаний являлась оценка работоспособности экспериментального образца коронки типа ИС по сравнению с серийно выпускаемой коронкой типа 02ИЗ. В табл.16 приведены конструктивные параметры коронок типа ИС и 02ИЗ.

Испытания проводились на базе отдела научно-экспериментальных исследований ВИТР (пос.Стекланный) на стенде, оснащённом станком СКБ-4 и киловаттметром Н-395.

Для измерения акустического поля использовалась аппаратура в составе: акустического датчика, магнитографа Н067, осциллографа С1-64 и источника питания постоянного тока Б5-7. Для спектрального анализа акустических сигналов применялась система, состоящая из анализатора спектра СК4-56, соединённого с двухкоординатным самописцем Н307/2.

Бурение осуществлялось в блоке серого гранита IX категории по буримости.

Для определения области оптимальных режимов бурения коронок типа ИС и коронки типа 02ИЗ при бурении каждым типом коронки производилось регулирование режимных параметров с записью на каждом режиме акустического сигнала. Всего было использовано 20 режимов бурения. Осевая нагрузка P изменялась в диапазоне от 500 до 1500 даН с шагом 250 даН, частота вращения равнялась 390, 640, 710 и 1100 мин⁻¹. Расход промывочной жидкости не изменялся и был равен 20 дм³/мин.

После спектрального анализа акустических сигналов, на каждом режиме были получены значения информативных параметров акустического поля - энергии W_A и частоты f_A . Значения энергии W_A и частоты f_A при бурении коронками типа ИС и 02ИЗ на различных режимах приведены в табл. 17. На основе данных табл.17 предваритель-

Таблица 16

Конструктивные параметры алмазных коронок типа ИС и 02ИЗ

диаметром 59 мм

Тип коронки	Число прямых каналов	Качество алмазов		Размер алмазов, мкм		Масса алмазов, карат		
		объем.	подр.	объем.	подр.	объем.	подр.	всего
ИС	10	АС-125	АРС-3	250/200	1600/1250	-	-	-
02ИЗ	4	XV гр "а"	XV гр "а"	800/700	1600/1500	8,80	2,16	10,96

Таблица 17

Информативные параметры акустического поля
при бурении коронками типа ИС и 02ИЗ на различных
режимах

$\frac{n}{\text{мин}^{-1}}$ / $\frac{P}{\text{дн}}$	02ИЗ					ИС				
	500	750	1000	1250	1500	500	750	1000	1250	1500
1. Энергия W_A										
390	10	15	13	18	24	40	50	23	16	22
640	27	44	30	26	16	11	23	31	39	41
710	8	13	22	19	11	22	26	29	31	29
1100	205	187	244	191	164	36	60	68	97	103
2. Частота f_A										
390	10,4	9,9	9,6	9,4	10,8	10,4	10,3	10,0	11,2	10,5
640	9,8	9,6	9,0	9,2	8,6	10,2	10,1	9,8	8,9	9,2
710	8,6	8,7	8,8	8,8	8,9	13,0	10,5	10,2	9,4	9,5
1100	10,2	10,8	10,5	11,8	10,4	10,0	9,6	9,8	9,8	9,6

но были определены области оптимальных режимов бурения для коронок типа ИС и 02ИЗ. Область оптимальных режимов бурения для коронки типа ИС находится в пределах по частоте вращения $1000 \pm 100 \text{ мин}^{-1}$, осевой нагрузки $P = 750-1000 \text{ даН}$, для коронки типа 02ИЗ: по частоте вращения $n = 800 \pm 100 \text{ мин}^{-1}$, по осевой нагрузке $P = 1000-1500 \text{ даН}$. Именно на этих режимах при достаточно высоких величинах энергии W_A наблюдаются минимальные значения частоты f_A .

Для прогноза ресурса коронок на различных режимах было произведено тарировочное бурение, по результатам которого определено соответствие интенсивности износа коронки J и энергии W_A и вычислен коэффициент K ($K = J / W_A$, мм/усл.ед.). Тарировочное бурение для каждого типа коронки производилось на найденном оптимальном режиме. Для коронки типа ИС тарировочный режим равнялся $P = 1500 \text{ даН}$, $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 20 \text{ дм}^3/\text{мин}$, для коронки типа 02ИЗ - $P = 1000 \text{ даН}$, $n = 710 \text{ мин}^{-1}$,

$Q = 20 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Обоиими типами коронок на этих режимах было пробурено по два метра (по 5 рейсов длиной 0,4 м). Интенсивность износа коронки на тарировочном режиме определялась как среднее по 5 рейсам. У коронки типа ИС интенсивность износа на тарировочном режиме составила $J = 0,73 \text{ мм/м}$ и коэффициент $K = 7,08 \cdot 10^{-3} \text{ мм/усл.ед.}$, а у коронки типа 02ИЗ $J = 0,05 \text{ мм/м}$ и коэффициент $K = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ мм/усл.ед.}$. Коэффициент K у коронки типа ИС оказался значительно выше, чем у коронки типа 02ИЗ, что указывает на меньшую износостойкость матричной композиции коронки типа ИС.

Ресурс коронки типа ИС на тарировочном режиме (при $J = 0,73 \text{ мм/м}$ и высоте матрицы 4 мм) составил 5,5 м. Такое значение ресурса было признано неудовлетворительным. Так как тарировочный режим был выбран из предварительно определенной

