

357

Архипов А.Г.

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И ЕГО АКУСТИКО-
СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА

Санкт-Петербург
ВИТР
2000

Дмитрию
Николаевичу
с глубокой признательностью
от автора

[Signature]

31.03.2000

Архипов А.Г.

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И ЕГО АКУСТИКО- СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА

Глава IV. Диагностика механизма разрушения горных пород при алмазном бурении

§1. Диагностика механизма разрушения горных пород

§2. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении

§3. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении

§4. Исследование механизма разрушения горных пород

Глава V. Определение механизма разрушения горных пород

§1. Акустико-спектральная диагностика механизма разрушения горных пород

§2. Теория акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горных пород

§3. Гематический тип горных пород

§4. Классификация горных пород

§5. Оценка выбора параметров

Список литературы

Санкт-Петербург
ВИТР
2000

УДК 622.243+ 622.271

Аршилов А. Г. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении и его акустико-спектральная диагностика – СПб.: ВИТР, 2000. – 106 с.

Приведены результаты научно - исследовательских работ по исследованию механизма разрушения горных пород при алмазном бурении.

Рассмотрены основы нового самостоятельного научного направления в области техники и технологии бурения скважин "акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горных пород при бурении".

Книга рассчитана на научных работников, инженеров, конструкторов и специалистов производственников, занятых разработкой и решением проблем и задач бурения скважин. Книга также рекомендуется преподавателям и студентам вузов и техникумов, имеющих курс лекций по специальности "Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых".

Табл. - 16, ил. - 22, список лит. - 82 назв.

Научный редактор – д. т. н. Ю. М. Парийский

Рецензент – к. т. н. В. И. Васильев

ФГУП "ВНИИ методики и техники разведки", 2000.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Глава I. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении и природа акустического шума разрушения	11
§ 1. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении	11
§ 2. Влияние акустических колебаний и тепла на разрушение горной породы и износ алмазного инструмента	14
§ 3. Теория акустического шума разрушения	19
Глава II. Акустико-спектральная диагностика механизма разрушения горных пород при бурении	23
§ 1. Основы акустико-спектральной диагностики механизма разрушения	23
§ 2. Технические средства исследований	25
§ 3. Формирование списка диагностических параметров	28
Глава III. Причины износа и прогноз ресурса алмазного инструмента при бурении	36
§ 1. Износ единичного алмаза с позиции теории усталости	36
§ 2. Виды износа алмазной коронки и диагностика их развития при бурении	38
§ 3. Прогноз ресурса и кривая износостойкости алмазной коронки	44
Глава IV. Диагностика механизма разрушения при решении практических задач бурения	49
§ 1. Диагностика вида движения алмазной коронки	49
§ 2. Механизм разрушения, реализуемый алмазной коронкой	55
§ 3. Испытания алмазных коронок в стендовых условиях	64
§ 4. Исследование геологического разреза в процессах бурения	68
Глава V. Определение прочности и буримости горной породы	73
§ 1. Акустико-спектральная диагностика буримости горной породы	73
§ 2. Технические средства исследований образцов горных пород	76
§ 3. Генетический тип горной породы и параметры механизма разрушения пород	79
§ 4. Классификация горных пород по удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении	84
§ 5. Основы выбора параметров алмазных коронок для бурения	96
Список литературы	101

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ежегодно в мировой практике алмазным способом бурения осуществляется проходка миллионов метров скважин. Уверенно можно прогнозировать, что такое положение сохранится и в дальнейшем, пока не будут синтезированы новые уникальные сверхтвердые материалы, адекватно заменяющие алмаз в породоразрушающем инструменте.

До настоящего времени разрушение горной породы при бурении остается одним из наименее изученных технологических процессов. Объяснить это можно тем, что основной информацией о характере протекания забойных процессов являются показания наземных приборов и состояние инструмента после подъема его на поверхность. На основе такой информации в принципе невозможно определить физическую сущность и осуществлять эффективный контроль процесса разрушения.

В книге рассмотрены основы нового самостоятельного научного направления в области техники и технологии бурения скважин "акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горных пород при бурении". Автор сделал попытку приложить возможности технической диагностики к процессу разрушения горных пород при бурении, рассмотрев механизм разрушения в качестве объекта диагностирования.

В рамках нового подхода теоретически и экспериментально обосновано существование в призабойной зоне "акустического шума разрушения" и разработаны технические средства, реализующие возможности акустико-спектральной диагностики в области испытаний бурового инструмента, дифференциации геологического разреза в процессе бурения и исследования буримости горных пород.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ВИТР: И. С. Афанасьеву, Г. А. Блинову, В. И. Васильеву, И. М. Гинзбургу, О. С. Головину, В. Н. Горину, Н. И. Корнилову, П. Н. Курочкину, Н. Н. Михееву, В. П. Онищину и Д. Н. Плавскому за постоянное внимание и помощь в работе. Автор благодарен Г. С. Боякову, А. В. Евграфову, В. Ф. Игнатьеву и И. А. Пересветову за участие в экспериментальных исследованиях. Автор особо признателен Ю. М. Парийскому и П. А. Давыдову за ценные советы при подготовке рукописи.

Все замечания по книге автор просит направлять по адресу: 199106, Санкт-Петербург, Федеральное государственное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт методики и техники разведки (ВИТР).

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени забойные процессы были практически недоступны для изучения. Гипотезы о разрушении горных пород строились, в основном, на оценке состояния породоразрушающего инструмента, анализе параметров режима и технико-технологических показателей бурения. Ситуация постепенно менялась вместе с появлением новых методов исследований, позволяющих глубже понять физическую природу процессов, протекающих на забое.

С начала шестидесятых годов двадцатого века стало развиваться направление исследований забойных процессов с использованием забойных измерительных систем. В системе Мингео СССР разработкой аппаратур для получения технико-технологической информации на забое занимались ВИТР и СКБ. Под руководством Г. С. Бродова в 1960-67 гг. в ВИТРе разработана аппаратура ЭКРАН-5 для измерения на забое скважины осевой нагрузки, крутящего момента и давления промывочной жидкости. В СКБ в 1967 году разработана аппаратура ТИСС-1200 для измерения при бурении на забое скважины осевой нагрузки и крутящего момента. Аппаратуры ТИСС-1200 и ЭКРАН-5 имели глубину действия до 1200 м при диаметре скважины не менее 93 мм. В 1968 - 70 гг. П. Н. Дорота, А. И. Богданович, А. Н. Исаков и др. (ВИТР) создали действующий макет аппаратуры для измерения осевой нагрузки на забое при бурении скважин диаметром 59 и 76 мм. Во всех указанных аппаратах использовался электрический беспроводной канал связи забой - поверхность. В СКБ в 1968 г. разработана аппаратура ГРП -2 для измерения и записи на проволочный носитель на забое осевой нагрузки и крутящего момента. Расшифровка и перезапись на фотопленку зафиксированных данных производилась после подъема аппаратуры на поверхность.

Применение забойных систем позволило выявить на забое колебания осевой нагрузки и крутящего момента, а также отличия их значений от задаваемых на поверхности [30]. По сравнению с задаваемой на поверхности величиной осевая нагрузка на забое оказалась меньше на десятки процентов. Вследствие ограниченных возможностей забойных систем по частоте передаваемых сигналов на забое были зафиксированы только низкочастотные колебания осевой нагрузки и крутящего момента, связанные с частотой вращения снаряда. В дальнейшем, забойные системы получения технико-технологической информации не нашли широкого применения в разведочном бурении из-за ограниченности решаемых задач, высокой стоимости и недостаточной надежности.

Комплекс исследований разрушения горной породы единственным алмазом на основе тензометрирования усилий и скоростной киносъемки проведен в ВИТРе в период 1970 - 80 г.г. [47]. В исследованиях принимали участие: П. Н. Курочкин, О. В. Иванов, Г. А. Блинов, М. И. Исаев и др.. Информацией о процессе разрушения служили: осциллограммы осевой и тангенциальной составляющей усилия резания на алмазе, кинограммы движения алмаза, размеры борозды в горной породе. На основе изучения кинограмм сделан вывод, что каждый алмаз в коронке можно рассматривать как резец, движущийся с определенной скоростью [47]. Взаимодействие алмаза с горной породой носит импульсный характер, а разрушение горной породы происходит скачкообразно. Отмечено, что перед алмазом перемещается упругая волна скатия, которая распространяется равномерно во все стороны с наибольшей интенсивностью вперед по движению алмаза. Амплитуда усилий на алмазе непрерывно изменяется и каждому импульсу на осциллограмме соответствует единичный акт разрушения горной породы. На 1 мм пути движения алмаза происходит от 1 до 3 сколов горной породы, а амплитуда усилия на алмазе колеблется от 3 до 15 даН. Частота взаимодействия алмаза с горной породой составляет 300 - 700 Гц и выше. Продолжительность импульса составляет десятки миллисекунд, а усилие на алмазе достигает максимальных значений за сотые и тысячные доли секунды. Это позволило П. Н. Курочкину сравнить акт взаимодействия алмаза с забоем с микроударом.

Традиционным направлением исследований можно считать изучение гранулометрического состава шлама, образующегося при бурении. При алмазном бурении образуются, в основном, частицы шлама размером до 250 мкм [59, 63]. Это позволяет оценить масштабность разрушения, которая оказывается значительно меньше, чем при шарошечном и твердосплавном бурении.

Е. Р. Pfeider и R. L. Blake, исследуя забой скважины при бурении таконита, установили неодинаковый характер разрушения различных минералов [77]. При разрушении магнетита образуются борозды со слабо заметными гребнями, а трещины распространены на небольшую глубину. Разрушение кварца сопровождается возникновением сети относительно глубоких трещин. В местах агрегирования магнетита и кварца отмечены более глубокие борозды, чем на монолитных участках забоя.

Исследование формирования при алмазном бурении зоны предварительного разрушения (зоны трещиноватости) горной породы, примыкающей к забою, начались в ИСМе с появлением метода люминисцентной дефектоскопии и про-

должались в течение 1970 - 80 г.г. В исследованиях принимали участие: Э. М. Винник, И. А. Свешников, В. Ф. Фадеев, Г. В. Арцимович и др.. В результате применения метода люминисцентной дефектоскопии установлено следующее. Глубина развития трещин от поверхности забоя намного превышает углубку за оборот и зависит от горной породы и величины осевой нагрузки [10]. При бурении с осевой нагрузкой 12,5 кН, глубина развития трещин в граните составляет 3,1 мм; кварците - 2,1 мм; габбро - 0,55 мм. Для каждого минерала характерен свой механизм формирования трещиноватости. Глубина развития трещин в различных минералах, пересекаемых линиями резания, неодинакова: максимальна у полевых шпатов и минимальна у кварца и слюды. Профили линии резания имеют пилообразную форму; впадины, как правило, приурочены к участкам полевых шпатов, а выступы - к местам нахождения зерен кварца. Трудоемкостью метода люминисцентной дефектоскопии, по-видимому, объясняется ограниченность набора горных пород и режимов бурения, использованных при исследованиях.

Исследования процесса разрушения методом скоростной киносъемки при бурении кварцевого (оптического) стекла проводили ВИТР и МГРИ в период 1978- 1980 г.г. [21, 50]. Скоростная киносъемка осуществлялась со стороны забоя со скоростью 500 - 4000 кадров в секунду. Вначале исследования были совместными и проходили на базе ВИТР, затем, исследования П. П. Пономарева, В. А. Каулина и др. (ВИТР) были направлены на изучение процесса кернообразования, а исследования МГРИ продолжились в направлении изучения кинематики движения коронки и взаимодействия алмазов с забоем. Анализ кинограмм позволил В. М. Питерскому, Г. А. Воробьеву, Б. А. Новожилову и Е. А. Козловскому установить следующие особенности работы алмазных коронок [50]. При бурении на вертикальном буровом стенде с длиной колонны 2 м угловая скорость вращения коронки вокруг собственной оси постоянна и равна задаваемой частоте вращения. Алмазы работают в режиме микроударов, при этом одновременно разрушают породу 5 - 25% алмазов, выступающих из торца алмазной коронки, остальные находятся в упругом контакте с породой. Количество алмазов, одновременно разрушающих породу, увеличивается с повышением осевой нагрузки и не изменяется при увеличении частоты вращения. При бурении коронкой 15АЗ образуется "предразрушенная зона" с глубиной распространения трещин от поверхности забоя 2-3 мм. Кинематика алмазной коронки при бурении на горизонтальных стендах с длиной колонны 40 - 50 м является более сложной, чем при бурении на вертикальном стенде и, в частности, связана с режимом работы снаряда. Выделены несколько видов движения

коронки: качение, равномерное вращение, крутильные автоколебания без остановок и с остановками. При изменении осевой нагрузки, частоты вращения снаряда и расхода промывочной жидкости происходит закономерное изменение вида движения коронки.

Использование скоростной киносъемки забоя позволило систематизировать различные виды движения коронки. Однако результаты, полученные на кварцевом стекле, не могут быть автоматически перенесены на весь комплекс горных пород. Применение же метода скоростной киносъемки забоя на непрозрачных материалах невозможно. Ограничение на объем получаемой информации с помощью скоростной киносъемки также накладывает используемая частота кадров, что не позволяет зафиксировать более высокочастотные процессы, протекающие на забое.

Рядом исследований в 30 - 60 г.г. двадцатого столетия было установлено возникновение при механическом разрушении горных пород акустического, электромагнитного, теплового и электрического полей. Эти результаты обусловили начало исследований физических явлений, в качестве возможного источника получения информации о разрушении горных пород. В СССР исследования физических явлений в процессе алмазного бурения на твердые полезные ископаемые начались в ВИТРе с шестидесятых годов двадцатого столетия, в период интенсивного внедрения алмазного бурения в практику геологоразведочных работ.

Комплекс исследований по изучению температуры и напряженного состояния коронки и забоя при бурении был проведен в ВИТРе П. Н. Курочкиным, М. И. Исаевым, Л. С. Голодцом и др. в конце 60-х начале 70-х годов [33, 34, 38, 39]. Для замера температуры и напряженного состояния коронки был изготовлен специальный снаряд с системой съема сигнала. Термопары устанавливали в коронку, а тензодатчики наклеивались на ее корпус или матрицу. Кабель от датчиков прокладывали вдоль внутренней поверхности колонковой трубы до струнного токосъемника, позволяющего осуществлять съем сигнала с вращающегося снаряда. При бурении также измеряли напряженное состояние и температуру забоя. Для этого устройство крепления горной породы оборудовали тензодатчиками, а в паз, сделанный в горной породе по траектории движения коронки, укладывалась константановая проволока. В результате исследований получены данные о характере изменения температуры и напряженного состояния коронки при бурении, которые можно свести к следующему. Динамические напряжения, испытываемые коронкой при бурении, больше статических напряжений в 4.5 раза. Цикличность деформации коронки совпадает с числом оборотов коронки, при этом напряжения, действующие

в поперечном направлении, значительно меньше, чем продольном. Тепловой баланс на забое скважины при скорости вращения 800 мин^{-1} наступает в течение 4-5 с (50 - 80 оборотов коронки). За этот период температура матрицы коронки при бурении серого гранита нарастает до максимальных значений, а затем остается постоянной. Температура торца коронки (при расходе промывочной жидкости 5-10 $\text{дм}^3/\text{мин}$) не превышает 150°C . Высокие температуры наблюдаются только в тонком слое матрицы коронки, измеряемом сотыми долями миллиметра.

Исследования, выполненные П. Н. Курочкиным, а также М. И. Исаевым и Л. С. Голодцом явились значительным шагом в понимании процессов, протекающих на забое. Их главным результатом можно считать установление факта изменения температуры и напряженного состояния коронки в зависимости от режима бурения. Недостатки исследований, в основном определяются существовавшим уровнем развития измерительной техники: без автоматизации съема и обработки данных оказалось невозможным нахождение четких зависимостей между измеряемыми параметрами, а отсутствие аппаратуры спектрального анализа ограничило диапазон исследований колебаний коронки первыми герцами.

Исследования электрических и упругих колебаний, возникающих при бурении, были проведены в ВИТРе в период 1971 - 75 г.г. под руководством В. И. Белякова [14, 15]. В работах принимали участие: Г. А. Блинов, П. М. Григоренко, О. В. Иванов, З. В. Комарова и др. Для производственных исследований была разработана аппаратура, позволяющая в процессе бурения регистрировать электрические и упругие колебания и передавать их по кабелю на поверхность. Лабораторные исследования проводили на буровом стенде и стендах "единичный резец" и "единичный удар". В результате исследований установлено, что при ударном воздействии в горной породе возникает переменное электрическое и упругое поля. Параметры электрического поля связаны с минеральным составом и свойствами горной породы в точке удара. Амплитуда электрического сигнала возрастает пропорционально энергии удара и может усиливаться пьезоэффектом. Параметры упругих вибраций породоразрушающего инструмента при бурении коррелируют с механическими характеристиками разрушаемых горных пород. Относительное изменение амплитуд электрического и упругого полей для различных пород оказалось неодинаковым, что позволило В. И. Белякову, Г. А. Блинову, О. В. Иванову и др. предложить новый способ определения свойств горных пород в процессе бурения по величине отношения амплитуд электрического и упругого сигналов. К сожалению,

нию, работы В. И. Белякова были внезапно прекращены в 1975 г. и завершились только обобщением результатов исследований [14].

Исследования физических явлений возобновились в ВИТРе с 1980 г. Под руководством Б. Б. Шатрова в период 1980 – 1992 г.г. велись исследования с целью разработки метода и аппаратуры дифференциации геологического разреза в процессе бурения [64, 65, 66]. В работах принимали участие: О. С. Андреев, Д. М. Стрыгин, Н. П. Рудакова, А. Г. Архипов, С. А. Авдеев и др. После начальных экспериментов по приему акустических, электрических и электромагнитных сигналов для дальнейших исследований было выбрано акустическое поле, как наиболее легко измеряемое и информативное. Существенным отличием исследований явились помещение акустического датчика в призабойную зону бурящейся скважины и использование спектрального анализа сигналов в диапазоне 0 - 20 кГц и выше на современной для того времени аппаратуре.

Работы под руководством Б. Б. Шатрова стали отправной точкой для оформления акустико-спектральных исследований в призабойной зоне бурящейся скважины в самостоятельное научное направление в области техники и технологии бурения скважин. Органическая связь акустических колебаний с физическими процессами, протекающими на забое, делает их незаменимым источником информации о разрушении горной породы, получение которой традиционными методами невозможно.

Глава I. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И ПРИРОДА АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА РАЗРУШЕНИЯ

§1. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении

Физические поля позволяют рассмотреть процессы взаимодействия алмазной коронки с забоем, износа алмазной коронки и разрушения горной породы как единую, взаимосвязанную систему, объединенную понятием механизм разрушения. Дадим определение понятия "механизм разрушения".

Механизм разрушения - система взаимосвязанных физических процессов, одновременно протекающих в алмазном инструменте, горной породе и межконтактном пространстве пары инструмент – порода, при силовом взаимодействии вращающегося алмазного инструмента с забоем.

При рассмотрении механизма разрушения возможны два подхода. Первый подход связан с изучением внешних признаков (состояния коронки, формы забоя и др.) и устанавливает кинематику и динамику взаимодействия коронки с забоем; второй подход базируется на исследовании феномена разрушения на основе энергетики процессов.

В первом приближении механизм разрушения реконструируется следующим образом (рис. 1). При бурении алмазная коронка находится в силовом контакте с горной породой и одновременно совершает вращательное движение. Вращаясь, коронка испытывает колебания (вибрации) с различной частотой, амплитудой и направлением вследствие возмущающих сил механической природы. Взаимодействие алмаза с забоем носит циклический характер и происходит с некоторой частотой. Алмазы движутся по концентрическим окружностям и периодически передают в забой порции энергии и скалывают частицы породы. После скола, алмаз некоторое время движется, не встречая сопротивления, затем происходит новый контакт с забоем и цикл повторяется. Вследствие шероховатости забоя и циклического характера разрушения, контакт различных участков матрицы с забоем также не будет постоянным, а на алмаз и матрицу будут накладываться низкочастотные колебания, обусловленные неуравновешенностью масс в колонне.

К описанию механизма разрушения можно подойти и с энергетической точки зрения. Механическая энергия, подводимая к породоразрушающему инструменту от двигателя станка, преобразуется в физические явления (акустические явления, тепло, электрические и электромагнитные волны), которые начинают распространяться от забоя вглубь массива горных пород и инструмента.

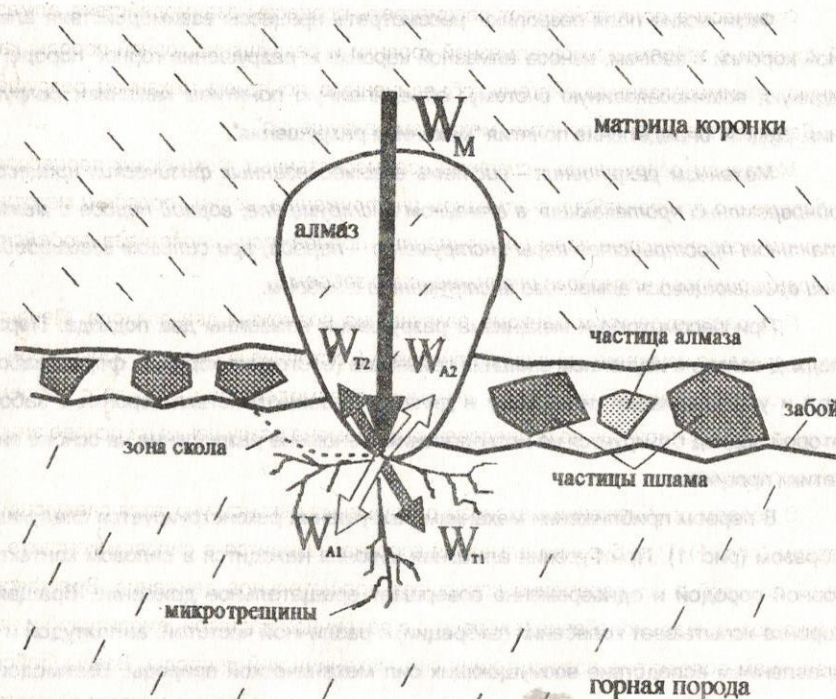


Рис. 1. Схема разрушения забоя движущимся алмазом

W_M - механическая энергия, W_{A1} - акустическая энергия в горной породе; W_{T1} - тепловая энергия в горной породе; W_{A2} - акустическая энергия в породоразрушающем инструменте; W_{T2} - тепловая энергия в породоразрушающем инструменте

Под акустическими явлениями в данной работе понимается упругие колебания и волны (волны напряжений) от самых низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот (10^{11} - 10^{13} Гц).

Запишем баланс энергии на забой в виде уравнения:

$$W_M = W_T + W_A + W_3 + W_{3M} \quad \text{Дж}, \quad (1.1)$$

где W_M - механическая энергия, подведенная к забою, Дж; W_A - энергия образовавшихся акустических волн, Дж; W_T - выделившаяся теплота, Дж; W_3 - энергия электрического поля, Дж; W_{3M} - энергия электромагнитного излучения, Дж.

При рассмотрении баланса энергии можно пренебречь электромагнитным излучением и энергией электрического поля в силу их незначительного влияния на процессы разрушения горной породы и износа алмазной коронки. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$W_M = W_T + W_A \quad \text{Дж} \quad (1.2)$$

Механическая энергия на забой распределяется между породоразрушающим инструментом и горной породой: тепловые и акустические колебания возникают как в алмазной коронке, так и в горной породе. Поэтому уравнение баланса энергии можно записать иначе:

$$W_M = W_1 + W_2 = W_{T1} + W_{A1} + W_{T2} + W_{A2} \quad (1.3)$$

где W_1 - энергия, потребленная в породоразрушающем инструменте; W_2 - энергия, переданная в горную породу, W_{A1} - акустическая энергия в горной породе; W_{T1} - тепловая энергия в горной породе; W_{A2} - акустическая энергия в породоразрушающем инструменте; W_{T2} - тепловая энергия в породоразрушающем инструменте.

Для полной оценки энергии W_1 , потребленной породоразрушающим инструментом, и энергии W_2 , переданной в горную породу, необходимо одновременно измерять акустические и тепловые поля и в горной породе и в инструменте, что представляется технически сложным. Однако для качественной оценки распре-

ления энергии при разрушении достаточно измерять одну составляющую каждого вида энергии в инструменте или в горной породе.

§ 2. Влияние акустических колебаний и тепла на разрушение горной породы и износ алмазного инструмента

До настоящего времени большинство гипотез процесса разрушения горной породы и износа инструмента при бурении базируются на чисто внешних признаках разрушения и кинематике движения резца [16, 43, 51, 57, 58, 71, 82]. При этом полностью игнорируются внутренние, скрытые от наблюдения процессы, протекающие внутри горной породы и материала матрицы алмазной коронки.

Вопрос разрушения горной породы при алмазном бурении неразрывно связан с общим развитием представлений о прочности и разрушении материалов. Для более полного понимания акустико-спектрального аспекта разрушения горной породы бурением кратко рассмотрим основные этапы развития представлений о механике феномена разрушения.

Первым этапом развития механики разрушения можно считать период от 17 до начала 20 веков. В это время были разработаны несколько теорий прочности, общим в которых явился постулат, что разрушение однородного и изотропного твердого тела происходит при достижении в любой его точке напряжений критического значения. Разработка теории прочности связаны с именами Р. Гука, Ш. Кулона, А. Навье, А. Сен-Венана и О. Мора. Этот подход в 1950 - 70 г.г. активно применялся и для расчета разрушения горной породы при шарошечном и твердосплавном бурении Л. А. Шрейнером, В. С. Владиславлевым, Б. В. Байдюком, Р. М. Эйгелесом, А. И. Спиваком и рядом других исследователей.

С начала двадцатых годов 20 века получило развитие направление, связывающее разрушение твердого тела с наличием и развитием в нем дефектов структуры, в первую очередь трещин. Основу нового подхода к феномену разрушения заложили работы А. Гриффитса. Стержнем направления стало стремление объяснить природу разрушения на основе связи с кинетическими процессами, протекающими на атомном уровне.

Разрушение горной породы алмазным бурением происходит посредством отделения от забоя частиц, а на примыкающем к забою участке массива горной породы возникает зона трещиноватости. Это не противоречит теории А. Гриффитса, но зададимся простым вопросом: "Вследствие чего трещины возникают на не-

котором удалении от забоя?" Очевидно, что появление дефекта структуры на некотором удалении от точки приложения сил связано переносом энергии. Но перенос энергии без переноса вещества возможен только физическими полями. Отсюда следует необходимость рассмотрения вопроса влияния физических полей на разрушение горной породы и износ инструмента.

В подавляющем числе теоретических и экспериментальных исследований, касающихся оценки влияния физических полей на разрушение горной породы и износ инструмента, действие физических полей рассматривается изолированно друг от друга.

М. И. Исаевым и П. В. Пономаревым [34] в 1975 г. была предложена 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 горной породы определяется параметрами упругих волн: длительностью, спектральным составом и создаваемым напряжением. Характер процесса разрушения определяется свойством горной породы поглощать энергию упругой волны. М. В. Ханин, рассматривая физические процессы разрушения и механического изнашивания материалов при трении, теоретически обосновал зависимость разрушения поверхностного слоя с акустическими колебаниями, генерируемыми при трении [61]. Общим положением в теориях М. И. Исаева и П. В. Пономарева и М. В. Ханина является зависимость феномена разрушения материала от поглощения в нем акустических колебаний.

Волновая теория может быть предложена и для объяснения износа алмазной коронки при бурении. В процессе взаимодействия коронки с забоем возникают колебания частиц торца коронки и вверх по колонне бурильных труб начинают распространяться акустические волны. Торец алмазной коронки можно рассмотреть как излучатель акустических волн в направлении инструмента. При плоской форме торца коронки, можно принять акустическую волну плоской с конечной величиной смещения. Волновое поле внутри матрицы образует чередующиеся области растяжения-сжатия относительно некоторой средней величины. Изменение амплитуды волны описывается уравнением:

$$A = A_m \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{\alpha} \right) \quad (1.4)$$

где A_m - амплитуда колебаний частиц матрицы, ω - круговая частота колебаний, α - скорость распространения волн, t - время, x - текущая координата расстояния.

Затухание акустической волны будет зависеть от ее параметров и свойств материала матрицы, и определяться известной из теории колебаний формулой.

$$A_m(x) = A_{m0} \exp\left(-\frac{\pi \varepsilon}{a} \alpha x\right) \quad (1.5)$$

где A_{m0} - начальная амплитуда колебаний, ε - коэффициент потерь, $\frac{\pi \varepsilon}{a}$ - физическая константа материала.

На установившемся режиме уравнение баланса энергии в любом сечении матрицы, расположенном параллельно торцу коронки, может быть представлено в виде:

$$W = I_m + \int_0^x w(z) dz \quad (1.6)$$

где I_m - поток акустической энергии, проходящий через данное сечение материала матрицы коронки, $w(z)$ - поток акустической энергии, поглощаемый единицей высоты матрицы коронки, z - высота матрицы.

Акустическая энергия, поглощаемая материалом матрицы, идет на изменение его структуры и соответственно прочности. Величина поглощенной в единице высоты матрицы энергии $w(z)$ зависит от свойств материала матрицы, а ее наибольшее значение будет определяться:

$$w(z) = \frac{\partial I_m}{\partial z} = -\rho \alpha \omega^2 A_m \frac{\partial A_m}{\partial z} \quad (1.7)$$

Величина $w(z)$ зависит от частоты и амплитуды колебаний поверхностного слоя матрицы коронки. Чем больше амплитуда и частота колебаний поверхностного слоя коронки, тем больше энергии будет поглощаться материалом матрицы и выше скорость его износа.

Температурный фактор оказывает значительное влияние на режущие свойства и ресурс алмаза. Физическая сущность теплообменных процессов в призабойной зоне скважины детально рассмотрена Б. Б. Кудряшовым, а тепловой баланс матрицы алмазной коронки Л. К. Горшковым [27, 28]. Тепло, генерируемое при взаимодействии коронки с забоем, распространяется в тело матрицы и горную породу. Распределение тепла между коронкой и горной породой определяется их теплофизическими константами и, прежде всего, коэффициентами теплопроводности и температуропроводности.

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают зависимость между параметрами акустических колебаний и количества выделившегося тепла с процессами разрушения горной породы и износа алмазного инструмента.

В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонов, Л. П. Зарогатский и др. отмечают, что при ударной нагрузке в горной породе на межфазных границах минералов происходит поглощение ударных волн, образование микротрещин и последующее межкристаллитное разрушение [54].

Явление снижения механической прочности горных пород в результате их нагрева, связано с неравномерным расширением кристаллов по различным кристаллографическим направлениям. Напряжения, возникающие при анизотропном изменении объема отдельных зерен горной породы, вызывают появление в ней трещин и снижение прочности [54]. Наиболее полно эффекты термического разрушения реализуются при тепловом ударе. На использование дополнительной энергии тепла для разупрочнения горной породы при взаимодействии вращающегося инструмента с забоем основан термомеханический способ бурения [18, 31].

Матрица коронки является композиционным алмазосодержащим материалом. Разрушение алмаза при бурении происходит путем скалывания микро и макро объемов зерна или графитизации поверхностных слоев. Нагрузка на единичный алмаз при бурении постоянно изменяется во времени, а ее максимальное значение в импульсе может приближаться к разрушающей величине. При увеличении динамической нагрузки выше критической возможен скол алмазов [52]. Л. М. Ступкина, исследуя разрушение алмаза под действием динамических нагрузок на лабораторном копре, сделала вывод, что разрушающее усилие при динамическом приложении нагрузки на алмаз приблизительно в 4 раза ниже, чем при статическом нагружении [55, 56]. Наличие в кристаллах алмаза различных включений и трещин понижает их прочность в 1,1–1,9 раз. Наиболее вероятен скол алмазов при пересечении трещины в горной породе [52]. В момент вхождения алмаза в открытую

трещину осевая и тангенциальная составляющие усилия падают до нуля, затем, при встрече алмаза с горной породой, резко возрастают до максимальных значений [37].

При нагрузке, не превышающей критического значения, износ алмазов, по видимому, связан с постепенным усталостным разупрочнением зерна. По мнению Е. И. Быченкова [19, 20], износ алмазов при бурении всегда связан с образованием в нем трещин. На поверхности алмаза Е. И. Быченков выявил трещины, царапины и скалывания по контуру и плоскостям. Интенсивность образования и характер трещин зависят от местоположения алмазов в матрице, их ориентировки, геологических и технологических условий бурения. Скол микрообъемов алмаза происходит по контуру трещины. Х. Г. Тхагапсоев, П. С. Хапачев, А. Ю. Кульчаев и др. [60], исследуя прочность алмаза при циклическом нагружении, получили данные, что алмаз, не закрепленный в матрице коронки, может выдерживать примерно 10 миллионов циклов нагружения без снижения прочности. Однако, учитывая дополнительное действие тепла, при бурении следует ожидать снижения прочности алмаза при значительно меньшем числе циклов.

По данным Р. Sauvan и G. Chennauv [78], при взаимодействии алмаза с горной породой в зоне контакта температура алмаза может достигать 1300°C и выше. Т. М. Илларионова и В. Н. Горин [32] считают, что при определенных сочетаниях режимных параметров на рабочей поверхности алмаза температура может достигать и более 800°C.

Высокие температуры нагрева алмаза приводят к изменению его прочности и микротвердости поверхностного слоя. Согласно работам Т. Н. Лопадзе и Г. В. Бокучавы [40, 41], В. Н. Бакуля [12, 13], А. В. Касаточкина [35] микротвердость природных и синтетических алмазов при нагреве снижается. Уменьшение микротвердости природного алмаза при температуре 600°C составляет порядка 30% от начальной микротвердости 100000 МПа, а при 1000°C – около 60% [40]. Микротвердость синтетических алмазов меньше природных во всем температурном диапазоне нагрева в среднем на 5-25% [12]. Синтетические алмазы более чувствительны к нагреву, чем природные алмазы. В ряде зарубежных работ отмечается вредное воздействие высокой температуры на прочностные характеристики синтетических алмазов [73, 74, 80]. По данным М. Е. Мухина [45], прочность отечественных синтетических монокристаллов при температуре 800°C меньше исходной на 25 - 35%, а при 1000°C - в 2 раза.

Графитизация поверхностных слоев алмаза становится возможна при температуре выше 800°C [1, 40]. Графитизация алмаза при высоких температурах подтверждена в работах зарубежных исследователей R. M. Horton и M. D. Horton [72], M. Seal [79], I. Evans и D. James [70]. Н. Dueg отмечает, что при температуре выше 1800°C уже возможна пластическая деформация поверхностных слоев алмаза [69].

Матрица коронок, в основном, подвергается абразивному изнашиванию в результате режущего или царапающего действия твердых частиц породы, находящихся в шламе или на поверхности забоя. Интенсивность износа матрицы зависит от ряда факторов, в числе которых ее свойства, нагрузка на коронку, температура матрицы, микрорельеф забоя, а также твердость, форма и размер шлама [60]. При нормальных условиях бурения, температура матрицы обычно не превышает 150°C [38], но при изменении теплового режима может достигать нескольких сот градусов. При увеличении температуры матрицы, интенсивность изнашивания резко возрастает [27, 63]. По данным П. Н. Курочкина температурные напряжения, возникающие в торце коронки, при температуре 750°C являются растягивающими и достигают 0.7 от предела прочности материала матрицы. В результате, в секторе матрицы возможно появление микротрещин.

Как следует из вышеприведенных данных, тенденция влияния динамических нагрузок и температуры на разрушение горной породы и износ алмазного инструмента, в целом одинакова. При увеличении динамических нагрузок и температуры на забой, скорость разрушения горной породы и интенсивность износа алмазного инструмента будут увеличиваться. Однако характер разрушения горной породы и вид износа коронки, несомненно, зависят и от соотношения между параметрами динамических нагрузок и количеством выделяющегося тепла. Отсюда следует вывод о необходимости совместного рассмотрения и учета разрушающих воздействий физических полей на горную породу и алмазный инструмент.

Таким образом, параметры акустических и тепловых колебаний с одной стороны определяют интенсивность разрушения горной породы и износа алмазной коронки, с другой несут информацию о процессе разрушения.

§ 3. Теория акустического шума разрушения

В силу физических особенностей разрушение горной породы при алмазном

бурении будет сопровождаться возникновением акустического сигнала, амплитудно-частотные характеристики которого резко отличаются от параметров сигналов от вибраций колонны и других скважинных источников. Назовем этот сигнал "акустическим шумом разрушения" и рассмотрим причины его возникновения.

Лабораторные эксперименты П. Н. Курочкина [37] по исследованию взаимодействия единичного алмаза с горной породой показали, что взаимодействие алмазов с забоем носит циклический характер и происходит с некоторой частотой. Рассчитаем возможные частоты взаимодействия алмазов с забоем при бурении.

Число N единичных актов разрушения на пути равном длине L окружности, по которой движется алмаз, будет определяться размером l скалываемой частицы по траектории движения алмаза. Полагая, что размеры скалываемой частицы для конкретной пары коронка-порода, при постоянном сочетании режимных параметров, группируются около некоторых средних значений, мы можем выразить N :

$$N = \frac{L}{l} \quad \text{актов.} \quad (1.8)$$

Рассмотрим теперь процесс взаимодействия алмаза с забоем во временной области. Размеры скалываемой частицы по траектории движения алмаза, будут определять время $t_{\text{с}}$ движения алмаза без контакта с забоем. Назовем время $t_{\text{с}}$ временем холостого хода алмаза, а сумму времени взаимодействия $t_{\text{в}}$ и холостого хода алмаза - временем цикла взаимодействия $t_{\text{ц}}$. Тогда, число N будет равно отношению времени T прохождения алмазом пути L к времени цикла $t_{\text{ц}}$.

$$N = \frac{T}{t_{\text{ц}}} \quad \text{актов.} \quad (1.9)$$

Частота f взаимодействия единичного алмаза с забоем будет определяться отношением числа N единичных актов разрушения к времени T :

$$f = \frac{N}{T} \quad \text{Гц.} \quad (1.10)$$

В итоге имеем формулу для частоты f в виде:

$$f = \frac{L}{T l} = \frac{v_{\text{окр}}}{l} \quad \text{Гц.} \quad (1.11)$$

где $v_{\text{окр}}$ - окружная скорость движения алмаза, м/с.

Размерность частоты f взаимодействия единичного алмаза с забоем - число актов взаимодействия в секунду или, принимая размерность системы СИ, герцы (Гц).

Частота взаимодействия единичного алмаза с забоем будет увеличиваться с ростом окружной скорости движения и уменьшением размера алмаза. Следует отметить, что алмазы, расположенные на различных диаметрах, будут работать с разными частотами.

Для упрощения расчета частоты f примем, что размер скалываемой частицы горной породы равен среднему диаметру алмаза. Это можно сделать, так как размер частиц шлама при алмазном бурении сравним с размерами алмазов, используемых для армирования коронок.

Выполним оценочный расчет частоты f для алмазной коронки диаметром 59 мм на частотах вращения снаряда от 400 до 1500 мин⁻¹. Внутренний диаметр коронки - 42 мм. Размер алмазов в рабочем слое коронки: 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000 и 1250 мкм. Окружная скорость движения алмазов, расположенных на наружном диаметре коронки, при частоте вращения 400 мин⁻¹ равна 1,24 м/с; при 1500 мин⁻¹ - 4,63 м/с. Окружная скорость движения алмазов, расположенных на внутреннем диаметре коронки, при частоте вращения 400 мин⁻¹ равна 0,87 м/с; при 1500 мин⁻¹ - 3,29 м/с. Расчет по формуле III.6 показывает, частота взаимодействия алмаза с забоем изменяется в пределах от 696 Гц (при размере алмаза 1250 мкм и окружной скорости движения 0,87 м/с) до 28938 Гц (при размере алмаза 160 мкм и окружной скорости движения 4,63 м/с).