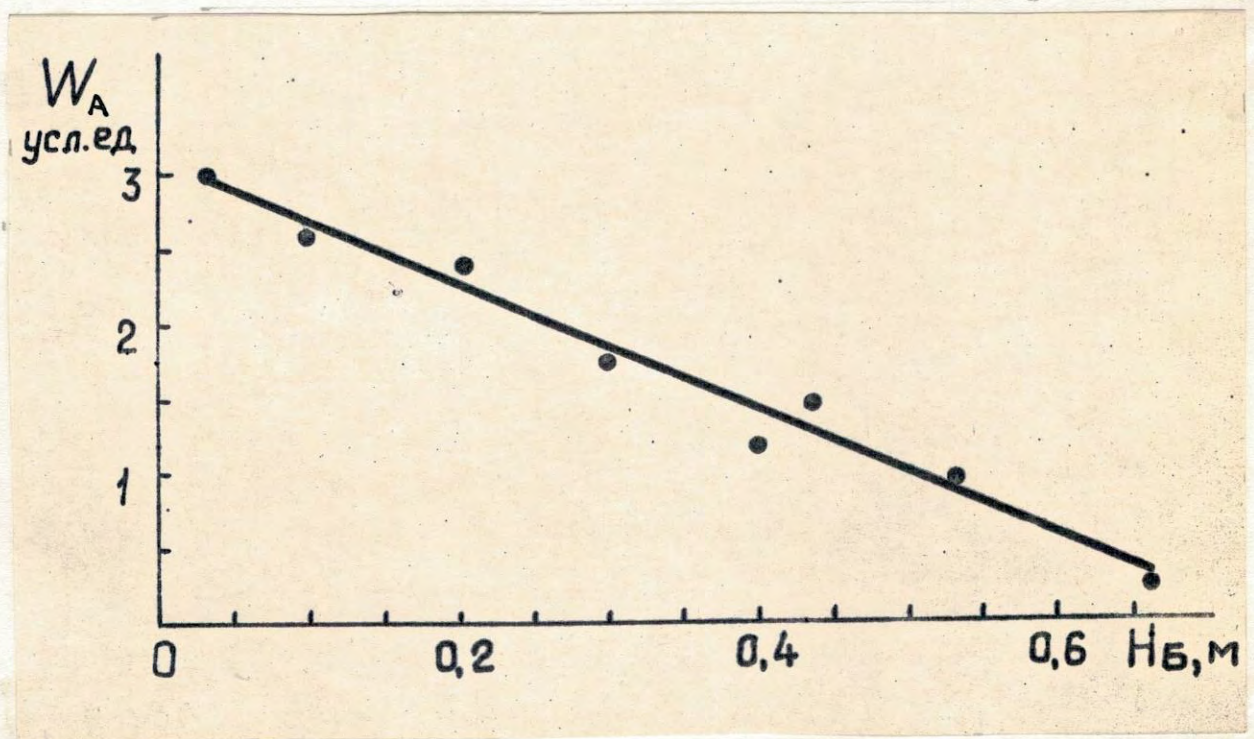


Рис.5.1. Зависимость энергии W_A от глубины скважины H_B при бурении коронкой типа ИС на режиме $P=1000 \text{ даН}$, $n=710 \text{ мин}^{-1}$, $Q=20 \text{ дм}^3/\text{мин}$

области оптимальных режимов бурения, было принято решение сузить область оптимальных режимов бурения за счет уменьшения осевой нагрузки. Используя формулу (4.2) по значениям энергии W_A (табл. I7) была рассчитана прогнозная интенсивность износа J коронки типа ИС на режимах $P=1000$ даН и $P=750$ даН ($n = 1100 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 20 \text{ дм}^3/\text{мин}$). При $P=1000$ даН прогнозная интенсивность износа равняется $J = 7,08 \cdot 10^{-3} \times 68 = 0,48 \text{ мм/м}$ и прогнозный ресурс составляет 8,3 м., при $P=750$ даН - $J = 7,08 \cdot 10^{-3} \times 60 = 0,42 \text{ мм/м}$ и прогнозный ресурс 9,5 м. Дальнейшее снижение осевой нагрузки и частоты вращения нецелесообразно из-за риска появления эффекта заполирования. Так, бурение коронкой типа ИС на режиме $P=1000$ даН, $n = 710 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 20 \text{ дм}^3/\text{мин}$ вызвало заполирование алмазов. Это было прослежено по уменьшению энергии W_A при бурении коронкой типа ИС на этом режиме (рис.5.1). Это подтвердило вывод о том, что данный режим для коронки типа ИС не является оптимальным. Таким образом, оптимальными режимами бурения для коронки типа ИС являются режимы при $n = 1000 \pm 100 \text{ мин}^{-1}$, $P=800-1000$ даН. В области оптимальных режимов прогнозный ресурс коронки типа ИС составит 9 м.

Для определения области рационального применения коронки типа ИС было произведено сравнение акустических спектров зафиксированных при бурении коронкой типа ИС и коронкой типа 02ИЗ с известной областью применения. Акустические спектры при бурении коронками типа ИС и 02ИЗ приведены на рис.5.2. Из рис.5.2 видно, что коронка типа ИС имеет в акустическом спектре меньшую энергию в диапазоне 7-20 кГц, чем коронка типа 02ИЗ, однако у коронки типа ИС основная энергия в этом диапазоне смещена в область высоких частот. При бурении на постоянном режиме $P = 1500$ даН, $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$, $Q = 20 \text{ дм}^3/\text{мин}$ у коронки типа ИС энергия $W_A = 69 \text{ усл.ед.}$, и частота $f_A = 12,3 \text{ кГц}$, а у ко-