Взаимодействие алмаза с забоем носит динамический характер, поэтому каждый акт взаимодействия будет сопровождаться излучением акустического сигнала, а во временной области будет фиксироваться последовательность импульсов.

Рядом исследователей в области физики разрушения твердых тел установлено явление излучения акустических волн, обусловленное возникновением и раз-

втием дефектов структуры материалов при их деформации и разрушении [29]. Это явление получило название акустическая эмиссия или эмиссия волн напряжений. Акустические сигналы с частотным диапазоном в десятки килогерц зафиксированы и при разрушении горных пород [17, 23, 53, 62, 75, 76]. Исследования микроструктуры образцов горных пород, подвергшихся деформации, подтвердили, что источником акустических сигналов является процесс образования и развития трещин. При неограниченном сжатии монолитов горных пород диапазон спектра акустической эмиссии достигает 50 кГц, но основная энергия в спектре находится в диапазоне до 20 кГц [76]. R. M. Kosinski, W. M. McCabe и A. E. Lord установили, что изменение акустических эмиссионных спектров отражает ход развития аварийных процессов в горной породе [75]. Возникновение трещин в зоне примыкающей к забою подтверждено методом люминесцентной дефектоскопии, поэтому можно с уверенностью утверждать о существовании при бурении сигнала акустической эмиссии.

Взаимодействие алмазов с забоем и развитие трещин в горной породе, примыкающей к забою, можно считать основными источниками акустического шума разрушения. Диапазон акустического шума разрушения смещен в высокочастотную область спектра (до 30 кГц и выше), а амплитуда колебаний, в силу микроуровня процессов, невелика.

Глава II. АКУСТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ

§ 1. Основы акустико-спектральной диагностики механизма разрушения

Техническая диагностика - отрасль знаний, исследующая технические состояния объектов диагностирования и проявления технических состояний, разрабатывающая методы их определения, а также принципы построения и организацию использования систем диагностирования [36].

Актуальность проблемы диагностики механизма разрушения горных пород при бурении заключается в необходимости резкого увеличения информации о забойных процессах без увеличения времени эксперимента. Новый подход к исследованию забойных процессов заключается в рассмотрении механизма разрушения в качестве объекта диагностирования.

Акустический сигнал, измеренный в призабойной зоне бурящейся скважины, является следствием различных физических процессов, протекающих на забое. Из-за различий в масштабности, кинематических и динамических особенностей процессов акустические сигналы различаются по частоте и амплитуде. Поэтому акустический спектр является комплексным источником информации о частоте и амплитуде вибраций колонны, колебаний коронки и аварийных процессах, протекающих в горной породе при разрушении. Изучение акустического спектра включает спектральный анализ частоты и уровня дискретных составляющих и отдельных частотных диапазонов, выявление их принадлежности к определенным забойным процессам, установление причин появления и закономерностей изменения.

Возможность регистрации акустического поля (как и любого сигнала содержащего информацию) на некотором расстоянии от точки возникновения, зависит от его начальной величины, затухания при распространении и уровня помех в точке приема. Экспериментальные исследования затухания акустических колебаний в горных породах и бурильных трубах показали резкое увеличение затухания с ростом частоты колебаний [6, 26, 46]. Вследствие высокого затухания, колебания частотой свыше 5 кГц распространяются от забоя на расстояния не превышающие десятков метров. Поэтому для измерения всего спектра колебаний датчик необходимо устанавливать в призабойную зону, в которой регистрация сигнала возможна без существенной потери информации.

При рассмотрении механизма разрушения в качестве объекта диагностирования, а акустических спектров, как носителя диагностической информации, возникают признаки нового научного направления – акустико-спектральной диагностики механизма разрушения (аббревиатура АСДМР).

Предметом изучения АСДМР являются закономерности изменения акустических спектров от состояния алмазного инструмента, режима бурения, свойств горных пород. Сущность проблемы АСДМР состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки механизма разрушения по параметрам акустического спектра. Назначением АСДМР является оценка степени отклонения механизма разрушения от нормы по изменению акустических спектров.

Механизм разрушения можно рассмотреть, как некий преобразователь P параметров его состояния s_i в параметры акустического поля u_i :

$$\{U\} = P \{R\} \quad (II.1)$$

где $\{U\} = \{u_1^{(0)}, u_2^{(0)}, \dots, u_n^{(0)}\}$ – вектор признаков состояния механизма разрушения в n -мерном признаковом пространстве; $\{R\} = \{s_1^{(0)}, s_2^{(0)}, \dots, s_m^{(0)}\}$ – m -мерный вектор диагностируемых параметров состояния.

Задачей АСДМР можно считать получение обратной к (II.1) зависимости:

$$\{R\} = P^{-1} \{U\} \quad (II.2)$$

когда на основе установленных диагностических признаков необходимо сделать вывод о параметрах состояния механизма разрушения.

Предложим терминологию АСДМР.

Состояние механизма разрушения – совокупность подверженных изменению свойств, характеризующая в определенный момент времени рядом признаков.

Нормальное состояние механизма разрушения – состояние, при котором происходит углубка скважины и выполняются установленные требования по обеспечению качества керна, ресурса алмазного инструмента и направленности скважины.

Ненормальное состояние механизма разрушения – состояние, при котором происходит углубка скважины, но при этом не выполняются установленные требования по обеспечению качества керна, ресурса алмазного инструмента и направленности скважины.

Использование диагностической информации о механизме разрушения позволяет на качественно новом уровне решать практические задачи по ускоренным испытаниям и оценке качества изготовления породоразрушающего инструмента, дифференциации геологического разреза в процессе бурения, определении прочности и категорий буримости горной породы.

§ 2. Технические средства исследований

Для исследования механизма разрушения горных пород при бурении в ВИТРе созданы измерительные комплексы, включающие стандартную измерительную аппаратуру, а также специализированные датчики, генерирующие электрический сигнал пропорционально действующему на них звуковому давлению в широком диапазоне частот. Схемы исследований в стендовых и полевых условиях показаны на рис. 2.

В состав измерительного комплекса для полевых условий входят: акустический датчик от аппаратуры межскважинного акустического просвечивания АПИ-1, измерительная аппаратура и каротажная станция на базе автомашины ГАЗ-66. Измерительная аппаратура располагается в каротажной станции и состоит из магнитографа Н067, анализатора спектра СК4-56(58), двухкоординатного самописца Н307/2, измерителя шума и вибрации ВШВ-003 и осциллографа С8-13. Датчик помещается в наблюдательную скважину и спускается вниз синхронно с углубкой инструмента в бурящейся скважине (Рис. 2а). Максимальное удаление наблюдательной скважины от бурящейся – 60 м. Глубина исследований ограничивается длиной кабеля на барабане лебедки.

В стендовых условиях измеряются акустические колебания в горной породе и инструменте. Датчики устанавливаются в наблюдательной скважине, пробуренной в блоке горной породы, и в буровом снаряде над колонковой трубой (рис. 2б). Датчик в горной породе, состоит из цилиндрического корпуса, в котором размещены два акустико-электрических преобразователя из пьезокерамики ЦТС-19 и предварительный усилитель. Датчик в буровом снаряде состоит из акустико-электрического преобразователя и УКВ передатчика. Приемная антенна УКВ закрепляется на стенде в непосредственной близости от вращающегося снаряда, а приемник УКВ располагается вместе с регистрирующей аппаратурой, которая не отличается от аппаратуры, применяемой в полевых условиях.

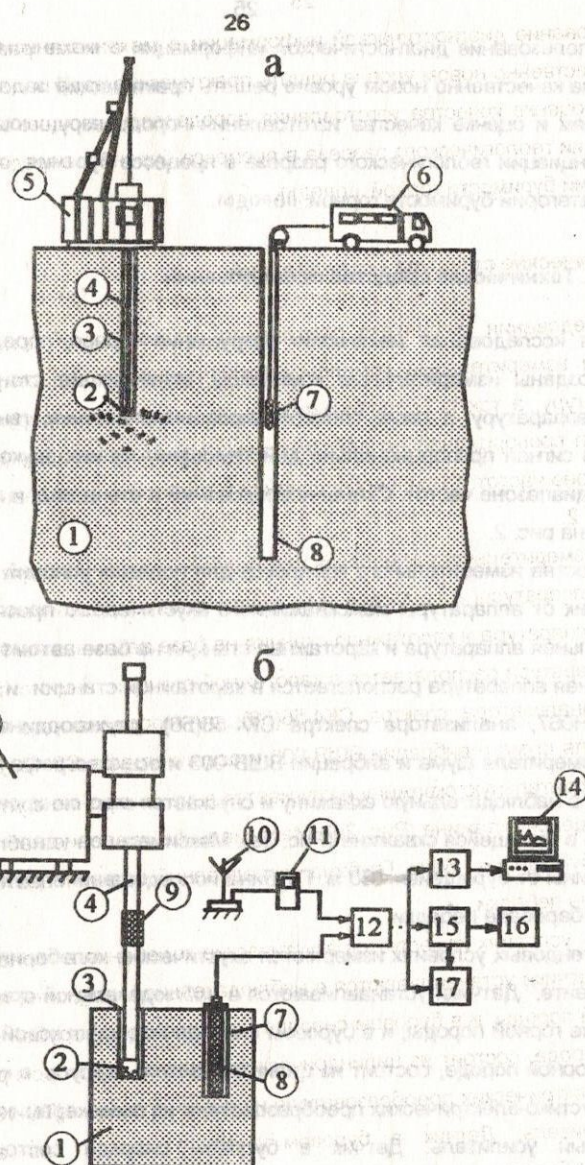


Рис. 2. Схемы исследования колебательных процессов при бурении в полевых (а) и стендовых (б) условиях
 1 - массив (блок) горной породы; 2 - породоразрушающий инструмент; 3 - бурящаяся скважина; 4 - колонна буровых труб; 5 - буровой станок; 6 - передвижная лаборатория; 7 - наблюдательная скважина; 8 - датчик в горной породе; 9 - датчик в инструменте; 10 - антенна; 11 - антенный усилитель; 12 - магнитограф; 13 - устройство ввода-вывода; 14 - ЭВМ; 15 - анализатор спектра; 16 - самописец; 17 - осциллограф.

В лабораторных условиях также применяется численный метод получения спектров. Считывание данных с магнитной ленты и передача дискретных числовых отсчетов в ЭВМ производится с помощью специально разработанного для этих целей устройства. Устройство включает два поочередно работающих аналого-цифровых преобразователя (АЦП), блок питания и программируемый контроллер. Контроллер управляет работой АЦП в соответствии с командами оператора, осуществляет передачу данных из оперативного запоминающего устройства контроллера в память ЭВМ и выдает на терминал информационные сообщения о ходе работы. Управление контроллером и обработка данных осуществляется с помощью ЭВМ. Вычисление спектра оцифрованного аналогового сигнала производится путем выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ). Частота дискретизации исходного сигнала составляет 50 кГц, что обеспечивает верхнюю границу получаемого частотного диапазона не ниже 20 кГц. Спектры рассчитываются по 256 отсчетам исходного сигнала. При БПФ используется окно Хеннинга со свободным параметром $\alpha = 0.5$. Число циклов накопления варьируется от 2 до 40.

Для измерения при бурении осевой нагрузки, частоты вращения снаряда, механической скорости, крутящего момента и расхода промывочной жидкости используется контрольно-измерительная аппаратура КУРС-613. В стендовых условиях, для измерения и записи при бурении тех же параметров также применялась автоматизированная система управления процессом бурения АСУ-ПБ на базе ПЭВМ ДВК-3 и УСО "Электроника" МС 9505. Частота опроса датчиков в системе АСУ-ПБ составляла 50 Гц.

§ 3. Формирование списка диагностических параметров

Для формирования списка необходимых информативных (диагностических) параметров механизма разрушения выполнены экспериментальные производственные и стендовые исследования с использованием акустических и тепловых измерений [8, 9, 64].

Идентификация забойных процессов по частоте акустических колебаний. Типичный спектр звукового давления, зафиксированный в призабойной зоне бурящейся скважины, является сплошным с отдельными дискретными выбросами. Диапазон спектра составляет 0-20 кГц и выше. Характерная особенность спектра выражается в резком уменьшении амплитуды колебаний с ростом частоты. Амплитуды дискретных составляющих на 10-30 дБ превышает уровень сплош-

ного спектра и обусловлены вибрациями бурового снаряда. Наиболее сильно проявляется первая гармоника частоты вращения снаряда.

Методика определения источников акустических сигналов, регистрируемых в призабойной зоне, включала измерения с постепенным запуском механизмов в работу, при холостом вращении снаряда в скважине и бурении полностью изношенными коронками, а также измерения на различном расстоянии от забоя бурящейся скважины. Шум от работы наземного бурового оборудования, в призабойной зоне не зафиксирован, что можно объяснить значительным удалением забоя от поверхности Земли. Основными источниками акустических сигналов в призабойной зоне являются вибрации колонны буровых труб и породоразрушающего инструмента, процесс разрушения горной породы и протекание промывочной жидкости (табл. 1).

Таблица 1

Источники и частотные диапазоны акустических сигналов, регистрируемых в призабойной зоне

Наименование процесса	Причина возникновения колебаний	Частотный диапазон, кГц
Протекание промывочной жидкости на расходах 12-19 дм ³ /мин.	Турбулентность потока, взаимодействие промывочной жидкости с колонной буровых труб и стенками скважины.	0-2
Вибрации колонны буровых труб	Динамический характер взаимодействия колонны со стенками скважины.	
- нормальный режим	Применение качественных буровых труб, жесткое крепление станка, правильный выбор промывочной жидкости и др.	0-7
- вибрационный (крутильные автоколебания, качение)	Применение буровых труб с повышенной кривизной, недостаточная жесткость крепления станка и др.	0-20
Разрушение горной породы	Физическая особенность феномена разрушения	7-20 и выше

В результате исследований впервые доказано, что в области забоя протекает высокочастотный физический процесс с незначительной амплитудой колебаний, следствием которого является возникновение акустического шума разрушения.

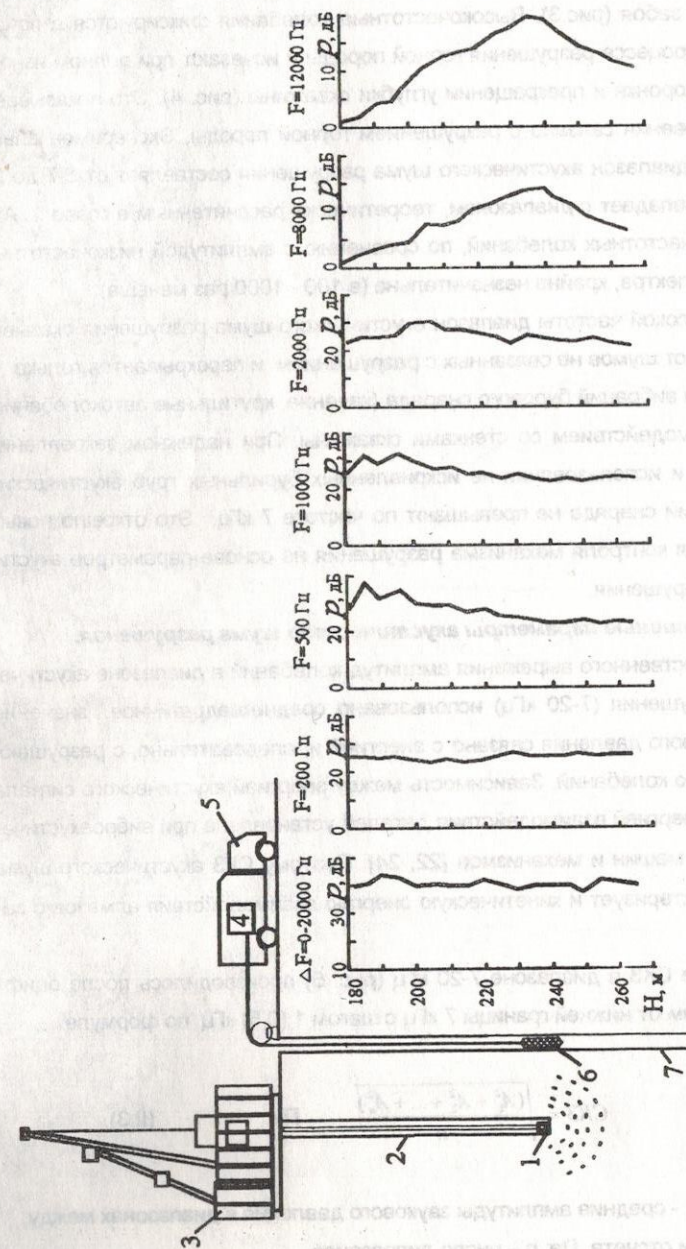


Рис. 3. Зависимости звукового давления P на различных частотах F от глубины H опуска датчика в наблюдательной скважине при бурении бурящейся скважины 239 м
1 - алмазная коронка, 2 - буровая установка, 3 - буровая установка, 4 - измерительная аппаратура, 5 - самоходная лаборатория, 6 - акустический датчик, 7 - наблюдательная скважина.

Амплитуды высокочастотных колебаний (свыше 5-7 кГц) по мере приближения датчика к забою увеличиваются и достигают максимальных значений на минимальных расстояниях от забоя (рис.3). Высокочастотные колебания фиксируются в призабойной зоне в процессе разрушения горной породы и исчезают при полном износе рабочего слоя коронки и прекращении углубки скважины (рис. 4). Это показывает, что их возникновения связано с разрушением горной породы. Экспериментально установленный диапазон акустического шума разрушения составляет от 5-7 до 20 кГц и выше и совпадает с диапазоном, теоретически рассчитанным в главе 1. Амплитуда высокочастотных колебаний, по сравнению с амплитудой низкочастотных составляющих спектра, крайне незначительна (в 100 - 1000 раз меньше).

В силу высокой частоты диапазон акустического шума разрушения оказывается свободным от шумов не связанных с разрушением и перекрывается только при возбуждении вибраций бурового снаряда (качение, крутильные автоколебания) с ударным взаимодействием со стенками скважины. При надежном закреплении бурового станка и использовании не искривленных буровых труб акустические шумы от вибрации снаряда не превышают по частоте 7 кГц. Это открыло новые возможности для контроля механизма разрушения на основе параметров акустического шума разрушения.

Информативные параметры акустического шума разрушения.

Для количественного выражения амплитуд колебаний в диапазоне акустического шума разрушения (7-20 кГц) использовано среднеквадратичное значение (СКЗ). СКЗ звукового давления связано с энергией и, следовательно, с разрушающей способностью колебаний. Зависимость между энергией акустического сигнала и кинетической энергией взаимодействия деталей установлена при виброакустической диагностике машин и механизмов [22, 24]. Поэтому СКЗ акустического шума разрушения характеризует и кинетическую энергию взаимодействия алмазов с забоем.

Вычисление СКЗ в диапазоне 7-20 кГц (рис. 5) производилось после оцифровки спектрограмм от нижней границы 7 кГц с шагом 1 (0,5) кГц по формуле

$$СКЗ = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2}{n}} \quad \text{Па}, \quad (II.3)$$

где: $A_1, A_2, \dots, A_n$ - средние амплитуды звукового давления в диапазонах между соседними точками отсчета, Па; n - число диапазонов.

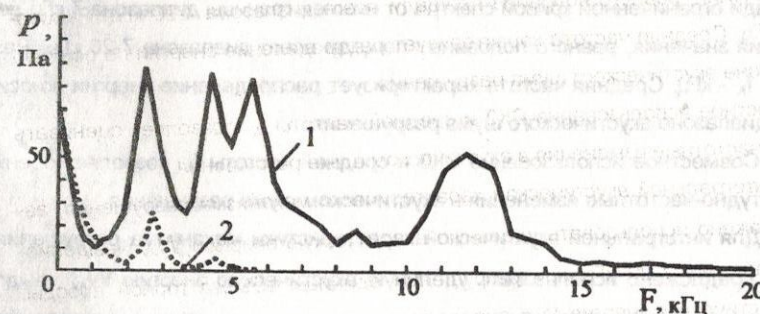


Рис. 4. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении гранита алмазной коронкой ИМВ-3-46 с механической скоростью 1,8 м/с (1) и при полной потере режущих свойств и прекращении углубки скважины (2).

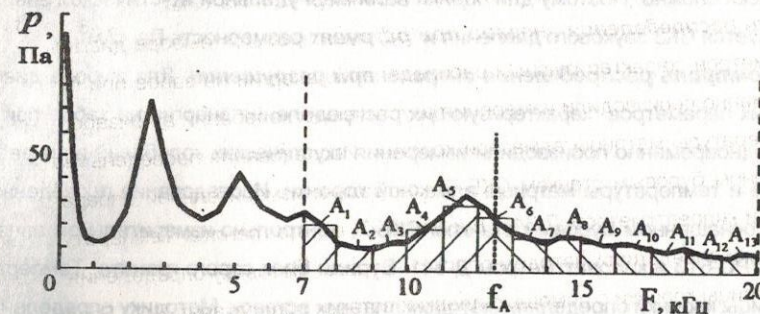


Рис. 5. Спектр звукового давления с выделенным высокочастотным диапазоном 7-20 кГц.

Для характеристики частотных свойств акустического шума разрушения и, связанных с ним частот взаимодействия алмазов с забоем, автором предложено использовать среднюю частоту f_A , разделяющую диапазон 7-20 кГц на две части с равными энергиями (рис. 5). Для нахождения f_A производили суммирование площади ограниченной кривой спектра от нижней границы диапазона 7 кГц до достижения значения, равного половине площади всего диапазона 7-20 кГц. Размерность f_A - кГц. Средняя частота характеризует распределение энергии по оси частот в диапазоне акустического шума разрушения.

Совместное использование СКЗ и средней частоты f_A позволяет оценивать амплитудно-частотные изменения в акустическом шуме разрушения.

Для интегральной акустической характеристики механизма разрушения, автором предложено использовать удельную акустическую энергию W_{AV} , выделившуюся в диапазоне 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы. Удельная акустическая энергия W_{AV} определяется по формуле:

$$W_{AV} = \frac{W_A}{V} = \frac{W_A t}{V} \quad \text{Дж/м}^3, \quad (II.4)$$

где: W_A - мощность акустического шума разрушения, Вт; v - объемная скорость разрушения горной породы, м³/с; t - длительность процесса разрушения, с; V - объем разрушенной породы, м³

Непосредственно измерять акустическую мощность при бурении оказалось технически сложно. Поэтому для оценки величины удельной акустической энергии, используется СКЗ звукового давления и W_{AV} имеет размерность Па·с/м³.

Контроль распределения энергии при разрушении. Для выбора диагностических параметров, характеризующих распределение энергии на забое при бурении, одновременно производили измерения акустических колебаний в призабойной зоне и температуры матрицы алмазной коронки. Исследования проведены на стенде, оснащенный буровым станком СКБ-7, контрольно-измерительной аппаратурой КУРС-613 и киловаттметром Д-341. Бурили блок серого гранита. Температуру матрицы коронки определяли методом плавких вставок. Методику определения температуры матрицы коронки с помощью плавких вставок предоставил В. Г. Гореликов, совместно с которым была проведена часть исследований, результаты которых обобщены в работе [9]. Вставки зачеканивали в глухие отверстия, просверленные в торце однослойной алмазной коронки типа А4ДП. Одновременно в

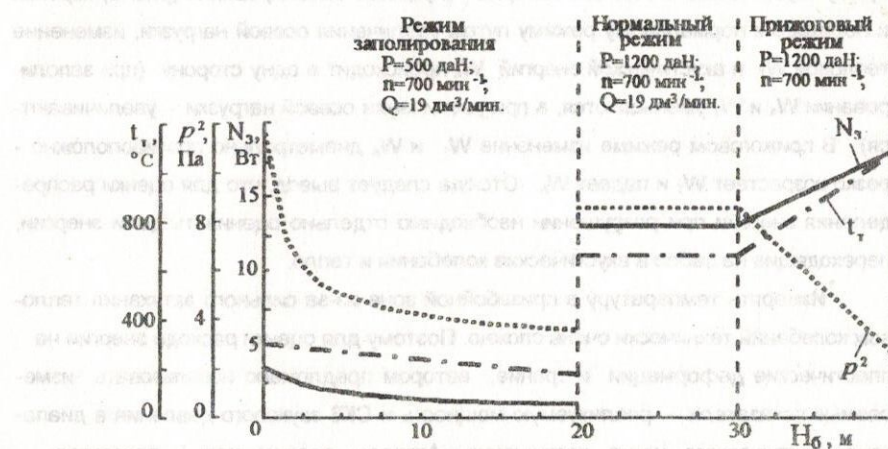


Рис. 6. Зависимости забойной мощности N_z , СКЗ звукового давления P^2 в призабойной зоне и температуры t торца однослойной алмазной коронки от режима и глубины H_b бурения.

коронке находилось четыре вставки из материалов с различной температурой плавления: олова - 232°C, свинца - 328°C; алюминия - 660°C; меди - 1085°C. Состояние плавких вставок анализировали после каждого рейса. Распределение энергии на забое оценивали по изменению СКЗ звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения и температуры торца коронки в трех технологических ситуациях: заполировании, нормальном режиме и прижоге алмазной коронки (рис. 6).

Экспериментальные исследования в целом подтвердили упрощенную формулу (1.2) баланса энергии, выражающую энергию, подведенную к забою, через сумму акустической и тепловой энергий. В режиме заполирования (рис. 6) коронки и переходе к нормальному режиму путем увеличения осевой нагрузки, изменение тепловой W_T и акустической энергий W_A происходит в одну сторону (при заполировании W_A и W_T уменьшаются, а при увеличении осевой нагрузки - увеличиваются). В прижоговом режиме изменение W_T и W_A диаметрально противоположно - резко возрастает W_T и падает W_A . Отсюда следует вывод, что для оценки распределения энергии при разрушении необходимо отдельно оценивать доли энергии, переходящие на забое в акустические колебания и тепло.

Измерять температуру в призабойной зоне из-за сильного затухания тепловых колебаний технически очень сложно. Поэтому для оценки расхода энергии на пластические деформации и трение, автором предложено использовать измеряемые показатели - реализуемую мощность и СКЗ звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения. Автором введен новый показатель - "коэффициент распределения энергии при разрушении", определяемый как отношение акустической мощности W_A в диапазоне частот 7-20 кГц к реализуемой мощности N_3 .

$$K_p = \frac{W_A}{N_3} \quad (II.5)$$

Коэффициент K_p является безразмерной величиной при использовании значений W_A и N_3 в ваттах. При использовании вместо мощности СКЗ звукового давления K_p имеет размерность Па/Вт.

В целом список необходимых диагностических параметров механизма разрушения выглядит следующим образом:

- а) акустический спектр в диапазоне 0-20 кГц и выше;
- б) информативные параметры акустического шума разрушения: СКЗ звукового давления и средняя частота f_A диапазона 7-20 кГц;
- в) удельная акустическая энергия W_{Av} , выделявшаяся при разрушении единицы объема горной породы в диапазоне частот 7-20 кГц;
- г) коэффициент распределения энергии при разрушении K_p .

Способы контроля термодинамических условий разрушения на основе информативных параметров механизма разрушения защищены в патентах РФ [48, 49].

Глава III. ПРИЧИНЫ ИЗНОСА И ПРОГНОЗ РЕСУРСА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ БУРЕНИИ

§ 1. Износ единичного алмаза с позиции теории усталости

Импульсный характер нагружения единичного алмаза при бурении позволяет подойти к его разрушению с позиции теории усталости. Ресурс единичного алмаза может быть выражен в числе циклов нагружения. Рассмотрим цикл изменения напряжений в алмазе. Циклом напряжения назовем однократную смену напряжений в алмазе в течение полного периода их изменений. Цикл напряжения характеризуется следующими величинами: максимальным напряжением $\sigma_{\max}$, минимальным напряжением $\sigma_{\min}$, средним напряжением $\sigma_{\text{ср}}$, коэффициентом асимметрии r и периодом T (рис. 7а). Коэффициентом асимметрии называют отношение наибольшего напряжения цикла к наименьшему. Так как после скола частицы горной породы алмаз некоторое время движется не встречая сопротивления, то соответственно и напряжения в нем в этот период равны нулю. Поэтому цикл изменения напряжений в алмазе будет пульсационным или односторонним, т.е. минимальные напряжения и коэффициент асимметрии равны нулю.

Внутренняя структура алмазов, используемых для армирования породоразрушающего инструмента, не однородна. Алмаз можно рассматривать как мелкокристаллический конгломерат со случайной ориентировкой кристаллитов. В зависимости от ориентировки кристаллографических осей у кристаллитов будут изменяться упругие свойства, т.е. будет наблюдаться анизотропия. При деформировании алмаза в процессе взаимодействия с забоем напряжения в отдельных кристаллитах будут отличаться друг от друга. В результате возникнет пластическая деформация отдельных кристаллитов, следствием которой станут необратимые потери энергии. Пластические деформации обуславливают перераспределение напряжений от внешних усилий и остаточных напряжений при последующих циклах нагружения. За счет этого в алмазе появляются дефекты структуры (микротрещины и др.). По мере возрастания числа циклов, объем повреждений внутренней структуры растет и в какой-то момент произойдет разрушение алмаза.

Очевидно, что для алмаза, как и для любой детали или материала, работающих при переменных нагрузках, существует зависимость между напряжением и числом циклов. Чем выше напряжения, возникающие в алмазе, тем меньше циклов он может выдержать. Примерная зависимость числа N циклов перемен напря-

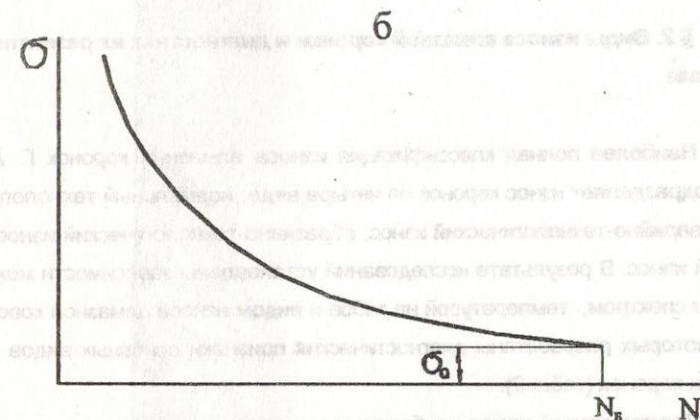
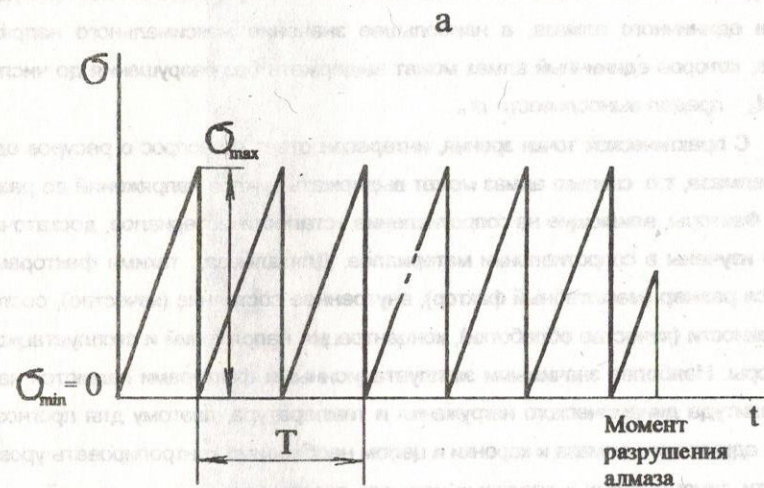


Рис. 7. Схема изменения напряжений σ , испытываемых единичным алмазом во времени t (а) и предполагаемая кривая усталости алмаза (б).

жений, которые алмаз выдерживает до разрушения, от наибольшего напряжения σ в цикле показана на рис. 76. Зависимость $N = f(\sigma)$ представляет кривую усталости единичного алмаза, а наибольшее значение максимального напряжения цикла, которое единичный алмаз может выдержать без разрушения до числа циклов N_k - предел выносливости σ_0 .

С практической точки зрения, интересен ответ на вопрос о ресурсе единичного алмаза, т.е. сколько алмаз может выдержать циклов напряжений до разрушения. Факторы, влияющие на сопротивление усталости материалов, достаточно хорошо изучены в сопротивлении материалов. Для алмаза, такими факторами являются размер (масштабный фактор), внутреннее состояние (качество), состояние поверхности (качество обработки), концентрация напряжений и эксплуатационные факторы. Наиболее значимыми эксплуатационными факторами являются частота и амплитуда динамического нагружения и температура, поэтому для прогноза ресурса единичного алмаза и коронки в целом необходимо контролировать уровень и частоту динамических и тепловых нагрузок воспринимаемых матричной композицией.

§ 2. Виды износа алмазной коронки и диагностика их развития при бурении

Наиболее полная классификация износа алмазных коронок Г. А. Блинова [44] подразделяет износ коронок на четыре вида: нормальный технологический износ, аварийно-технологический износ, абразивно-технологический износ и механический износ. В результате исследований установлены зависимости между акустическим спектром, температурой на забое и видом износа алмазной коронки, на основе которых разработаны диагностические признаки основных видов износа алмазных коронок (табл. 2).

Равномерный износ наиболее характерен для режима равномерного вращения коронки. При равномерном износе импрегнированных коронок, информативные параметры механизма разрушения в течение всего времени бурения до полного износа рабочего слоя коронки остаются постоянными.

Прижог коронки связан с количеством выделяющегося тепла и возникает в результате увеличения температуры торца коронки выше критических значений (свыше 1000-1100 °C). При развитии прижога коронки автором выделено две зоны: предприжог и собственно прижог. Зона предприжога характеризуется кратковре-

менным повышением эффективности разрушения породы, за счет привлечения к разрушению тепла, которое в обычных условиях уносится промывочной жидкостью, и резким увеличением интенсивности износа коронки (в 10-100 раз). Зона предприжога диагностируется по увеличению СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц (в 2-3 раза) и коэффициента K_p . Собственно прижог диагностируется по резкому уменьшению СКЗ и K_p .

Таблица 2
Диагностические признаки основных видов износа алмазных коронок

Характерные признаки износа	Основные причины износа	Диагностические признаки
Нормальный технологический износ		
Равномерный износ коронки по высоте и боковым поверхностям	Температура и динамические нагрузки в пределах допустимых значений	Отсутствие в акустическом спектре признаков вибрационного режима. Отсутствие изменений в акустическом спектре и значениях коэффициента K_p при бурении (для импрегнированных коронок).
Аварийно-технологический износ		
Прижог	Увеличение температуры торца коронки выше критических значений	Предприжог: Увеличение СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц (в 2-3 раза) и K_p (в 2-3 раза) Прижог: резкое уменьшение СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц (более 10 раз) и K_p (в 10-100 раз)
Абразивно-технологический износ		
Заполирование алмазов	Низкие температура торца коронки и динамические нагрузки на алмаз.	Одновременное плавное уменьшение СКЗ звукового давления и средней частоты f_d в диапазоне 7-20 кГц акустического спектра и увеличение K_p .
Образование борозд и фасок, скол алмазов	Увеличение динамических нагрузок на алмаз выше критических значений	Появление в акустическом спектре максимумов амплитуды на частоте вибраций; распространение гармоник в область высоких частот; увеличение СКЗ во всем диапазоне спектра.

Типичным примером является развитие прижога коронки ИМБ-3-46 при бурении гранита при осевой нагрузке $P=1200$ даН, $n=640$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. Нормальное бурение происходило в интервале до 35 см по глубине скважины. В

этой зоне спектр звукового давления в призабойной зоне (рис. 8а) имеет характерную для нормального бурения форму с уменьшением амплитуд колебаний с ростом частоты, а технические показатели бурения практически не изменяются (рис. 9). Коэффициент распределения энергии равен $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па/Вт, интенсивность износа коронки - 1,43 мм/м.

Зона *предприжога* занимает интервал 35-40 см по глубине скважины и характеризуется следующими изменениями в измеряемых параметрах. В спектре звукового давления (рис. 8б) выросло СКЗ в диапазоне акустического шума разрушения (в диапазоне 7-20 кГц), а низкочастотный диапазон до 7 кГц практически не изменился. Увеличилась механическая скорость бурения и коэффициент распределения энергии (до $15,7 \cdot 10^{-3}$ Па/Вт). Реализуемая мощность не изменилась, а удельная энергоёмкость бурения уменьшилась (рис. 9). Интенсивность износа коронки ИМВ-3-46 в зоне *предприжога* выросла в 56 раз (до 80 мм/м).

Зона *прижога* начинается с глубины 40 см. В спектре звукового давления (рис. 8в) исчезли высокочастотные колебания и резко уменьшились амплитуды колебаний в низкочастотном диапазоне. СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц уменьшилась до минимальных значений. Коэффициент распределения энергии уменьшился до $0,2 \cdot 10^{-3}$ Па/Вт (в 78 раз). Реализуемая мощность и удельная энергоёмкость бурения резко выросли, а механическая скорость бурения упала. После отметки 45 см по глубине скважины процесс углубки практически прекратился.

После окончания бурения установлено, что алмазная коронка полностью потеряла рабочий слой. Износ коронки по высоте составил около 10 мм. Состояние коронки типично для высокотемпературного износа и характеризуется следующими признаками: материал матрицы наполоз на корпус коронки; промывочные окна отсутствуют; поверхность торца гладкая, темно-медного цвета; на торце коронки отмечены четыре радиальные трещины. Внутри коронки находился "сахаровидный", сильно трещиноватый керн, который при выбивании интенсивно крошился. После выбивания керна на прилегающей к внутренней поверхности коронки обнажился слой стекловидной массы с толщиной до 3 мм.

С позиции АСДМР механизм разрушения горной породы при развитии *прижога* коронки реконструируется следующим образом. После прекращения циркуляции промывочной жидкости, тепло, которое ранее поглощалось промывочной жидкостью, остается в зоне забоя и вызывает увеличение забойной температуры. Возникает зона *предприжога* коронки, в которой, за счет изменения теплового баланса,

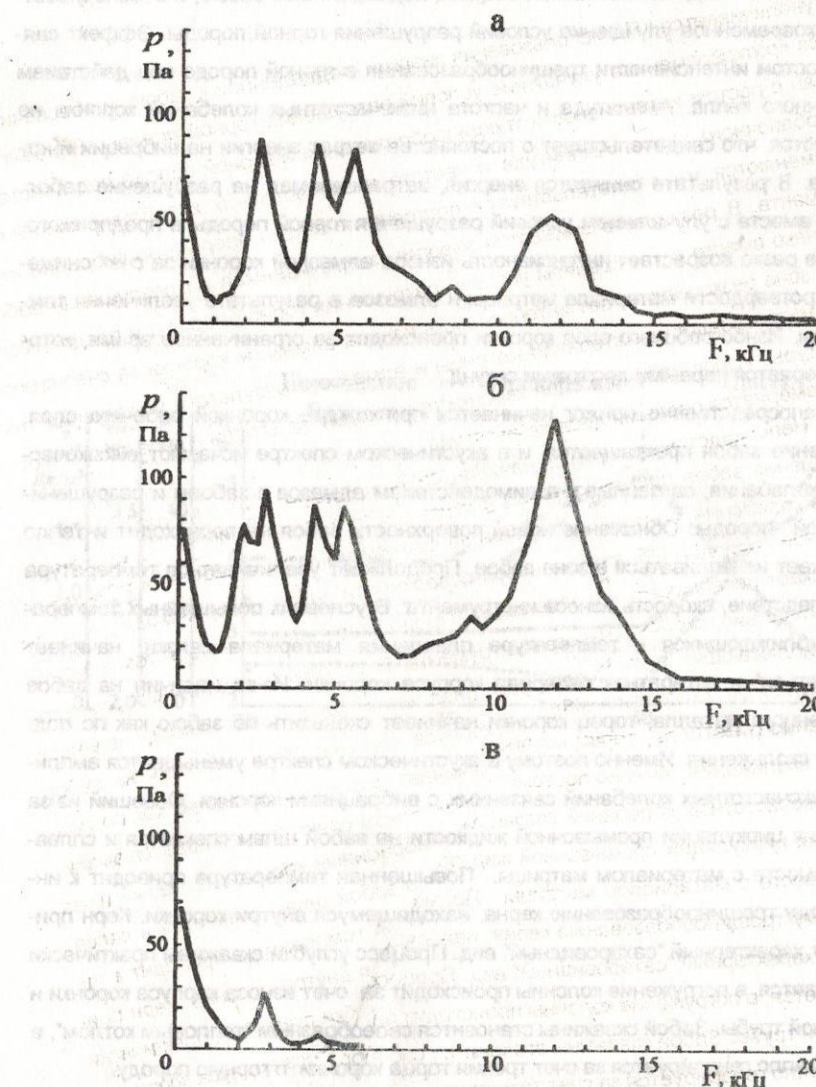


Рис. 8. Спектры звукового давления в призабойной зоне в процессе *прижога* алмазной коронки ИМВ-3-46
а - глубина бурения 0,35 м; б - глубина бурения 0,4 м;
в - глубина бурения 0,45 м.