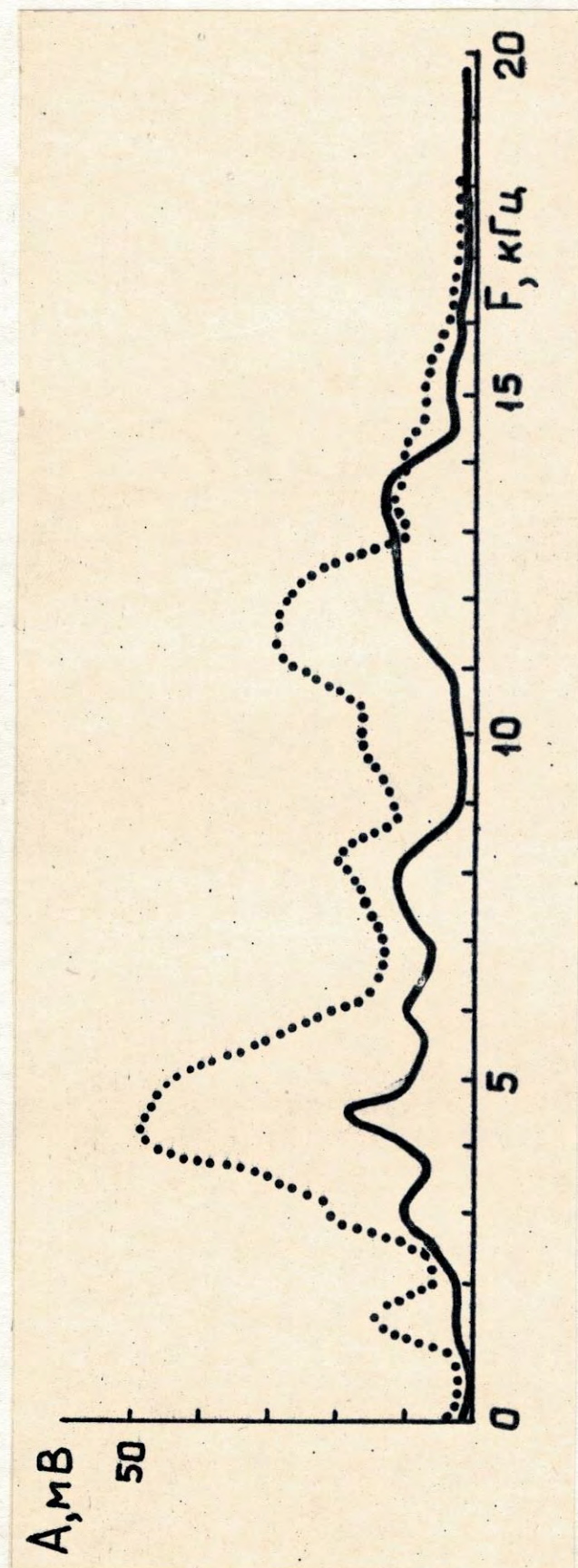


Рис. 5.2. Акустические спектры при бурении коронками типа ИС и ОЗИЗ серого гранита при $P = 1500$ даН, $n = 1100$ мин⁻¹, $Q = 20$ дм³/мин.:

ронки типа 02ИЗ - $W_A = 145$ усл.ед. и $f_A = 10,4$ кГц. Так как у коронки типа ИС энергия W_A меньше, чем у коронки типа 02ИЗ, а частота f_A , наоборот, выше, то на основе сформулированных в разделе 5.1 принципов определения области рационального применения коронок, коронка типа ИС должна применяться в более крепких породах, чем коронка типа 02ИЗ. Учитывая, что серийно выпускаемая коронка типа 02ИЗ применяется в породах IX - XII категории по буримости, рациональной областью применения коронки типа ИС будут породы X-XII категории по буримости.

Результаты сравнительных испытаний коронок типа ИС и 02ИЗ представлены в табл. 18. Из табл.18 следует, что коронка типа 02ИЗ по всем показателям превосходит коронку типа ИС. У коронки типа 02ИЗ более эффективный механизм разрушения, большая механическая скорость и больший ресурс, чем у коронки типа ИС. А область применения у обеих коронок примерно одинаковая. Но следует учитывать, что коронка типа ИС армирована более дешевыми синтетическими алмазами. Поэтому окончательное решение о перспективности коронки типа ИС можно принять только с учетом стоимости ее изготовления.

Таблица 18

Результаты испытаний коронок типа ИС и 02ИЗ

	ИС	02ИЗ
1. Область оптимальных режимов бурения: осевая нагрузка P , даН частота вращения n , мин ⁻¹	800-1000 900-1100	1000-1500 700-900
2. Информативные параметры акустического поля при бурении на оптимальных режимах: энергия W_A , усл.ед. частота f_A , кГц	68 9,8	21 8,8
3. Прогнозный ресурс в области оптимальных режимов, м	9	80
4. Механическая скорость бурения на оптимальных режимах (средняя), м/ч	5	6
5. Рациональные области применения коронок (категории по буримости)	IX-XII	IX-XII

5.4. Проверка качества изготовления партии серийно выпускаемой коронки типа 02ИЗ

Целью испытаний являлась оценка качества изготовления партии серийно выпускаемых коронок типа 02ИЗ диаметром 59 мм. Партия состояла из 8 коронок. Конструктивные параметры коронок представлены в табл. 19.

Испытания проводились на базе отдела научно-экспериментальных исследований ВИТР (пос.Стекланный) на стенде, оснащенном станком СКБ-4. Для измерения и анализа акустического поля применялась аппаратура, аналогичная описанной в разделе 5.3.

Качество изготовления партии коронок типа 02ИЗ оценивалось по результатам бурения монолита серого гранита (IX категории по буримости) всеми коронками на постоянном режиме $P = 1000$ даН, $n = 400$ мин⁻¹, $Q = 20$ дм³/мин. Акустические спектры коронок типа 02ИЗ, зафиксированные при бурении серого гранита представлены на рис.5.3. Из рис.5.3 видно, что коронки имеют близкие акустические спектры. Однако, вычисленные информативные параметры акустического поля (энергия W_A и частота f_A) характеризуются разбросом (табл.20).

Таблица 20

Информативные параметры акустического поля при бурении коронками типа 02ИЗ

	Коронки типа 02ИЗ							
	17897	17896	17898	17890	17895	17891	17892	17893
W_A	12,4	12,9	10,6	11,4	11,5	11,2	7,8	6,2
f_A	11,3	10,9	11,1	10,8	10,6	11,8	11,9	11,3

Таблица 19
Конструктивные параметры алмазных коронок типа 02ИЗ диаметром 59 мм

Тип коронки	Число промыв. каналов	Качество алмазов		Размер алмазов, мм		Масса алмазов, карат	
		объем.	подр.	объем.	подр.	объем.	подр.
02ИЗ № 17897	4	ХУгр"а"	ХУгр"а"	800/700	1600/1500	8,80	2,13
02ИЗ № 17896							2,05
02ИЗ № 17898							2,08
02ИЗ № 17890							2,06
02ИЗ № 17895							2,11
02ИЗ № 17891							2,16
02ИЗ № 17892							2,16
02ИЗ № 17893							2,16
							10,93
							10,85
							10,88
							10,86
							10,91
							10,96
							10,96
							10,96