увеличивается КПД использования энергии, подведенной к забою, и обеспечивается кратковременное улучшение условий разрушения горной породы. Эффект связан с ростом интенсивности трещинообразования в горной породе под действием добавочного тепла. Амплитуда и частота низкочастотных колебаний коронки не изменяются, что свидетельствует о постоянстве затрат энергии на вибрации инструмента. В результате снижается энергия, затрачиваемая на разрушение забоя. Однако вместе с улучшением условий разрушения горной породы в предприжоговой зоне резко возрастает интенсивность износа алмазной коронки за счет снижения микротвердости материала матрицы и алмазов в результате увеличения температуры. Износ рабочего слоя коронки происходит за ограниченное время, которое измеряется первыми десятками секунд.

Непосредственно прижог начинается при потере коронкой рабочего слоя. Разрушение забоя прекращается, и в акустическом спектре исчезают высокочастотные колебания, связанные с взаимодействием алмазов с забоем и разрушением горной породы. Обнажение новой поверхности забоя не происходит и тепло продолжает накапливаться в зоне забоя. Продолжает увеличиваться температура и, как следствие, скорость износа инструмента. В условиях повышенных температур, приближающихся к температуре плавления материала связки, начинает "смазываться" и затираться материал корпуса коронки. Из-за наличия на забое размягченного металла, торец коронки начинает скользить по забою как по подшипнику скольжения. Именно поэтому в акустическом спектре уменьшается амплитуды низкочастотных колебаний связанных с вибрациями коронки. Осевший из-за отсутствия циркуляции промывочной жидкости на забой шлам спекается и сплавляется вместе с материалом матрицы. Повышенная температура приводит к интенсивному трещинообразованию керна, находящегося внутри коронки. КERN приобретает характерный "сахаровидный" вид. Процесс углубки скважины практически прекращается, а погружение колонны происходит за счет износа корпуса коронки и колонковой трубы. Забой скважины становится своеобразным "тепловым котлом", в котором тепло генерируется за счет трения торца коронки о горную породу.

Большие диапазоны изменения мощности акустического шума разрушения и коэффициента распределения энергии показывают высокую чувствительность АСДМР при диагностике прижоговой ситуации. В настоящее время АСДМР является единственным методом определения предприжого коронки, так как киловаттметр, обладает низкой чувствительностью и может использоваться только для диагностики непосредственно прижого.

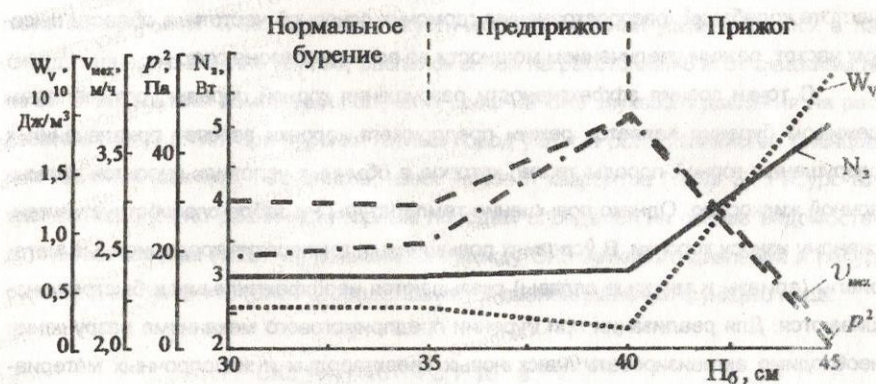


Рис. 9. Зависимости забойной мощности N_z , СКЗ звукового давления P^2 в призабойной зоне, механической скорости бурения V_{max} и удельной энергоёмкости W_v от глубины бурения H_g в процессе прижого алмазной коронки ИМВ-3-46.

Заполирование алмазов развивается в условиях низких температур торца коронки (200-300 °С) и динамических нагрузок, воспринимаемых алмазами. Заполирование диагностируется по одновременному плавному уменьшению СКЗ звукового давления и средней частоты f_d в высокочастотном диапазоне акустического спектра и увеличению коэффициента K_p .

Образование борозд и фасок на торце коронки, а также скол выступающих алмазов связаны с аномально высокими динамическими нагрузками, возникающими преимущественно в режимах качения и крутильных автоколебаний коронки. Режимы, сопровождающиеся развитием борозд и фасок на торце коронки, диагностируются по появлению в акустическом спектре максимумов амплитуды на частоте колебаний, распространению гармоник основной частоты в область высоких частот, резким увеличением мощности во всем диапазоне спектра.

С точки зрения эффективности разрушения горной породы оптимальным режимом бурения является режим предприжога коронки за счет привлечения к разрушению горной породы тепла, которое в обычных условиях уносится промывочной жидкостью. Однако повышение температуры на забое способствует интенсивному износу коронки. В условиях повышенных температур традиционные материалы (алмазы и твердые сплавы) оказываются неэффективными и быстро изнашиваются. Для реализации при бурении предприжогового механизма разрушения необходимо активизировать поиск новых сверхтвердых и жаропрочных материалов.

§ 3. Прогноз ресурса и кривая износостойкости алмазной коронки

Специфика бурения как технологического процесса заключается в недоступности непосредственного измерения нагрузок на контакте пары коронка - порода. При достаточном охлаждении коронки, что по данным П. Н. Курочкина и ряда других исследователей достигается уже при минимальном расходе промывочной жидкости, износ алмазов и коронки в целом связан, в основном, с динамическими нагрузками. Поэтому решение проблемы прогноза ресурса алмазной коронки при бурении заключается в разработке способа оценки уровня динамических нагрузок, воспринимаемых алмазами при взаимодействии с забоем.

Исследование отработки алмазных коронок вместе с измерением звукового давления в призабойной зоне бурящихся скважин на ряде месторождений Карело-Кольского региона и Донбасса позволили установить существование зависимости

между СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц и ресурсом N_k алмазных коронок. Для большинства алмазных коронок зависимость между ресурсом и СКЗ звукового давления в призабойной зоне представляет экспоненциальную функцию вида $y = a \cdot e^{-b \cdot x}$. С ростом СКЗ звукового давления ресурс алмазной коронки уменьшается по экспоненциальной зависимости.

Бурение на участке шахты Центральная - Новая (Донбасс) осуществлялось алмазными коронками 01А2-112. Для бурения использовали буровой станок ЗИФ-650М и колонну бурильных труб диаметром 50 мм с муфто - замковым соединением. Частота вращения снаряда изменялась в пределах 136 - 435 мин⁻¹; осевая нагрузка 800 - 1000 даН. При бурении измеряли звуковое давление в призабойной зоне скважины № 4788. Приемник акустических колебаний устанавливался в наблюдательной скважине № 4790, расположенной на расстоянии 6 м от скважины № 4788. В результате измерений получены средние СКЗ звукового давления на расстоянии 6 м от забоя при бурении горных пород участка работ: глинистых сланцев, песчаных сланцев, песчаников, известняков и кварцитов (табл. 3). Ресурс алмазных коронок по различным горным породам определен на основе ведомостей отработки коронок (табл. 3). Зависимость между СКЗ звукового давления и ресурсом коронки 01А2-112 (рис.10) представляет экспоненциальную функцию вида:

$$СКЗ = 4,1 \cdot 10^{-4} + 3,1 \cdot 10^{-3} e^{-(N_k^{4/15,2})}$$

Таблица 3

СКЗ звукового давления в призабойной зоне и ресурс алмазных коронок на участке шахты Центральная - Новая (Донбасс)

Горная порода	СКЗ звукового давления в призабойной зоне, Па	Средний ресурс коронки, м
Глинистый сланец	0,00041	59
Песчаный сланец	0,00069	38
Песчаник	0,00152	17
Известняк	0,00175	20
Кварцит	0,0035	4

Установленная зависимость между СКЗ звукового давления и ресурсом коронки позволяет прогнозировать ресурс коронки при бурении на основе акустических измерений в призабойной зоне.

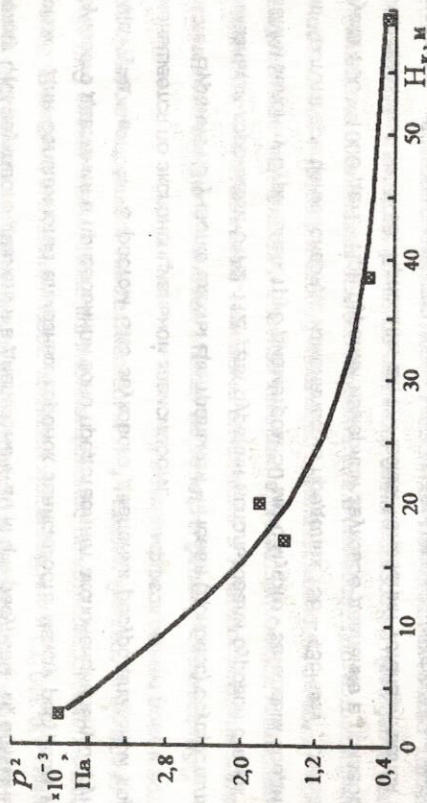


Рис. 10. Зависимость между СКЗ звукового давления P^2 в призабойной зоне и ресурсом H_k алмазной коронки 01А4-112 при бурении на участке шахты Центральная - Новая (Донбасс).

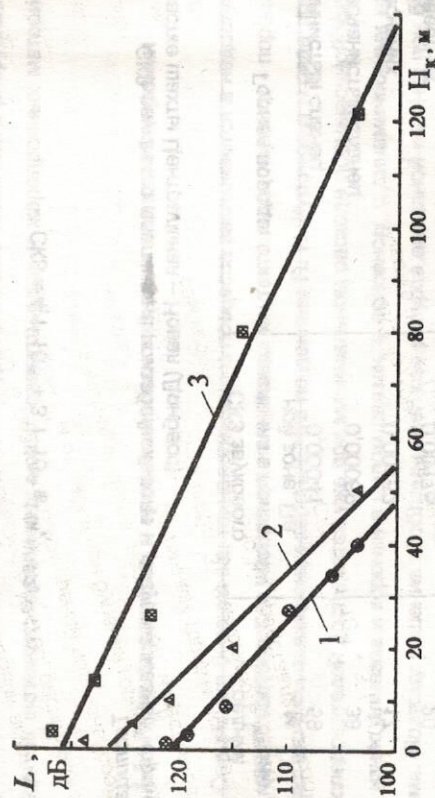


Рис. 11. Зависимости между уровнем звукового давления L в призабойной зоне и прогнозным ресурсом H_k алмазных коронки ИЖ (1), И6ДХ (2) и И4ДП (3) при бурении гранита в стендовых условиях

На практике изменение СКЗ звукового давления удобно измерять по логарифмической шкале в дБ относительно нулевого уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Зависимость $L = f(H_k)$ в полупараметрическом масштабе является линейной функцией вида $L = b + k \cdot H_k$ (рис. 11). Коэффициенты b и k характеризуют износостойкость алмазной коронки, которая определяется конструктивными параметрами коронки и, прежде всего, качеством алмазов и твердостью матрицы. Коэффициент b показывает условный уровень СКЗ звукового давления при котором ресурс коронки равен нулю. Коэффициент k , названный автором коэффициентом износостойкости алмазной коронки, характеризует интенсивность износа коронки и равен:

$$k = \frac{L}{H_k} \text{ дБ/м.} \quad (\text{III.1})$$

Наименьший коэффициент износостойкости равный 0,22 дБ/м из испытанных коронок имеет коронка И4ДП, что можно связать с высокой твердостью матрицы. Коэффициент k коронки И6ДХ равен 0,49, а коронки ИЖ - 0,43 дБ/м.

Измеряя при бурении уровень звукового давления в призабойной зоне, можно с достаточной точностью прогнозировать ресурс коронки на различных режимах и в горных породах, предварительно проведя тарировочное бурение и установив коэффициент износостойкости k для конкретной коронки. При внедрении в практику бурения забойных систем, позволяющих измерять и передавать на поверхность параметры высокочастотных вибраций коронки, станет возможно прогнозировать остаточный ресурс коронки и управлять процессом ее износа путем регулирования режима бурения.

Для алмазной коронки, испытывающей при бурении циклические нагрузки, необходимо определение характеристики стойкости к переменным напряжениям. Указанная характеристика может быть использована для оценки работоспособности коронки и выбора условий ее эксплуатации. Назовем эту характеристику "кривая износостойкости" алмазной коронки. По оси ординат на кривой износостойкости должен откладываться параметр, характеризующий динамическую нагрузку, воспринимаемую алмазами при бурении, по оси абсцисс - параметр, характеризующий ресурс коронки при данной нагрузке.

С помощью акустических измерений в призабойной зоне "кривая износостойкости" алмазной коронки может быть получена в стендовых условиях. "Кривая износостойкости" представляет зависимость $L = f(H_k)$ и показывает ресурс коронки при конкретных значениях СКЗ звукового давления. По оси ординат

на кривой износоустойчивости откладывается уровень СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц, по оси абсцисс прогнозный ресурс алмазной коронки, рассчитываемый по измеренной интенсивности износа J коронки (рис. 11).

Для построения кривой износоустойчивости производится тарировочное бурение на двух режимах. Рекомендуемое сочетание режимных параметров: $P=1500$ даН, $n=500$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин и $P=1000$ даН, $n=700$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин. Объем бурения на каждом режиме - два метра (3 - 5 рейсов длиной 0,4 м). При бурении измеряются спектры звукового давления в призабойной зоне, механическая скорость бурения и износ коронки по высоте. Для определения износа коронки перед началом бурения и после каждого рейса с помощью профилометра ПИК измеряется высота коронки. Измерения производятся на всех секторах коронки в трех профилях, расположенных в центральной, набегавшей и сбегавшей частях сектора. В профиле обмеряются точки, расположенные на пяти диаметрах. Для коронки диаметром 59 мм измерения рекомендуются проводить на диаметрах 44, 48, 51, 54 и 57 мм. По результатам измерений определяется средний износ коронки по высоте за рейс. Износ коронки на режиме определяется как среднее по всем рейсам. Интенсивность износа коронки рассчитывается путем деления износа коронки на величину проходки. Прогнозный ресурс коронки H_k рассчитывается по формуле:

$$H_k = \frac{h_m}{J} \quad \text{м,} \quad (III.2)$$

где h_m - высота алмазосодержащего слоя коронки, мм; J - интенсивность износа коронки, мм/м.

Акустические спектры и механическая скорость измеряются через 5 см по глубине скважины. По спектрам рассчитывается СКЗ звукового давления в призабойной зоне. Значения СКЗ звукового давления и механической скорости усредняются по всем измерениям.

Для построения кривой износоустойчивости по оси ординат откладывается уровень СКЗ звукового давления в дБ, по оси абсцисс - прогнозный ресурс коронки. В результате получается график аналогичный графикам, приведенным на рис. 11. По кривой износоустойчивости также можно определить прогнозные ресурсы коронки на различных режимах, измеряя при бурении уровень СКЗ звукового давления. Использование кривой износоустойчивости за счет возможности прогноза ресурса коронки на различных режимах позволяет избежать длительных ресурсных испытаний.

Глава IV. ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ БУРЕНИЯ

§ 1. Диагностика вида движения алмазной коронки

В значительном числе отечественных и зарубежных исследований делается вывод о связи показателей бурения с вибрациями бурового снаряда [11, 67, 68, 81]. Теоретическое обоснование возникновения отдельных видов движения бурового снаряда при алмазном бурении содержится в работах В. Н. Алексеева и Н. Н. Михеева. Характер вибраций коронки при бурении непосредственно связан с вибрациями бурового снаряда и, в значительной степени, определяет вид ее износа.

Поэтому диагностика в процессе бурения характера вибраций коронки и, связанного с ним вида движения коронки, имеет важное практическое значение. В настоящее время выделено несколько видов движения коронки: равномерное вращение, качение и крутильные автоколебания [2, 53].

Назовем устойчивое существование определенного вида движения коронки во времени - режимом работы алмазной коронки. Диагностические признаки основных режимов работы (табл. 4) сформированы в результате типизации акустических спектров, зафиксированных в призабойной зоне. Различные режимы работы коронки создавались изменением осевой нагрузки и частоты вращения, а также использованием изношенных алмазных корон. Возникновение режима контролировалось по изменению крутящего момента, реализуемой мощности и акустического спектра. Часть исследований выполнена совместно с сотрудниками сектора автоматизации процесса бурения ВИТР В. И. Васильевым, С. А. Серовым и И. Л. Заборским, а полученные результаты опубликованы в работе [8].

Каждому режиму работы коронки соответствует оригинальный акустический спектр. Выделено 3 основных типа акустических спектров, соответствующих режимам равномерного вращения, качения и крутильных автоколебаний (рис. 12).

Коронка при бурении может испытывать крутильные колебания двух видов - низкочастотные и высокочастотные. Частота низкочастотных крутильных колебаний связана с частотой вращения снаряда, находится в пределах 0-100 Гц и совпадает с частотой колебаний крутящего момента. Высокочастотные крутильные колебания в диапазоне 2000-5000 Гц, впервые выделены по акустическим спектрам, так как штатный комплект контрольно-измерительной аппаратуры имеет частотный диапазон ограниченный первыми десятками герц. Механизм возникновения

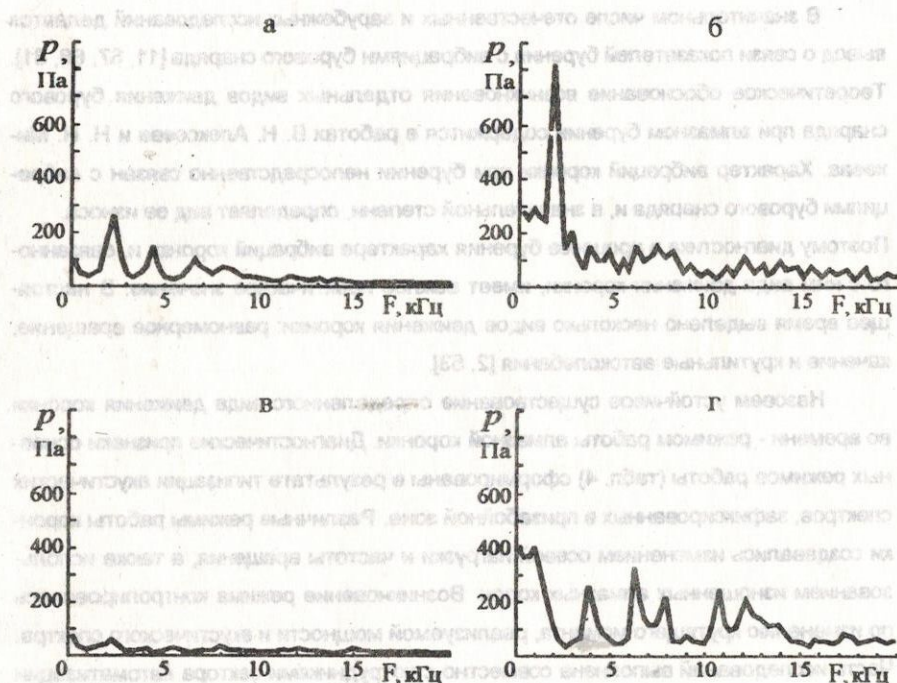


Рис. 12. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении алмазной коронкой И4ДП-59 в режимах равномерного вращения (а и в), качения (б) и крутильных автоколебаний (г).

крутильных колебаний связан с падающей характеристикой силы трения в парах коронка - порода и колонковая труба - стенки скважины.

Таблица 4
Диагностические признаки основных режимов работы алмазной коронки

Режим работы алмазной коронки	Основные факторы, определяющие возникновение режима	Диагностические признаки
Равномерное вращение	Жесткость и кривизна колонны в пределах нормы. Осевая нагрузка и частота вращения не превышают критических значений	Отсутствие максимумов амплитуды значительной величины; гармоники основной частоты колебаний не распространяются в высокочастотный диапазон.
Качение	Использование несбалансированной колонны. Определенное соотношение диаметров колонны и скважины.	Появление в диапазоне 0-2000 Гц максимумов амплитуды, более чем на 20 дБ превышающих спектр шума, распространение гармоник в область высоких частот, увеличение мощности спектра (более чем на 20 дБ).
Крутильные автоколебания - низкочастотные - высокочастотные	Осевая нагрузка превышает критическое значение. Сила трения пары коронка-порода имеет "падающую" характеристику	Увеличение более чем на 8 дБ максимумов амплитуды на частоте $n/60$ (в диапазоне 0-100 Гц). Появление максимумов амплитуды в диапазоне 2000- 5000 Гц более чем на 20 дБ превышающих спектр шума, распространение гармоник в область высоких частот, увеличение мощности спектра (более чем на 20 дБ).

По изменению акустического спектра стало возможным получать диаграмму существования режимов работы алмазной коронки в координатах осевая нагрузка - частота вращения. В общем случае установлены следующие закономерности смены режима работы коронки при регулировании режимных параметров:

- при увеличении осевой нагрузки происходит переход из режима равномерного вращения в режим крутильных автоколебаний;
- увеличение частоты вращения в режиме крутильных автоколебаний коронки приводит к срыву режима и возникновению режима равномерного вращения.

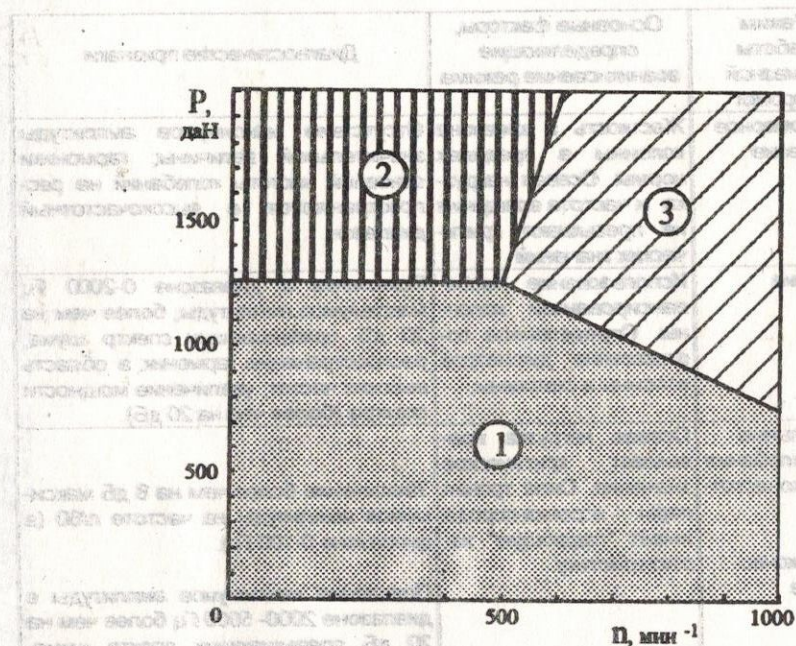


Рис. 13. Диаграмма режимов работы алмазной коронки И4ДП-59 при бурении биотитового гранита
1 - равномерное вращение; 2 - крутильные автоколебания;
3 - качение.

Режим качения возникает в области высоких значений осевой нагрузки и частоты вращения.

Полученные закономерности хорошо согласуются с результатами исследований режимов работы алмазной коронки, проведенных в ВИТРе и МГРИ методом скоростной киносъемки забоя при бурении оптического стекла.

На основе диаграммы режимов работы алмазной коронки можно объяснить физический смысл изменения при бурении механической скорости бурения, забойной мощности и удельной энергоёмкости разрушения. В качестве примера рассмотрим результаты регулирования режима бурения для коронки И4ДП-59 при бурении биотитового гранита.

Регулирование режимных параметров при бурении коронкой И4ДП сопровождалось изменением режима ее работы и виброактивности (рис. 12, 13 и 14). При осевой нагрузке до 1250 даН и частоте вращения до 1000 мин⁻¹ существует режим равномерного вращения (рис. 13). Режим высокочастотных крутильных автоколебаний возникает при увеличении осевой нагрузки свыше 1250 даН ($n > 500$ мин⁻¹). Увеличение частоты вращения свыше 500 мин⁻¹ ($P > 1250$ даН) приводит к возникновению режима качения коронки.

Линейный характер зависимости механической скорости бурения от частоты вращения и осевой нагрузки (рис. 14а) показывает, что вид движения коронки в данном случае не оказывает заметного влияния на разрушение горной породы. А вот энергетические параметры в значительной степени зависят от режима работы коронки. Режимы качения и крутильных автоколебаний, сопровождающиеся вибрациями коронки, характеризуются высокой забойной мощностью, энергоёмкостью и излучаемой акустической энергией, связанной, в основном, с вибрациями коронки (рис. 14 б, в, г). В режиме равномерного вращения дополнительные затраты энергии на колебания снаряда минимальны и этот режим характеризуется наименьшей энергоёмкостью, а в высокочастотном диапазоне спектра фиксируется только акустический шум разрушения. В режиме равномерного вращения с ростом n происходит стабилизация бурового снаряда и снижение удельной энергоёмкости бурения (рис 14 в). Режим равномерного вращения коронки наиболее эффективен с точки зрения оптимальности использования энергии, подведенной к забою.

Критические значения осевой нагрузки и частоты вращения, при которых происходит смена режима работы коронки, определяются типом коронки, жесткостью снаряда и рядом трудно контролируемых технологических факторов. Расчет критических значений режимных параметров и диагностика режимов работы

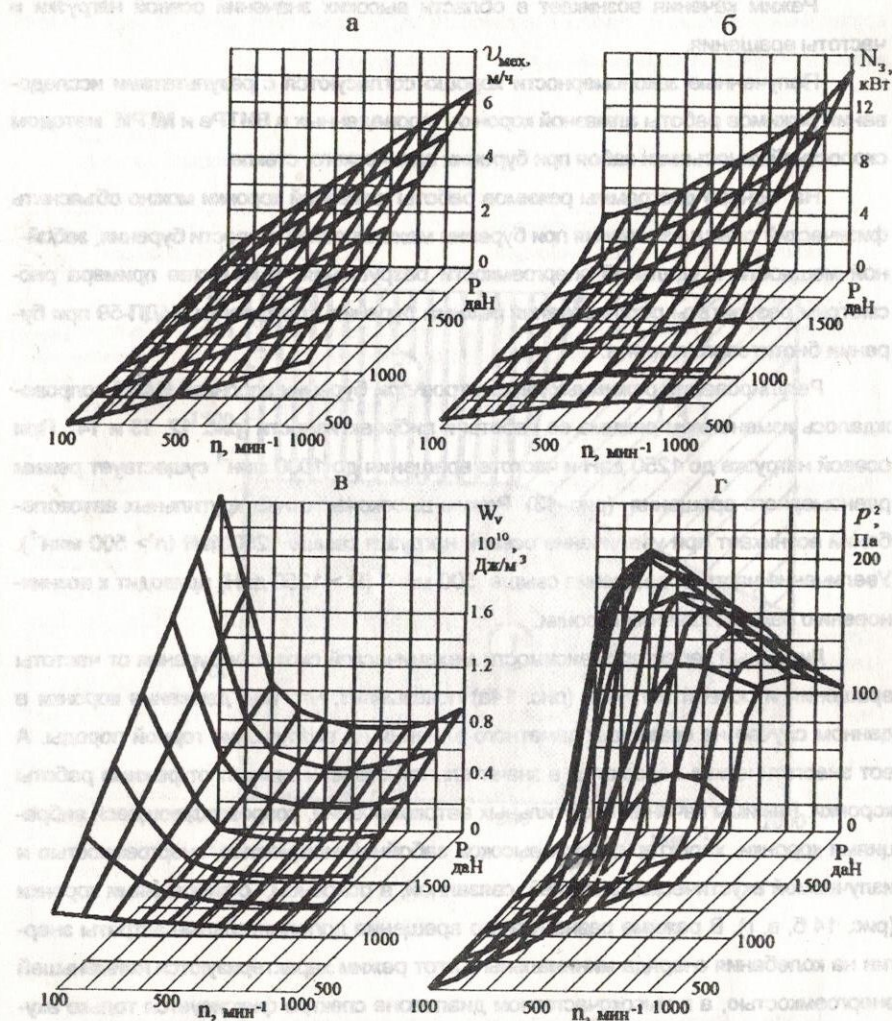


Рис.14. Общий вид функции механической скорости бурения $v_{\text{мех}}$ (а), забойной мощности N_b (б), удельной энергоемкости W_v (в) и СКЗ звукового давления P^2 в призабойной зоне (г) от осевой нагрузки P и частоты вращения n при бурении алмазной коронкой И4ДП-59 биотитового гранита.

коронки по показаниям наземных приборов в настоящее время крайне сложны. Поэтому АСДМР является перспективным средством точной диагностики режима работы алмазной коронки при бурении с целью предотвращения бурения на неэффективных режимах.

§ 2. Механизм разрушения, реализуемый алмазной коронкой

С целью выяснения влияния типа и отдельных конструктивных параметров коронки на механизм разрушения горной породы выполнен комплекс экспериментальных стендовых исследований на режимах не сопровождающихся вибрациями снаряда [3, 5]. Для проведения исследований были использованы однослойные и импрегнированные алмазные коронки типа А4ДП, 01АЗ, БС, ИС, ИЖ, ИЧДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и др. диаметром 46 - 93 мм. Конструктивные параметры коронок варьировались в широких пределах: размер алмазов - от 250/200 до 2000/1600 мкм; число алмазов на торце - от 10 до 150 шт/см²; выступ алмазов из тела матрицы - от 0 до 50 мкм; качество алмазов - синтетические и природные алмазы различных марок; свойства матрицы - различные матрицы твердостью от 10 до 55 HRC, геометрия режущей части - коронки с плоским и ступенчатым торцами.

В результате исследований установлено, что алмазная коронка при бурении реализует оригинальный механизм разрушения, зависящий от ее конструктивных особенностей и характеризующийся определенными параметрами акустического шума разрушения и коэффициента K_p .

Рассмотрим результаты бурения биотитового гранита алмазными коронками типа БС, ИС, ИЖ, ИЧДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП диаметром 59 мм при $P=1000$ даН, $n=400$ мин⁻¹, $Q=20$ дм³/мин. При бурении отбирали пробы шлама, которые подвергали микроскопическим исследованиям и ситовому анализу. Конструктивные параметры коронок приведены в табл. 5, а результаты бурения в табл. 6. Число алмазов на торце коронки определяли прямым подсчетом зерен с помощью микроскопа с 17-кратным увеличением. Величину максимального выступа алмазов на торце коронки устанавливали с помощью профилометра ПИК-1 по окружностям диаметром 44, 48, 51, 54 и 57 мм.

Методика исследований заключалась в следующем. Каждой коронкой бурили скважину глубиной 0,3 м на постоянном режиме при осевой нагрузке 1000 даН, частоте вращения снаряда 400 мин⁻¹ и расходе промывочной жидкости 12 дм³/мин.

Таблица 5

Конструктивные параметры алмазных коронок

Тип коронки	Качество алмазов		Размер алмазов, мкм		Средний диаметр объем алмазов, мкм	Максимальный выступ алмазов, мкм	Число алмазов на 1 см ² торца, шт/см ²
	объемных	подрезных	объемных	подрезных			
БС	АС-80	Твэсал	250/200		230	20	139
ИС	АС-125	АРС-3	250/200	1600/1250	230	20	134
ИЖ	ХХХУпр.	ХХХ1У пр."б"	630/500	1600/1250	570	50	87
И4ДП	А-80	ХХХ1У пр."б"	800/630	1600/1250	700	80	34
И6ДХ	ХХХУпр.	ХХХ1У пр."б"	630/500	1600/1250	570	90	38
О2ИЗ	ХУпр."а"	ХУ пр."а"	800/700	1600/1500	750	160	21
И4ГС	АСПК	ХХХ1У пр."б"	800/630	1600/1250	700	170	10
А4ДП	ХХХУ1 пр."б"	ХХХУ1 пр."б"	2000/1600	2000/1600	1700	250	11

Таблица 6

Результаты бурения биотитового гранита коронками БС, ИС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, О2ИЗ, И4ГС и А4ДП диаметром 59 мм.

Тип коронки	Показатели бурения			Характеристики шлама		Параметры механизма разрушения			
	$V_{\text{бур}} \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$	$N_b, \text{ кВт}$	$W_b, \times 10^3 \text{ Дж/м}^3$	$d_{\text{ш}}, \text{ мкм}$	$F_a, \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ объема, } \times 10^4, \text{ м}^2$	$p^2, \text{ Па}$	$f_a, \text{ кг/с}$	$W_{\text{ав}}, \times 10^7 \text{ Па·с м}^3$	$K_p, \times 10^{-3} \text{ Па/Вт}$
БС	4,19	4,0	10,2	205	6,076	7,4	14,29	1,77	1,85
ИС	5,40	5,5	10,2	208	6,084	7,7	15,19	1,43	1,40
ИЖ	8,50	3,8	4,6	237	5,161	11,7	13,70	1,38	3,08
И4ДП	7,83	3,5	4,5	244	5,037	14,8	14,15	1,89	4,43
И6ДХ	9,32	3,0	3,2	268	4,729	15,9	12,33	1,71	5,30
О2ИЗ	9,32	2,5	2,7	298	4,735	12,4	10,77	1,33	4,96
И4ГС	11,21	2,8	2,5	345	4,552	17,2	12,09	1,53	6,14
А4ДП	11,88	2,1	2,1	356	4,076	18,2	9,87	1,53	8,67

При бурении одновременно регистрировали механическую скорость бурения, мощность, реализуемую при бурении, и звуковое давление в горной породе на расстоянии 0,3 м от забоя бурящейся скважины. Запись акустических сигналов и снятие показаний с датчика механической скорости и киловаттметра производили в процессе бурения через 5 см по глубине скважины. По окончании бурения с поверхности блока горной породы отбирали пробу шлама объемом 3 см³. Затем поверхность блока промывали водой и бурили новую скважину другой коронкой. Шлам на поверхности блока при бурении накапливался вследствие неровного рельефа поверхности и невысокой скорости истечения промывочной жидкости.

Зафиксированные в призабойной зоне спектры звукового давления имеют четкие различия, выражающиеся в величине амплитуды и положении максимумов на оси частот, а также распределении энергии в спектре (рис.15).

Из выбуренного керна были изготовлены шлифы и выполнен петрографический анализ, в результате которого определены тип, текстурно-структурные особенности и минеральный состав горной породы. Горная порода является средне кристаллическим биотитовым гранитом, состоящим из калиевого полевого шпата (микроклина) - 35-40%, плагиоклаза - 25-30%, кварца - 25-30% и биотита 13-15%. Из акцессорных минералов, отмечены: сфен, апатит и титаномagnetит. Вторичные минералы: серицит по плагиоклазу и хлорит по биотиту. В граните кварц образует изометричные зерна. Размер кристаллов кварца составляет 0,13 - 2,55 мм в поперечнике, средний размер кристаллов полевых шпатов - 2-3 мм. Кристаллы микроклина иногда достигают 5 - 6 мм, а плагиоклаза - 4 - 5 мм. Значительная часть кристаллов (лейст) биотита занимает межзерновые пространства между кристаллами полевых шпатов. Размеры лейст биотита 0,3 - 0,7 мм. Структура гранита порфировидная, хотя и нерезко выраженная. Текстура - массивная.

По керну определены физико-механические свойства биотитового гранита: плотность - 2810 кг/м³; предел прочности на одноосное сжатие - 139 МПа; предел упругости - 110 МПа; скорость распространения продольных упругих волн - 4990 м/с.

Гранулометрический состав шлама определен с помощью ситового анализа. Для просеивания шлама использован набор сит с диаметром отверстия 50, 100, 200, 315, 450, 630, 800, 1000, 1250 и 16000 мкм. Пробы шлама рассеивали сухим способом. Сита устанавливали сверху вниз от крупных размеров отверстий к мелким. Пробу засыпали на верхнее сито и весь набор сит встряхивали в течение 10 мин. Массу остатка (фракции) на сите определяли взвешиванием на весах АДВ -

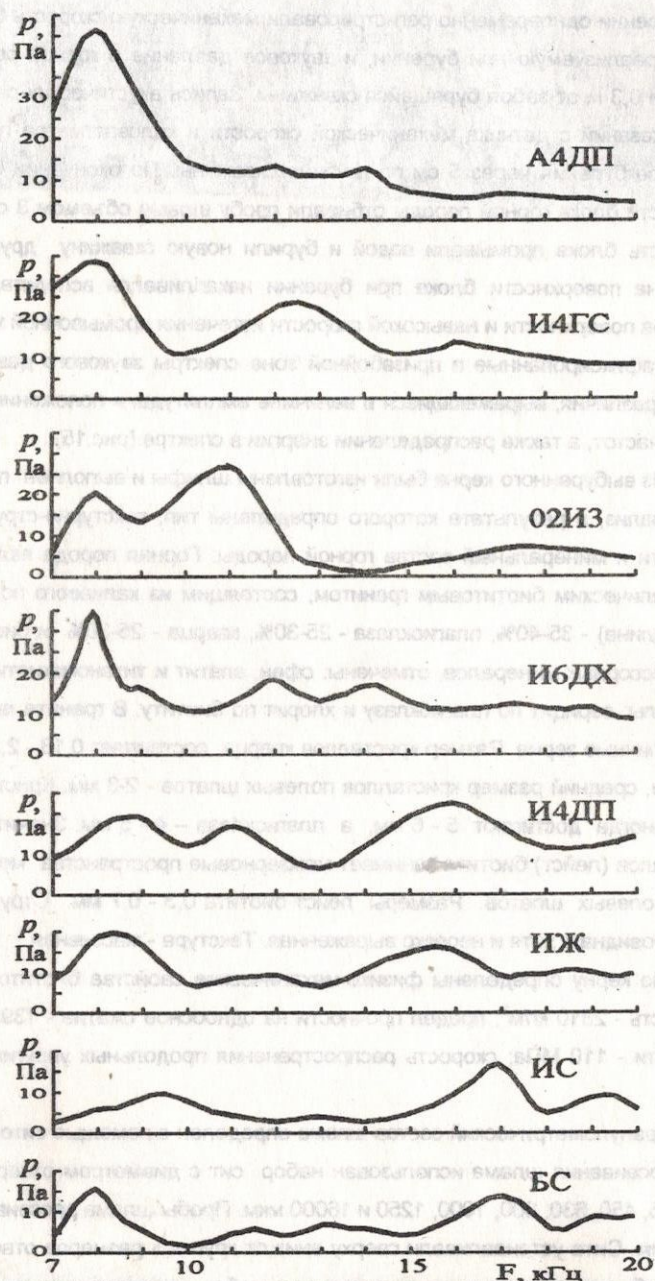


Рис. 15. Спектры звукового давления при бурении биотитового гранита коронками типа БС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП.