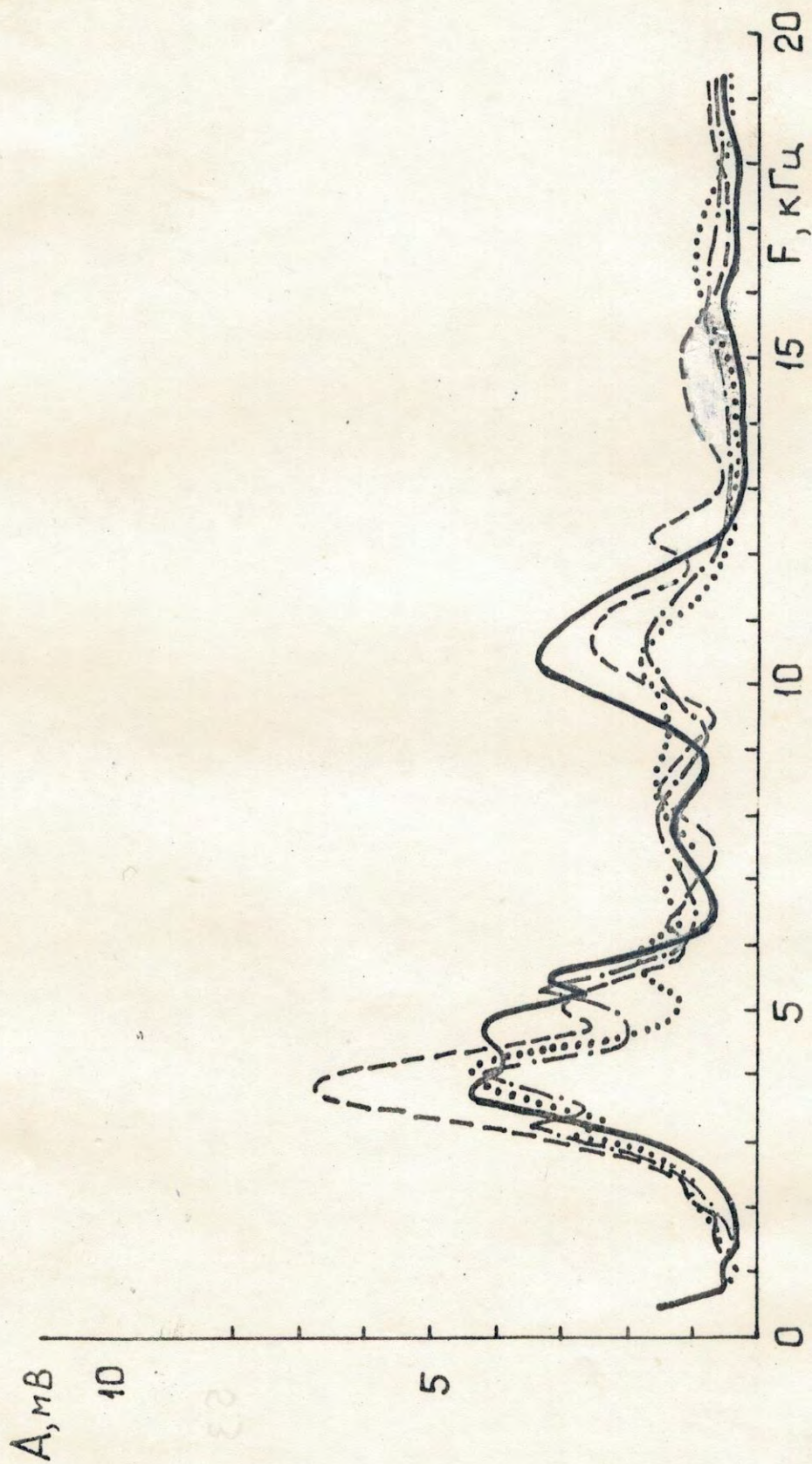


Рис.5.3. Акустические спектры при бурении коронками типа 02ИЗ
— коронка № 17897, — коронка № 17890, — коронка № 17898,
— коронка № 17893

Для оценки отклонений между коронками была рассчитана дисперсия параметров акустического поля по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X_{\text{ср}})^2}{n-1}$$

где: X_i - наблюдаемое значение параметра, $X_{\text{ср}}$ - среднее значение параметра, n - число измерений.

Величина дисперсии для энергии W_A составляет 5,35, а для частоты f_A - 0,23. Величины дисперсии информативных параметров акустического поля у коронок типа 02ИЗ оказались достаточно высокими, что указывает на наличие отклонений в конструкциях коронок и несовершенство технологии их изготовления.

Выводы по главе 5.

По результатам практического использования метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля сделаны следующие выводы:

Метод пригоден для сравнительной оценки работоспособности образцов алмазного породоразрушающего инструмента и проверки качества серийно-выпускаемой продукции.

Метод позволяет для конкретного типа породоразрушающего инструмента оценивать механизм разрушения породы, определять область оптимальных режимов бурения, прогнозировать ресурс на различных режимах (для импрегнированной коронки), контролировать состояние при бурении и рекомендовать рациональные области применения.

Метод дает возможность выявлять отклонения в серийно-выпускаемой продукции.

Перспективным направлением исследований является использование метода для выработки рекомендаций по совершенствованию конструкций породоразрушающего инструмента.

ГЛАВА 6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛМАЗНОГО ПО- РОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

6.1. Техничко-экономические преимущества метода

Существующие методы испытаний алмазного породоразрушающего инструмента ориентируются на проведение испытаний в производственных условиях /40/. Эти методы требуют большого количества инструмента для получения объективных результатов, сопряжены с большой трудоемкостью, растянуты во времени и поэтому имеют высокую стоимость. На основе статистических данных ВИТР, за период 1986-1989гг., продолжительность производства типовых испытаний породоразрушающего инструмента составляет 7 месяцев, средние затраты на производство испытаний - 16 тысяч рублей /45/. Кроме этого, используемые при производственных испытаниях показатели или критерии качества инструмента не позволяют определить сущность забойных процессов. Из-за этого совершенствование конструкции породоразрушающего инструмента проводится на основе субъективных представлений разработчика о забойных процессах, что не всегда приводит к правильным решениям.

Техничко-экономические преимущества метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля базируются на возможности проводить испытания в стендовых условиях, использовать для испытаний меньшее количество инструмента, что позволит сократить время и значительно снизить затраты на производство испытаний. Кроме этого, новый метод позволит создавать более

качественный породоразрушающий инструмент за счет получения о объективных представлений о его работе на забое скважины.

6.2. Экономический эффект от использования метода

Общие сведения

Метод ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля предназначен для получения объективной информации о работоспособности разрабатываемого и серийно-выпускаемого инструмента.

Разработка метода осуществлялась в виде этапов "Разработать предложения по созданию технических средств и методов ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента" (дог.203 ВИТРа с МинГео СССР "Разработать акустическую аппаратуру для исследования геологического разреза в процессе бурения") и "Разработать метод ускоренных стендовых испытаний буровых коронок" (дог.734 ВИТРа с Всесоюзным научно-исследовательским институтом синтетического минерального сырья "Исследование и разработка конструкции и технологии изготовления породоразрушающего инструмента, оснащенного синтетическими монокристаллами повышенной прочности"). Фактические сроки и затраты в ценах 1991г. при создании метода приведены в табл.21.