200М. Очистка сит производилась с помощью пылесоса. Содержание C (в %) фракции рассчитывалось, как отношение массы фракции m к массе M навески шлама, взятой для анализа:

$$C = \frac{m}{M} 100 \quad \%$$

Гранулометрический состав шлама в виде зависимости процентного содержания фракции от размеров отверстий сита представлен на рис. 16.

Микроскопические исследования шлама показали, что преобладают (около 60%) частицы чешуйчатой (таблитчатой) формы у которых высота в 2 и более раз меньше длины и ширины. Остальные частицы имеют неправильную форму и представляют сколки с острыми краями.

Для подсчета площади вновь образованной поверхности горной породы была принята пластинчатая форма частицы горной породы с отношением сторон 4:3:1. Размеры средней частицы (в м) в каждом ситовом диапазоне рассчитывались следующим образом: длина L - 75% от верхней границы диапазона; высота h - 25% от длины; ширина S - 75% от длины. Объем частицы $V_ч$ определялся по формуле.

$$V_ч = L \cdot h \cdot S \quad \text{м}^3$$

Масса средней частицы шлама $m_ч$ определялась путем перемножения плотности гранита ρ , равной 2810 кг/м^3 , на объем частицы.

$$m_ч = \rho \cdot V_ч \quad \text{кг.}$$

Число частиц $N_ч$ в каждой фракции рассчитывалось путем деления массы фракции m на массу средней частицы $m_ч$.

$$N_ч = \frac{m}{m_ч} \quad \text{штук.}$$

Площадь $F_ф$ вновь образованной поверхности в каждой фракции определялась перемножением площади поверхности средней частицы $F_ч$ на число частиц $N_ч$.

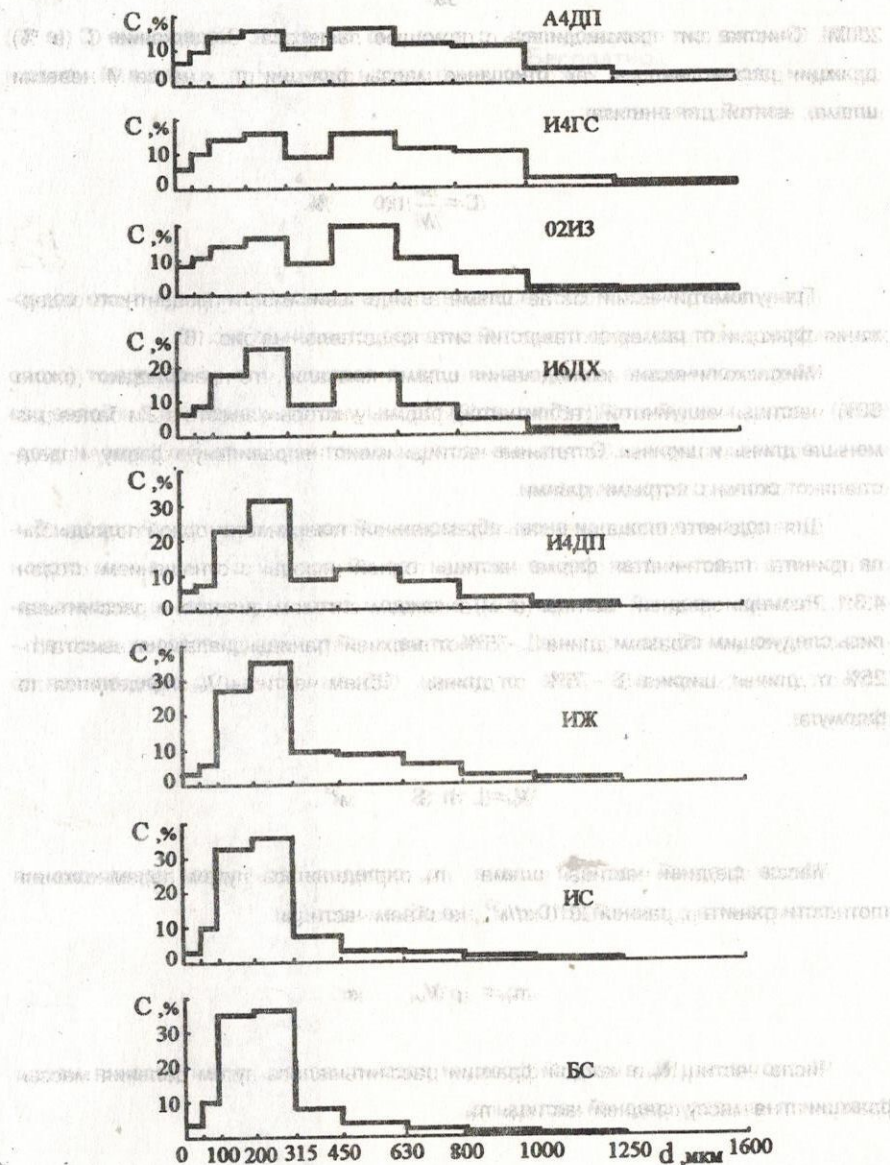


Рис. 16. Гранулометрический состав проб шлама, отобранных при бурении коронками БС, ИС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП биотитового гранита

в фракции.

$$F_{\phi} = F_v \cdot N_v \cdot m^2.$$

Суммарная площадь вновь образованной поверхности F_{ϕ} рассчитывалась суммированием площадей вновь образованной поверхности в каждой фракции.

Исследования подтвердили известный характер зависимости между площадью вновь образованной поверхности F_{ϕ} и удельной энергоемкостью W_v : рост удельной энергоемкости разрушения сопровождается увеличением площади вновь образованной поверхности [34]. Зависимость $E_s = f(W_v)$ аппроксимирована степенной функцией с коэффициентом корреляции $r = 0.98$:

$$F_{\phi} = 3.61 \cdot 10^2 W_v^{0.223}$$

Предложим физическое объяснение $F_{\phi} = f(W_v)$ на основе энергетического подхода к механизму разрушения. Увеличение размера алмазов и выступа их из тела матрицы (при уменьшении числа алмазов на торце коронки) приводит к увеличению мощности и уменьшению средней частоты диапазона акустического шума разрушения, а также росту коэффициента распределения энергии при разрушении (табл. 5). Изменяется характер распределения энергии при разрушении: акустическая энергия увеличивается, а энергия, расходуемая на трение и переходящая в тепло, — уменьшается. Механизм разрушения становится более эффективным. Оптимизация распределения энергии при разрушении сопровождается увеличением механической скорости бурения, уменьшением забойной мощности и удельной энергоемкости (табл. 6).

Результаты исследования впервые выявили возможность контроля селективности разрушения по параметрам акустического шума разрушения. Под селективным разрушением понимается процесс управляемого воздействия на горную породу, в результате которого энергия подводится к требуемым межфазным контактам, вызывая разрушение по определенным направлениям и отделение от забоя частиц требуемых размеров. Ранее идея селективного разрушения горных пород была рассмотрена в области обогащения полезных ископаемых [54]. Очевидно, что селективное разрушение позволит снизить энергоемкость бурения и, в некоторых случаях, перейти к опробованию по шламу за счет устранения разрушения зерен рудных минералов.

Для оценки изменения гранулометрического состава шлама использована величина d_4 - средний диаметр частиц шлама, которая представляет значение условного размера отверстия сита (диаметра частицы шлама), разделяющего пробу на две равные весовые части. Величину d_4 определяли по графику зависимости размера ячейки сита от процентного содержания фракции в пробе (рис. 16) путем нахождения условного значения размера ячейки сита, слева и справа от которого располагались по 50% веса пробы.

Зависимости СКЗ звукового давления p^2 и средней частоты f_A диапазона 7-20 кГц от среднего диаметра d_4 частиц шлама аппроксимированы линейными функциями со следующими коэффициентами корреляции r :

$$f_A = 20,46 - 0,0284 d_4 \quad r = -0,89;$$

$$p^2 = -3,15 + 0,0604 d_4 \quad r = 0,86.$$

Из этого следует, что одновременное уменьшение мощности акустического шума разрушения и насыщение спектра высокочастотными составляющими является диагностическим признаком уменьшения размера частиц горной породы, отделяемых от забоя. Спектр акустического шума разрушения в призабойной зоне бурящейся скважины содержит информацию о масштабности разрушения. На основе такой информации в будущем станет возможно осуществлять разрушение горных пород с требуемой селективностью.

Исследования механизмов разрушения, реализуемых коронками одного типа, показало, что они характеризуются практически идентичными значениями информативных параметров, если у коронок совпадают геометрические размеры, величины торцевого и радиального боя, состояние и максимальный выступ алмазов из тела матрицы, параметры матрицы и т.д. Показательным примером являются результаты бурения биотитового гранита двумя коронками И6КС-59 при осевой нагрузке 750 даН, частоте вращения 700 мин⁻¹ и расходе промывочной жидкости 20 дм³/мин. Геометрические размеры, значения торцевого и радиального боя, число алмазов на торце, состояние и максимальный выступ алмазов из тела матрицы не отличались у обеих коронок. Спектры звукового давления, зафиксированные на расстоянии 0,3 м от забоя при бурении коронками И6КС, имеют характерный вид (рис. 17). Максимумы амплитуды в спектре находятся в интервалах 2-3, 3-4, 5-6, 8-9 и 11-12 кГц. Отклонение по информативным параметрам у коронок незначительно и составляют: по СКЗ звукового давления - 9 %, по средней частоте f_A - 2

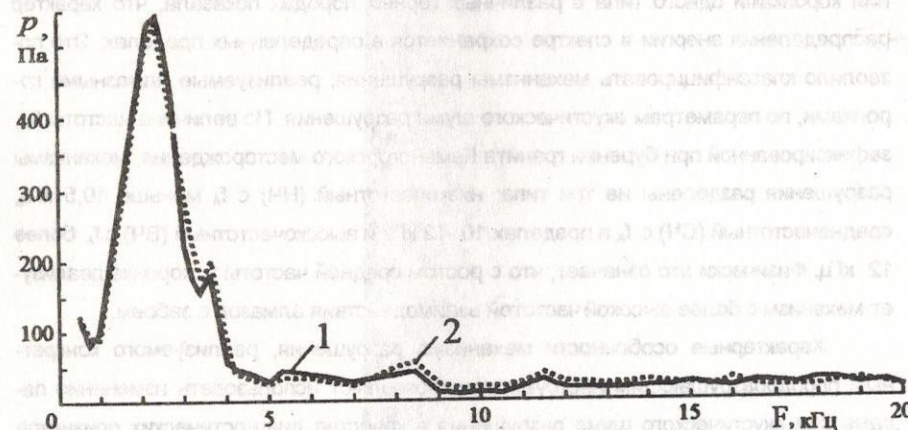


Рис. 17. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении биотитового гранита алмазными коронками типа И6КС №2 (1) и №251 (2).

%, коэффициенту K_p - 9 %. Это показывает, что характер распределения энергии при разрушении, а также параметры низкочастотных вибраций и акустического шума разрушения при бурении коронками ИБКС совпадают.

Неприработанная коронка реализует механизм разрушения отличный от механизма разрушения приработанной коронки. По мере приработки коронки происходит постепенное увеличение СКЗ звукового давления, средней частоты f_d и коэффициента K_p до значений, характеризующих механизм разрушения полностью приработанной коронки.

Сравнительная оценка диапазона изменения средней частоты f_d при бурении коронками одного типа в различных горных породах показала, что характер распределения энергии в спектре сохраняется в определенных пределах. Это позволило классифицировать механизмы разрушения, реализуемые алмазными коронками, по параметрам акустического шума разрушения. По величине частоты f_d , зафиксированной при бурении гранита Каменогорского месторождения, механизмы разрушения разделены на три типа: низкочастотный (НЧ) с f_d меньше 10,5 кГц, среднечастотный (СЧ) с f_d в пределах 10 - 12 кГц и высокочастотный (ВЧ) с f_d более 12 кГц. Физически это означает, что с ростом средней частоты f_d коронка реализует механизм с более высокой частотой взаимодействия алмазов с забоем.

Характерные особенности механизма разрушения, реализуемого конкретным породоразрушающим инструментом, позволяют использовать изменение параметров акустического шума разрушения в качестве диагностических признаков наличия конструктивных дефектов или изменения состояния инструмента.

§ 3. Испытания алмазных коронок в стендовых условиях

Для проведения ускоренных испытаний и оценки качества алмазных коронок в стендовых условиях разработаны акустическая информационно-аналитическая система АИАС и методика МИ 41-13-31-01-94 "Инструмент алмазный породоразрушающий. Методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля".

Система АИАС разработана исходя из следующих допущений:

- механизм разрушения горной породы, реализуемый алмазной коронкой, имеет индивидуальные характеристики;

- измеряемые параметры зависят от конструктивных параметров и состояния коронки.

Система АИАС включает датчик акустических колебаний, комплект соединительных кабелей и блок спектрального анализа сигналов. Датчик устанавливается в наблюдательную скважину, пробуренную в блоке горной породы.

Система АИАС используется в составе буровых станков и предназначена для решения следующих задач:

- выявление конструктивных дефектов коронки, обусловленных качеством и технологией изготовления;
- оценка механизма разрушения, реализуемого алмазной коронкой, и определение области ее рационального применения;
- определение кривой износостойкости (оценка износостойкости) коронки;
- оценка работоспособности опытных образцов инструмента по сравнению с лучшими образцами серийной продукции (сравнительные испытания);
- проверка качества серийно выпускаемой продукции.

Основными проверяемыми показателями качества инструмента являются спектр звукового давления в призабойной зоне в диапазоне частот 7-20 Гц и ресурс.

Определение качества и выявление конструктивных дефектов коронки

Для оценки качества алмазной коронки разработан метод выявления конструктивных дефектов на основе сравнения спектров звукового давления в призабойной зоне [4]. "Опорный" спектр регистрируется при бурении базовой, качественно изготовленной, коронкой. Диагностические признаки наличия конструктивных дефектов (табл. 7) установлены по результатам бурения коронками с заранее введенными дефектами. Регистрация спектра звукового давления при бурении испытываемой коронкой осуществляется после ее приработки. По характеру отклонений в спектре, регистрируемом при бурении испытываемой коронкой, от "опорного" спектра, определяется наличие в коронке конструктивных дефектов.

Оценка механизма разрушения, реализуемого алмазной коронкой, и определение области ее рационального применения, производится по типу спектра звукового давления. Область рационального применения алмазной коронки определяется в результате сравнения спектров звукового давления, зафиксированных при бурении испытываемой коронкой и инструмента, выбранного за базу сравнения. Инструмент, реализующий механизм разрушения со спектром, насыщенным высокочастотными составляющими (высокая частота f_d и низкое СКЗ) должен

применяться в более крепких породах, чем инструмент при работе которого в спектре фиксируются низкая частота f_A и высокое СКЗ.

Таблица 7

Основные диагностические признаки дефектов алмазной коронки

Наименование дефекта	Причины возникновения	Основные диагностические признаки
Бой коронки	Некачественная нарезка резьбы на корпусе коронки	Увеличение более 8 дБ амплитуды максимума на частоте $n/60$.
Уменьшение насыщенности	Уменьшение навески алмазов, увеличение высоты матрицы	Уменьшение СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц более 4 дБ.
Армирование алмазами пониженного качества	Использование алмазов низкого качества.	

Определение кривой износостойкости (оценка износостойкости) коронки. Методика построения кривой износостойкости описана в главе III. Для построения кривой износостойкости производится тарировочное бурение на двух режимах. Объем бурения на каждом режиме - два метра (3 - 5 рейсов длиной 0,4 м). При бурении измеряются спектры звукового давления в призабойной зоне, механическая скорость бурения и износ коронки по высоте. По результатам измерений износа коронки рассчитывается интенсивность износа и прогнозный ресурс. По спектрам рассчитывается СКЗ звукового давления в диапазоне 7-20 кГц. Для построения кривой износостойкости по оси ординат откладывается уровень СКЗ звукового давления в дБ (относительно нулевого уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па), по оси абсцисс - прогнозный ресурс коронки. По кривой износостойкости также можно определить прогнозный ресурс коронки на различных режимах, измеряя при бурении уровень СКЗ звукового давления.

Сравнительные испытания проводятся для определения работоспособности макетов, экспериментальных и опытных образцов коронок по сравнению с лучшими образцами серийной продукции. В качестве базы сравнения должен прини-

маться серийно выпускаемый инструмент, указанный в техническом задании и принятый за базу сравнения. Методика испытаний включает следующие этапы.

- определение области оптимальных режимов бурения коронкой;
- построение кривой износостойкости;
- оценка механизма разрушения, реализуемого алмазной коронкой.

Для определения области оптимальных режимов бурения проводится регулирование режимных параметров с записью на каждом режиме акустического сигнала. Всего используется до 70 режимов бурения. Осевая нагрузка P изменяется от 500 до 1500 даН с шагом 250 даН, частота вращения - от 200 до 1100 мин⁻¹ с шагом 100 мин⁻¹. Расход промывочной жидкости не изменяется и равен 20 дм³/мин. Время бурения на режиме - 20 с. Критерием оптимальности механизма разрушения для пары коронка-порода, является установление путем регулирования режимных параметров режима равномерного вращения коронки и достижение в нем спектра в высокочастотном диапазоне которого фиксируются минимальные значения средней частоты f_A в области максимально возможных значений СКЗ.

$$f_A \longrightarrow \min$$

$$p^2 \longrightarrow \max$$

Вывод о работоспособности коронок делается на основе сравнения механизмов разрушения и кривых износостойкости.

Проверка качества серийно выпускаемой продукции. Объектом испытаний являются партии серийно выпускаемого инструмента. Число коронок в партии выбирается на основе статистических данных (в среднем 3-8). Коронки предварительно прирабатываются. Бурение каждой коронкой осуществляется на постоянном режиме интервала 0,1-0,5 м. Критерием качества изготовления партии коронок является минимум отклонений (до ± 6 дБ в диапазоне 7-20 кГц) в акустическом спектре от "опорного" спектра, сформированного в результате бурения базовой коронкой данного типа.

Информационно - аналитическая система АИАС и методика МИ 41-13-31-01-94 "Инструмент алмазный породоразрушающий. Методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля" с 1994г. используются в ВИТРе при разработке и испытаниях алмазного инструмента. С применением системы АИАС-1 испытано более тридцати коронок различных типов.

Экономическая эффективность использования системы АИАС определяется за счет:

- высокой информативности и качества испытаний;
- оперативности и уменьшения длительности испытаний;
- уменьшения стоимости испытаний;
- сокращения сроков и повышения качества разработки новых типов коронок.

§ 4. Исследование геологического разреза в процессе бурения

Акустические исследования в процессе бурения, проведенные в период 1983 - 89 г.г. на месторождениях Карело-Кольского региона и Донбасса показали, что различным горным породам присущи свои индивидуальные частотные спектры, наиболее отличающиеся в диапазоне частот от 5-7 до 20 кГц [64, 67]. Спектры, как правило, имеют один-два четко выраженных максимума на частотах, являющихся постоянными для данной породы и названными "характеристическими" (рис. 18). Спектры сохраняют постоянство в интервале бурения одной породы и изменяются при смене разреза. Влияние режимных параметров, если их регулирование производится в небольших пределах и не сопровождается возбуждением вибраций снаряда, выражается в изменении амплитуд колебаний при неизменном расположении максимума на оси частот.