Таблица 21

Наименование этапов	Сроки	Затраты (тыс.руб)
1. Разработать предложения по созданию технических средств и методов ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента	01.90 12.90	30,0
2. Разработать метод ускоренных стендовых испытаний буровых коронок	06.91 06.92	20,0

Варианты сравнения

За базу сравнения принята методика приемочных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента (ОСТ 41-13-266-86).

Расчет выполнен в соответствии с "Инструкцией по оценке экономической эффективности создания и использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в геолого-разведочном бурении на твердые полезные ископаемые" Мингео СССР", ВПО "Союзгеотехника", Л., 1984.

Производительность

Затраты на проведение ускоренных стендовых испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрально-го анализа акустического поля, исходя из опыта работ, составляет 8 бригадосмен, из них:

на подготовку стенда к акустическим измерениям	I бриг.-см.
проведение испытаний	3 бриг.-см.
обработку результатов измерений	4 бриг.-см.

Годовой объем работ

Рабочая смена составляет 6 часов, количество рабочих дней в месяце - 25,4, количество рабочих месяцев в году - 11,1.

Годовой объем работ составляет:

$$Q = \frac{25,4 \times 11,1}{8} = 33 \text{ испытания в год}$$

Себестоимость работ

Ниже приведены трудозатраты на проведение одного испытания типа инструмента (в ценах 1991г.)

1. Подготовка стенда к проведению испытаний	I бриг.-см.
2. Проведение испытаний	3 бриг.-см.

3. Обработка результатов измерений

4 бриг.-см.

Стоимость одной бригады-смены составляет 48 рублей.

Стоимость изготовления породоразрушающего инструмента для испытаний - 150 рублей.

Себестоимость проведения испытаний составляет:

$$C = 48 \times 8 + 150 = 534 \text{ рубля}$$

Капитальные вложения

Основное оборудование, используемое при проведении ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля приведено в таблице 22.

Таблица 22

Наименование	Стоимость, руб.	Обоснование стоимости
1. Датчик акустический	500	Фактические затраты
2. Анализатор спектра СК4-56	1500	Прейскурант № 17-05 оптовая цена на приборы электрические М., 1980
3. Самописец двухкоординатный Н307/2	1500	"_"
4. Осциллограф СИ-64	1000	"_"

И Т О Г О

4500 рублей

Удельные капиталовложения при использовании метода ускоренных испытаний составляют:

$$K = \frac{4500}{33} = 140 \text{ рублей}$$

Затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) при создании метода ускоренных испытаний составили:

1990г. - этап "Разработать предложения по созданию технических средств и методов ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента" (договор 203) 30 тыс.руб.

1991-1992г. - этап "Разработать метод ускоренных стеновых испытаний буровых коронок" (дог.734) 20 тыс.руб.

ИТОГО : 50,0 тысяч рублей

С учетом затрат на НИОКР удельные капиталовложения на проведение одного испытания составят:

$$\frac{4500 + 50000}{33} = 1650 \text{ рублей/исп.}$$

Экономический эффект

Средняя стоимость проведения испытания традиционным методом в производственных условиях составляет 16000 руб. / 45 /. При проведении 33 испытаний в производственных условиях затраты составят:

$$З_1 = 16000 \times 33 = 528000 \text{ руб.}$$

При проведении испытаний методом ускоренных испытаний на основе спектрального анализа акустического поля затраты в год составят:

$$З_2 = 1650 \text{ руб/исп.} \quad 33 \text{ исп.} = 54500 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект на один комплект аппаратуры для ускоренных испытаний при заданном объеме работ (33 испытания) составит:

$$Э = З_1 - З_2 = 528000 - 54500 = 473500 \text{ рублей}$$

Выводы по главе 6

Проведенные расчеты экономической эффективности метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля показали его значительные преимущества перед существующими методами испытаний инструмента в производственных условиях. Необходимо отметить, что в связи с резким удорожанием алмазного сырья возрастают требования к качеству алмазного породоразрушающего инструмента. Метод ускоренных испытаний позволяет получать объективную информацию о работе породоразрушающего инструмента на забое скважины. На основе такой информации возможно правильно определять направления совершенствования его конструкции. Это делает применение метода ускоренных испытаний на основе спектрального анализа акустического поля еще более выгодным.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы с рекомендациями по направлению дальнейших работ:

1. Акустическое поле, возникающее при взаимодействии породоразрушающего инструмента с забоем, является важным источником информации о процессах разрушения горной породы и изнашивания инструмента.
2. Спектральный анализ акустического поля позволяет выделить акустические колебания в диапазоне частот 7-20 кГц, непосредственно связанные с разрушением горной породы.
3. Наиболее вероятными источниками акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц при бурении являются процесс взаимодействия резцов инструмента с забоем и процесс трещинообразования, протекающий в горной породе при ее разрушении.
4. Информативными параметрами акустического поля для объективного контроля процессов разрушения горной породы и изнашивания породоразрушающего инструмента являются параметры диапазона 7-20 кГц: энергия W_A и частота, разделяющая диапазон на две части с равными энергиями f_A . Эти параметры характеризуют амплитудно-частотные свойства диапазона.
5. Каждый тип алмазной коронки при бурении создает акустическое поле определенного спектрального состава, в то же время однотипные коронки имеют идентичные акустические спектры. Акустический спектр может быть использован в качестве "образа" типа алмазной коронки.
6. При увеличении прочностных и упругих свойств разбуриваемых горных пород происходит увеличение энергии диапазона 7-20 кГц и смещение энергии в сторону высоких частот внутри

диапазона. Установлена линейная положительная связь информативных параметров акустического поля (энергии W_A и частоты f_A) с пределом прочности породы на сжатие $\sigma_{сж}$ и скоростью распространения продольных упругих волн в породе U_p .

7. Регулирование режима бурения приводит к изменению акустического спектра. Частота вращения снаряда и осевая нагрузка неадекватны по характеру воздействия на акустический спектр. Увеличение частоты вращения приводит к росту энергии диапазона 7-20 кГц акустического поля и смещению энергии в сторону низких частот внутри диапазона. Зависимость информативных параметров акустического поля от осевой нагрузки нелинейна, внутри диапазона регулирования осевой нагрузки возможно появление экстремумов в зависимостях энергии W_A и частоты f_A от осевой нагрузки.

8. Спектральный состав акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц связан с удельной объемной энергией разрушения W_B . При возрастании частоты f_A удельная объемная энергия разрушения увеличивается. Увеличение энергии W_A сопровождается снижением удельной объемной энергии разрушения при постоянной частоте f_A .

9. Критерием оптимальности процесса разрушения породы, с точки зрения обеспечения минимальных затрат на разрушение, является достижение при бурении регулированием режима бурения или подбором типа породоразрушающего инструмента минимальных значений частоты f_A при повышенных значениях энергии W_A ($f_A \rightarrow \min$, $W_A \rightarrow \max$).

10. Интенсивность износа импрегнированной коронки и энергия диапазона 7-20 кГц взаимосвязаны. Зависимость интенсивности износа от энергии W_A является линейной функцией вида $J = K W_A$. Коэффициент K зависит от типа корон-

ки. На основе значений энергии W_A можно прогнозировать интенсивность износа импрегнированной коронки на различных режимах (ресурс), проведя предварительно тарифовочное бурение и установив коэффициент K по значениям W_A и J на одном из режимов.

II. Ухудшение режущих свойств алмазов при бурении сопровождается уменьшением энергии W_A . По динамике изменения энергии W_A можно контролировать состояние коронки в процессе бурения.

I2. Разработанный метод ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля предназначен для оценки работоспособности макетов, экспериментальных и опытных образцов инструмента по сравнению с лучшими образцами серийной продукции и проверки качества серийно-выпускаемой продукции.

I3. Метод позволяет для конкретного типа породоразрушающего инструмента оценивать механизм разрушения, определять область оптимальных режимов бурения, прогнозировать ресурс на различных режимах (для импрегнированной коронки), контролировать состояние инструмента при бурении и рекомендовать рациональные области применения.

I4. Перспективными направлениями исследований акустического поля являются:

- создание шкалы буримости горных пород для подбора соответствующего породоразрушающего инструмента;

- разработка технических средств для управления процессом бурения по параметрам акустического поля на реальных буровых установках;

- выработка рекомендаций по совершенствованию конструкций породоразрушающего инструмента;

- установление физической сущности явления разрушения породы и изнашивания инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев С.А., Ивашев В.К., Рудакова Н.П. Исследование свойств разбуриваемых горных пород с помощью акустических датчиков. - В сб.: Повышение эффективности и информативности технологии алмазного бурения скважин малого диаметра на твердые полезные ископаемые. Л., ВИТР, 1989, с.68-75.
2. Александров А.С., Головин О.С., Горбаченков В.А. Исследование эффективности применения новых типов алмазного породоразрушающего инструмента на месторождениях Северо-Востока. - В.сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1980, №133, с.68-71.
3. Алиев М.Б., Гасанова Т.Н., Рукавицын В.Н. О сейсмоакустических исследованиях скважин в процессе бурения. - "Азерб. нефт.хозяйство", 1985, № 1, с.7-9.
4. Андреев С.Е. Законы дробления. - Горный журнал, 1952, № 7, с.36-38.
5. База данных АИПС ПД. ВНИИПИ, НПО "ПОИСК", М.
6. Беляков В.И., Блинов Г.А., Иванов О.В. и др. Исследование упругих колебаний породоразрушающего инструмента. - В сб.: Методика и техника разведки", Л., ОНТИ ВИТР, 1974, № 90, с.15-25.
7. Беляков В.И., Блинов Г.А., Иванов О.В. и др. Способ определения свойств горных пород в процессе бурения скважин. А.с. № 608915 /СССР/ Оpubл. в Б.И., 1978, № 20.
8. Блинов Г.А., Васильев В.И., Глазов М.Г. и др. Алмазосберегающая технология бурения. - Л.: Недра, 1989.
9. Богданов Р.К., Фадеев В.Ф. Опыт применения породоразрушающего инструмента из синтетических алмазов и разноизносо-

стойких композитов /Передов.науч.-произв.опыт, рекомендуемый для внедрения в геологоразвед.отрасли: Науч.-техн.информ.сб. /ВНИИ экон.минер.сырья и геол.развед.работ (ВИЭМС).-М.,1989.- Вып.17.-с.47-50.

10. Борц-Компониец В.И., Попов В.Н., Криворучко В.И. Исследование параметров при разрушении горных пород в лабораторных и шахтных условиях. - Изв.вузов. Геология и разведка, 1983, № 12, с.92-96.

11. Васильев В.И. Применение энергетических показателей при автоматизации процесса бурения. - В.сб.:Разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения. Л., ВИТР, 1988, с.29-34.

12. Вильчинская Н.А., Николаевский В.Н. Акустическая эмиссия и спектр сейсмических сигналов. - Изв.Академии наук СССР, Физика земли, 1984, № 5, М., Наука, с.91-99.

13. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М., Машиностроение, 1987.

14. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. М., Изд-во стандартов, 1976.

15. Гуреев И.Л. К вопросу о возможности регистрации на устье скважины вибраций долота на забое: Нефтяное хозяйство, 1972, № 11.

16. Гуреев И.Л., Копылов В.Е., Стрекачинский Б.А. и др. Исследование частотного спектра акустических колебаний бурильной колонны в процессе бурения. - Труды Тюменского индустр. института, вып.13, Тюмень, 1972.

17. Гуреев И.Л. Исследование упругих волн в наземной части буровой колонны. - В кн.: Проблемы нефти и газа Тюмени., Вып.16, Тюмень, 1973, с.53-57.

18. Гуреев И.Л., Копылов В.Е. Прибор-индикатор скорости вращения долота ИВД - I. - "Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности", 1973, с.23-27.

19. Гуреев И.Л., Копылов В.Е. К вопросу о телеконтроле скорости вращения долота по частотному спектру упругих колебаний в системе долото-деформируемый забой. - "Изв.вузов. Нефть и газ", 1974, № 4, с.33-38.

20. Гуреев И.Л., Копылов В.Е. Частотный спектр упругих колебаний долота и некоторые закономерности процесса разрушения горных пород. Труды Тюменского индустр.ин-та, вып.39, 1974.

21. Давыдова Е.А., Дроздов М.Д., Маслюк В.А., Клименко В.Н. О замене вольфрамсодержащих материалов при изготовлении матриц алмазных коронок. - В. сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1979, № 128, с.34-36.

22. Ивакин Б.Н., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Акустический метод исследования скважин. М., Недра, 1978.

23. Исаев М.И., Пономарев П.В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1978.

24. Исонкин А.М., Богданов Р.К. Влияние микрогеометрии рабочей поверхности импрегнированных коронок на показатели их работоспособности /Науч.-технич.достижения и передов.опыт в области геол. и разведки недр: Науч.-технич.информац.сб./ ВНИИ эконом.минер.сырья и геол.-развед.работ (ВИЭМС). М., 1990., Вып.2., с.59-65.

25. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Техника и технология бурения геологоразведочных скважин за рубежом. - М.: Недра, 1989.

26. Каулин В.А., Оношко Ю.А., Сенькин Г.А. Применение коронок, армированных "эльбором-Р" для бурения горных пород 5-7 категории по буримости. - В сб.: Методика и техника разведки, № 92, Л., ОНТИ ВИТР, 1974, с.23-26.

27. Копылов В.Е., Гуреев И.Л., Черемных А.Г. Прибор ИВД-1М для индикации скорости вращения долота по частоте продольных колебаний бурильной колонны. - В кн.: "Новые пути получения технологической информации с забоя скважины при бурении", 1974, с.137-143.

28. Копылов В.Е., Гуреев И.Л. Акустическая система связи с забоем скважины при бурении. М., Недра, 1979.

29. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., Машиностроение, 1977.

30. Крагельский И.В. Трение и износ. - М., Машиностроение, 1968.

31. Кузнецов О.Л., Мигунов Н.И. К определению местоположения забоя скважины по данным наземных геоакустических наблюдений. - В кн.: Геоакустические исследования в скважинах. М., ОНТИ ВНИИЯГТ, 1974, с.46-52. /ВНИИЯГТ. Труды, вып.18/.

32. Кузнецов О.Л., Рукавицын В.Н., Яблоновский Б.И. Определение пространственного положения ствола скважины сейсмоакустическим методом. - "Разведочная геофизика", М., 1978, № 84, с. 56-61.

33. Курочкин П.Н. О динамике работы алмазов в буровых коронках и долотах. - Изв. вузов. Геология и разведка, 1974, № 11. с. 144-151.

34. Лившиц В.Н., Ивженко А.Н., Богданов Р.К. и др. Новый породоразрушающий инструмент для бурения крепких трещиноватых горных пород /Передов. науч.-произв. опыт, рекомендуемый для внедрения в геол.-развед. отрасли: Науч.-технич. информ. сб. / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-разв. работ (ВИЭМС). - М., 1990. - Вып. 1. с. 41-49.

35. Лившиц В.Н., Ивженко А.Н., Богданов Р.К. и др. Новый породоразрушающий инструмент для бурения крепких трещиноватых горных пород /Передов. науч.-произв. опыт, рекомендуемый для внедрения в геол.-развед. отрасли: Науч.-технич. информ. сб. / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ (ВИЭМС). - М., 1989 - Вып. 5, с. 34-44.

36. Лиманов Е.Л., Сыздыков А.Х., Билецкий М.Т. Новые импрегнированные алмазные коронки /Науч.-технич. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр: Науч.-технич. информ. сб. / ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ (ВИЭМС). - М., 1990. - вып. 1, с. 41-49.

37. Лукьянов Э.Е. Исследования скважин в процессе бурения. М., Недра, 1979.

38. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2 т. М., 1983.

39. Мамбетов Р.М., Кагарманов Н.Ф. Разрушение горных пород единым резцом в динамике. - В кн. Тезисы докладов Всесоюз. научно-техн. конф. "Разрушение горных пород при бурении скважин", 4-7 сентября 1973, Уфа.

40. Методическое и техническое обеспечение испытаний нового алмазного породоразрушающего инструмента. - Отчет о НИР по теме ХП Е.Ш.1/002 И15-2/406, т.1, Л,ВИТР, 1986.

41. Методические рекомендации по контрольным испытаниям алмазного породоразрушающего инструмента /Сост.:А.И.Осецкий, Т.И.Солопун, Н.И.Корнилов и др.-Л., ВИТР, 1983.

42. Неразрушающий контроль напряженно деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжений. - Тезисы докладов Всес.науч.-техн. семинара. Хабаровск 1972.

43. Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений. - Тезисы докладов УП Всес.науч.-техн.конференции, Киев, 13-15 мая, 1974 (НТО Прибор пром).

44. ОСТ 41-13-266-86. Инструмент алмазный породоразрушающий. Типовая программа и методика приемочных испытаний.

45. Отчет ВИТР по форме 2НТ за 1986-1989гг., Л., 1989.

46. Пакет прикладных программ "Параметрическая идентификация систем" (ППП ПАРИС). Описание применения /Н.А.Семенов.- Калинин. Центрпрограммсистем, 1985.

47. Пакет прикладных программ "Статистический анализ данных" (ППП САНД). Описание применения /А.Ю.Мазаев, С.Н.Миронова, Е.В.Петров и др. - Калинин, Центрпрограммсистем, 1985.

48. Первые результаты определения координат забоя скважин геоакустическим методом. - "Изв.вузов.Геология и разведка", 1975, №6, с.129-134. Авт.:В.Н.Рукавицын, О.Л.Кузнецов, Я.Ф.Гельфгат и др.

49. Питерский В.М., Воробьев Г.А., Новожилов Б.А., Козловский Е.А. Перспективы разработки автоматизированной системы управления процессом бурения. М., 1987 - Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства. Обзор ВНИИ экономики минерального сырья и геологоразведочных работ. ВИЭМС.

50. Пономарев П.П. Алмазное бурение трещиноватых пород. - Л.:Недра, 1985.

51. Проскуряков В.М., Бляхман А.С., Фатхи В.А. Методы и аппаратура для регистрации вызванной акустической эмиссии горных пород - В сб.: Методы и аппаратура в шахтной геологии и геофизики. Минуглепром СССР, ВНИИ, Л., 1983, с.53-57.

52. Ребиндер П.А., Шрейнер Л.А., Жигач Н.Ф., Понизители твердости пород при бурении. М., Изд-во АН СССР, 1944.

53. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение материалов. М., Недра, 1988.

54. Рогоцкий Г.В. Способ построения автоматизированной системы управления процессом бурения. - "Нефтяное хозяйство", 1980, № 12, с.12-15.

55. Рогоцкий Г.В. Подземный рейс по звуку. - "Изобретатель и рационализатор", 1986, № 2, с.6-8.

56. Рукавицын В.Н., Кузнецов О.Л. Способ определения кривизны буровой скважины. - Авт.свид. № 286890 - "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1970, № 35, с.8.

57. Рукавицын В.Н., Кузнецов О.Л., Васильев Ю.С. Геоакустический метод исследования скважин в процессе бурения. - В кн.: "Ядерно-геофизические и геоакустические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых", Труды ВНИИЯГТ, вып.21, М., 1975, с.82-97.

58. Рукавицын В.Н., Кузнецов О.Л., Яблоновский Б.И., Марабаев Н.А. Проблема сейсмоакустических исследований скважин в процессе бурения. - "Развед. геофизика", М., 1979, №68, с.51-58.

59. Рукавицын В.Н., Жуков А.М. Спектрально-корреляционный анализ волнового поля в процессе бурения скважин. - "Развед. геофизика", М. 1980, №90, с.91-98.

60. Рукавицын В.Н. Прогнозирование физико-механических характеристик горных пород по результатам акустических измерений в процессе бурения. - Тезисы докладов 4 Всесоюзной научно-технической конференции "Разрушение горных пород при бурении скважин", М., 1986.

61. Рукавицын В.Н. Проблема сейсмоакустического метода контроля и управления процессом бурения скважин. - "Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности", М., 1978, с.8-12.

62. Рукавицын В.Н. Управление режимом работы турбобура в скважинах с использованием акустического канала связи. - "Автоматизация и телемеханизация нефт. промышленности", М., 1980, № 12, с.4-7.

63. Рукавицын В.Н. Использование данных сейсмоакустического метода исследования скважин для оптимизации режима бурения. - "Развед. геофизика", М., 1980, № 90, с.98-106.

64. Сахаров А.В., Оношко Ю.А., Петрова Г.В. Зависимость буримости горных пород от их петрографических характеристик. - В сб. Методика и техника разведки, Л., ОНТИ ВИТР, 1976, № 108.

65. Свешников И.А., Винник Э.М. Исследование процесса разрушения горных пород методом люминисцентной дефектоскопии. - В сб. "Разрушение горных пород инструментом из сверхтвердых материалов". Киев, ИСМ АН УССР, 1980, с.12-18.

66. Сологуб С.Я., Ткаченко В.М., Керелица Л.Г. и др. Механизм разрушения горных пород при вращательном бурении. - В кн. "Методы и средства разрушения горных пород", Киев, Наукова думка, 1980, с.18-23.

67. Сулакшин С.С. Основы теории разрушения горных пород и удаления продуктов разрушения при бурении скважин. Томск, ТПИ, 1964.

68. Тараканов С.Н. О работе мелкоалмазной коронки. М., Разведка и охрана недр, 1968, № 10, с.22-26.

69. Типовая программа и методика приемочных испытаний породоразрушающего инструмента для геологоразведочного бурения. М., 1968.

70. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов - М.: Издательство стандартов, 1984.

71. Хопунов Э.А., Первухин А.В. Устройство для регистрации хрупкого разрушения при микродеформировании твердых тел. - Заводская лаборатория., 1987, № 2, с.65-68.

72. Шатров Б.Б., Рудакова Н.П., Авдеев С.А., Архипов А.Г., Андреев О.С. Метод акустических исследований геологического разреза в процессе бурения скважин. - Информ.листок о науч.-тех. достижениях, № 89-10, серия Р 29,37,23, ОНТИ ВИЭМС, 1989.

73. Шатров Б.Б., Андреев О.С., Рудакова Н.Н., Стрыгин Д.М., Исследование геологического разреза в процессе бурения скважин на рудных месторождениях. - В сб.: Оценка прогнозных ресурсов и методы изучения рудных месторождений. В.П.О.Союзгеотехника, М., 1984, с.35-42.

74. Шатров Б.Б., Андреев О.С., Рудакова Н.П., Стрыгин Д.М. Исследование геологического разреза по акустическим частотным спектрам горных пород в процессе бурения. - В сб.: Разработка

и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения. НПО.Геотехника, ВИТР, Л., 1988, с.72-79.

75. Шатров Б.Б., Андреев О.С., Рудакова Н.П., Стрыгин Д.М., Способ геоакустического исследования скважин в процессе бурения. Авт.свид. № 1385114 (СССР). Оpubл. в Б.И., 1988, № 3.

76. Шатров Б.Б., Андреев О.С., Рудакова Н.П., Стрыгин Д.М., Вызванная акустическая эмиссия для диагностики пород. - Разведка и охрана недр, 1989, № 3, с.35-39.

77. Шахбатян Л.И., Блинов Г.А. Исследование влияния конструктивных параметров алмазных коронок на эффективность бурения. - В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1979, с.20-29.

78. Швец В.В. Некоторые вопросы теории и технологии машиностроения. - М., Машиностроение, 1976.

79. Bullen G.I. A new test machine for diamond drilling. Ind.Diamond Rev.1982, May, p.274-276.

80. Garner N.E. Cutting action of a single Diamond under Simulated Bore hole Conditions. Soc.Pet. (July, 1967) p.937-942.

81. R.M.Kokuncu, W.M.Mc.Cabe, A.E.Lord. Overview of Acoustic Emission Monitoring of Rock Structures. Rock Mechanics. 1981, v.14, N1, p.2249-259.

82. Innovations in rock drilling Technology. Geodriling.- 1989, N54, p.10-11.

83. Kuwabara Takao, Kawanami Hidetugu, Nakaya Mituo, Koyama Shunei. Hore goboku rakkau rombunsu. Trans.Jap.Irrig., Drain and Reclam Eng. 1984, N112, p.87-92.

84. New generation core bit. Mining Mag. 1989, N6, p.517.

85. Prospect "Craelius Diabor AB", 1981, Sweden.

86. Warren T.W., Canson B.E. High speed drilling research advances// Drilling. 1987. March/April, p.16-19.

87. Weared R.C., Dier H.B. A new type of Drill stone Proc. First International Congress on diamonds in industry, Paris, 1962, p.196-197.