Исследование зависимости между физико-механическими свойствами горных пород и параметрами регистрируемых сигналов выявило высокую корреляцию между удельной акустической энергией $W_{ав}$, средней частотой f_{λ} и прочностными и упругими свойствами горных пород, характеризующимися скоростью распространения упругих волн, пределом прочности на одноосное сжатие и модулем Юнга (табл. 8 и 9). Коэффициент корреляции положителен и колеблется в пределах 0,85 - 0,95. Поэтому диагностическими признаками увеличения прочности и упругости разбуриваемой горной породы являются увеличение при бурении удельной акустической энергии $W_{ав}$ и расширение акустического спектра в сторону высоких частот.

Коэффициент распределения энергии при разрушении K_p изменяется в широких пределах и является дополнительным диагностическим признаком при определении смены разреза. Минимальные значения коэффициента K_p зафиксированы при бурении глинистых пород (табл. 9).

На основе результатов исследований были сформулированы требования и разработаны двускважинный (СИГР-1) и односкважинный (СИГР-2) варианты аппаратуры для исследования геологического разреза в процессе бурения.

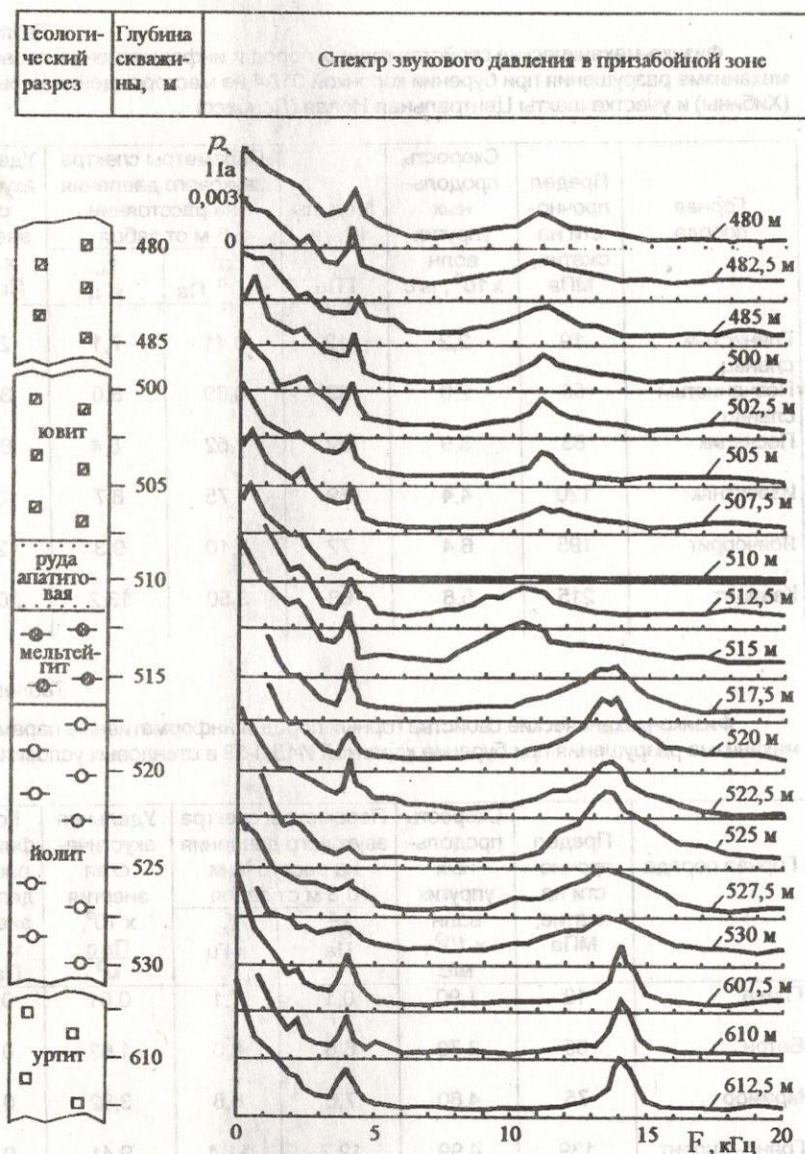


Рис. 18. Спектры звукового давления, зафиксированные на расстоянии 40 м от забоя при бурении алмазными коронками 01А4 скважины №1584 на месторождении Коашва

Таблица 8

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры механизма разрушения при бурении коронкой 01А4 на месторождении Кальюк (Хибины) и участке шахты Центральная-Новая (Донбасс)

Горная порода	Предел прочности на сжатие, МПа	Скорость продольных упругих волн $\times 10^3$, м/с	Модуль Юнга, ГПа	Параметры спектра звукового давления на расстоянии 6 м от забоя		Удельная акустическая энергия, $\times 10^2$, Па с/м ³
				p^2 , $\times 10^{-3}$, Па	f_A , кГц	
Глинистый сланец	19	2,2	12	0,41	7,1	2,35
Песчанистый сланец	56	2,8	33	0,69	8,0	3,97
Песчаник	83	3,9	52	1,52	8,4	8,73
Известняк	120	4,4	59	1,75	8,7	10,06
Ловчоррит	195	6,4	72	2,10	9,3	12,07
Кварцит	215	5,8	68	3,50	13,2	20,11

Таблица 9

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры механизма разрушения при бурении коронкой И4ДП-59 в стендовых условиях

Горная порода	Предел прочности на сжатие, МПа	Скорость продольных упругих волн $\times 10^3$, м/с	Параметры спектра звукового давления на расстоянии 0,3 м от забоя		Удельная акустическая энергия $\times 10^6$, $\frac{\text{Па с}}{\text{м}^3}$	Коэффициент распределения энергии $\times 10^{-2}$, Па/Вт
			p^2 , Па	f_A , кГц		
Глина	12	1,90	0,1	7,1	0,01	0,02
Бетон	35	3,70	6,6	8,0	1,62	0,66
Мрамор	75	4,80	7,6	8,8	3,82	0,30
Грано-диорит	139	4,99	12,7	11,4	9,41	0,34
Гранит	110	4,69	13,9	13,3	17,64	0,56
Гранито-гнейс	136	5,65	24,0	11,6	35,55	0,96
Кварцит железистый	361	6,00	54,8	15,2	104,38	1,57

Аппаратуры предназначены для решения следующих задач:

- литологического расчленения разреза;
- определение момента (глубины) вхождения породоразрушающего инструмента в рудные тела, определения их мощности по линии пересечения;
- фиксации зон тектонических нарушений, зон дробления, трещин;
- контроля и регулирования режима бурения, диагностики аварийно опасных режимов.

Аппаратура акустическая СИГР-1 (система исследования геологического разреза, модель 1) состоит из приемника акустических колебаний и наземного блока, которые размещаются в каротажной станции на базе автомобиля ГАЗ-66.

В состав приемника акустических колебаний входят герметичный корпус, акустико-электрический преобразователь, усилитель низкой частоты с фильтрами, усилитель мощности, стабилизатор напряжения. Приемник характеризуется следующими параметрами: уровень шума усилителя, приведенный ко входу - 10 мкВ; коэффициент усиления - 316; полоса пропускания - 0,5-20 кГц; чувствительность в полосе пропускания - не менее - 30 мкВ/Па; рабочая температура в пределах 243-343°K; внешнее гидростатическое давление не менее 20 МПа; диаметр - 40 мм; длина не более 2 м; масса не более 15 кг.

Наземный блок включает: спускоподъемное устройство, блок управления синхронным спуском, измерительную систему (анализатор спектра СК4-58 и двухкоординатный самописец Н307/2) и источника питания постоянного тока Б5-30. Спускоподъемное устройство имеет электромеханический привод.

Приемник акустических колебаний помещается на трехжильном кабеле типа КГЗ-59-90 в наблюдательную скважину, расположенную на расстоянии до 60 м от бурящейся скважины, и с помощью блока управления синхронным спуском и спуско-подъемного устройства опускается синхронно с углубкой инструмента. Поступающие сигналы подвергаются спектральному анализу. По отклонению спектрограмм делается вывод об изменении разреза. Аппаратура СИГР-1 применялась на ряде месторождений Карело-Кольского региона для оперативного расчленения геологического разреза.

Вместе с тем широкое практическое использование аппаратуры СИГР-1 ограничено по следующим обстоятельствам:

1. Необходимо наличие наблюдательной скважины.
2. Ограниченная дальность исследования - до 60 м.

3. Задавливание каротажного подъемника и сменного оператора в течении всего срока бурения скважины.

Аппаратура акустическая СИГР-2 (система исследования геологического разреза, модель 2) предназначена для изучения геологического разреза непосредственно в процессе бурения путем исследования акустических колебаний, возникающих при взаимодействии породоразрушающего инструмента с горной породой. В состав аппаратуры входят: скважинный блок, наземный измерительный пульт и вспомогательное оборудование. Скважинный блок встраивается в нижнюю часть снаряда над породоразрушающим инструментом.

Аппаратура работает следующим образом. Акустические датчик, расположенный в скважинном блоке, преобразует акустические колебания, возникающие при разрушении горной породы, в электрические колебания. Из спектра колебаний выделяется три частотных диапазона: 0.5-5; 5-10; 10-20 кГц, которые преобразуются последовательно в двоичный код, запоминаются, дополнительно кодируются помехоустойчивым кодом и передаются по беспроводному электрическому каналу связи к наземному пульта (приемнику). Передача информации основана на явлении распространения электромагнитных волн вдоль колонны буровых труб и окружающей ее среде. Электромагнитные волны генерируются скважинным блоком, подключенным полюсами к нижней и верхней частям колонны, которая гальванически развязана с помощью изолятора - разделителя. Наземный пульт принимает электрические сигналы, возникающие между верхней частью колонны и заземлителем, усиливает их; демодулирует и декодирует информацию и выдает ее на цифровое табло лицевой панели.

Аппаратура СИГР-2 не имеет аналогов в РФ и за рубежом и в 1991 г. сдана в серийное производство.

Глава V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И БУРИМОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

§ 1. Акустико-спектральная диагностика буримости горной породы

Горные породы - природные минеральные агрегаты, слагающие земную кору. Как физические тела горные породы характеризуются прочностными, упругими, плотностными, тепловыми и другими свойствами. Свойства горных пород обусловлены их составом и строением, а также термодинамическими условиями, в которых они находятся.

Традиционно для характеристики влияния горной породы на процесс бурения в России применяются понятия "буримость" и "абразивность", которые можно рассматривать как свойства горной породы, предназначенные для прогноза технических показателей бурения.

Буримость, как технологическая оценка сопротивляемости горной породы разрушению бурением, является важнейшей характеристикой, на которой основывается планирование буровых работ. В геологоразведочном производстве для определения буримости разработано и применяется несколько шкал; для вращательного бурения все породы разбиты на 12 категорий (ЕНБ, Гостехиздат, 1963). Предполагается, что категории объединяют горные породы с близкими значениями затрат времени на бурение и износ истирающих материалов. Общепринятым является определение абразивности, как способности горной породы изнашивать породоразрушающий инструмент при бурении.

В производственных условиях, показателями буримости и абразивности горных пород являются технические показатели бурения: механическая скорость бурения, проходка за рейс, вид износа или ресурс породоразрушающего инструмента [25].

Для инструментального определения категории по буримости и абразивности горных пород в лабораторных условиях предложено несколько методов [24, 40]. В качестве показателя буримости используется одно из физико-механических свойств горных пород: прочность при статической и динамической нагрузках, твердость и др.. Для определения буримости горной породы широко применялся метод Л. А. Шрейнера. Наибольшее распространение в геологоразведочном бурении получил метод ЦНИГРИ, разработанный Н. И. Любимовым и принятый в виде ГОСТ 41-89-74 "Породы горные. Метод контрольного определения категорий по буримости для вращательного бурения". Категория горной породы по буримости устанавли-

ливается на основе коэффициентов динамической прочности и абразивности в объединенном выражении.

Абразивность горных пород определяется, в основном, по степени износа эталонного материала (стержней, колец и др.) при взаимодействии (трении, сверлении, резании) с образцом горной породы [25]. Наибольшее распространение в бурении получили лабораторные методы оценки абразивности, предложенные Н. И. Любимовым и Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым.

Применение указанных методов, несомненно, сыграло положительную роль в изучении и типизации механических свойств горных пород. Однако, как следует из опубликованных материалов [25], определение категории горных пород по буримости или выбор конструктивных параметров алмазного инструмента на основе установленных показателей существенно затруднен, поскольку они, как правило, не коррелируют друг с другом и с показателями отработки алмазных коронок. Такой результат можно было прогнозировать, так как вместо разрушения горной породы вращающимся инструментом при испытаниях использованы простейшие виды нагружения.

Рассматривая процесс испытаний, как систему "воздействие - отклик", следует признать, что при определении свойств горных пород, влияющих на показатели бурения, необходимо обеспечить вид нагружения адекватный существующему на забое скважины при бурении. Из известных методов этому требованию наиболее отвечает метод М. В. Витторфа, включающий воздействие на образец горной породы вращающимся карборундовым кругом при постоянном усилии подачи и определение категории буримости горной породы по глубине реза после совершения кругом фиксированного числа оборотов. Однако в горных породах для которых круг данной конструкции не является оптимальным (например в глинистых сланцах) скорость резания уменьшается и метод М. В. Витторфа дает завышенную категорию буримости.

Автором предложен метод акустико-спектральной диагностики прочности и буримости горной породы (метод ВИТР-А). Суть метода заключается в воздействии на образец горной породы вращающимся алмазным инструментом с постоянным режимом нагружения и измерении при разрушении в призабойной зоне акустического спектра в диапазоне частот до 20 кГц, скорости разрушения и реализуемой мощности.

Отличительной особенностью метода ВИТР-А является использование показателей, характеризующих не свойство, а механизм разрушения горной породы в

целом. Обеспечение при испытании нагружения горной породы вращающимся породоразрушающим инструментом, позволяет использовать в качестве показателей буримости информативные параметры механизма разрушения. Как было показано выше, спектр акустического шума разрушения и коэффициент распределения энергии отражают физические особенности разрушения горной породы и связаны с механической скоростью бурения и износом породоразрушающего инструмента.

В результате испытаний горных пород по методу ВИТР-А определяются информативные параметры механизма разрушения, а именно:

1) Акустический спектр в диапазоне частот 7-20 кГц. Сравнение спектров, полученных в идентичных условиях, позволяет выявлять отличия в механизмах разрушения горных пород. Для групп горных пород с близкими механизмами разрушения может быть построен паспортный спектр-маска, в котором каждая дискретная составляющая имеет определенное значение. Для интегральной характеристики спектра может использоваться СКЗ звукового давления и средняя частота f_A . По величине амплитуды на частоте 15 кГц механизмы разрушения горных пород классифицированы на три типа: высокочастотный (ВЧ) - свыше 70 дБ (относительно нулевого уровня 20 мкПа), среднечастотный (СЧ) - от 50 до 70 дБ и низкочастотный (НЧ) - меньше 50 дБ.

2) Удельная акустическая энергия W_{AV} , выделившаяся в диапазоне 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы, определяемая как отношение СКЗ звукового давления p^2 к объемной скорости разрушения горной породы v :

$$W_{AV} = \frac{p^2}{v} \quad \text{Па/см}^3$$

3) Коэффициент распределения энергии при разрушении K_p , определяемый как отношение СКЗ звукового давления p^2 к мощности N_p , реализуемой при разрушении:

$$K_p = \frac{p^2}{N_p} \quad \text{Па/Вт}$$

При стандартных условиях испытаний спектр акустического шума разрушения и характер распределения энергии при разрушении зависят только от свойств горной породы. На основе измеряемых показателей появляется возможность типиза-

ции формаций и групп горных пород, сходных по механизму разрушения. Термин "формация горных пород" с точки зрения технологии бурения скважин можно определить как "совокупность горных пород, характеризующихся близким влиянием на технические показатели бурения, в том числе на износ породоразрушающего инструмента".

Технико-экономические преимущества метода ВИТР-А заключаются в повышении точности определения категории буримости горной породы, отсутствии ограничений по области применения, исключении операции пробоподготовки, экономии невозможного кернового материала, высокой производительности и низкой стоимости испытаний.

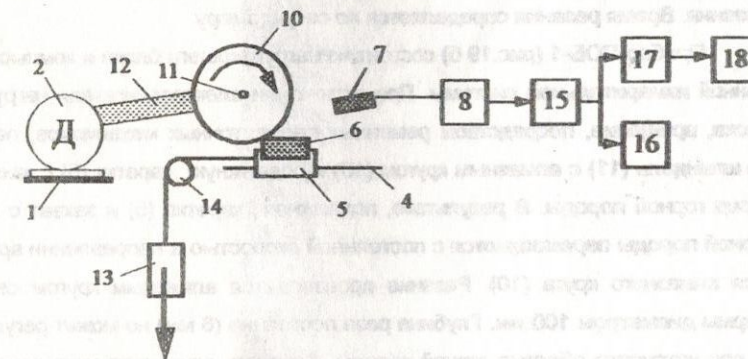
§ 2. Технические средства исследований образцов горных пород

Для испытаний образцов горных пород методом акустико-спектральной диагностики механизма разрушения в ВИТРе разработаны лабораторные технические средства: установка УОБ-1 и прибор ПОБ-1 (рис. 19). Принцип их действия заключается в резании образца горной породы алмазным кругом и измерении спектра воздушного шума и реализуемой мощности. Основное отличие заключается в реализуемом режиме нагружения горной породы: в установке УОБ-1 резание горной породы осуществляется с постоянным усилием, а в приборе ПОБ-1 - с постоянной скоростью.

Выбор резания в качестве нагрузочного режима основан на сходстве вида воздействия на горную породу при бурении и резании. Кроме этого резание керна вдоль образующей позволяет избежать предварительной подготовки образца горной породы.

Установка УОБ-1 (рис. 19 а) состоит из модернизированного камнерезного станка СКР-1 (нагружающего блока) и измерительной системы (ИС). Механизм подачи станка состоит из подвижной каретки (5) с захватом образца горной породы, направляющей, ролика (14) и груза (13). Усилие подачи регулируется массой груза. При включении электродвигателя станка (2), вращение, посредством ременного передаточного механизма (12), передается на шпиндель (11) с алмазным кругом (10). После освобождения от фиксации подвижная каретка под действием груза перемещается по направляющей в направлении алмазного круга. Резание производится алмазным кругом сегментной формы диаметром 304 мм, армированным алмазным сырьем марки АС-80, размером 250/200 мкм на связке М6-15. Глубина

а



б

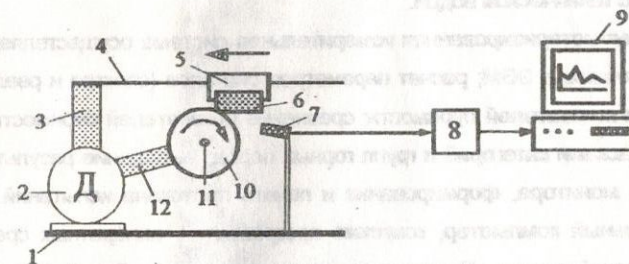


Рис. 19. Схемы работы установки УОБ-1(а) и прибора ПОБ-1 (б)

1 - основание; 2 - приводной двигатель; 3 - передаточный механизм подвижной каретки; 4 - направляющая; 5 - подвижная каретка; 6 - образец горной породы; 7 - микрофон; 8 - измеритель шума и вибрации ВШВ-003; 9 - ЭВМ; 10 - алмазный круг; 11 - шпиндель; 12 - передаточный механизм шпинделя; 13 - груз; 14 - ролик; 15 - магнитограф; 16 - осциллограф; 17 - анализатор спектра; 18 - самописец

реза 12 мм, но может регулироваться при установке образца горной породы. Режимные параметры резания равны: частота вращения круга - 500 мин^{-1} ; усилие подачи - 5 даН, расход охлаждающей жидкости - $2 \text{ дм}^3/\text{мин}$. В состав измерительной системы входят микрофон М101, измеритель шума и вибрации ВШВ003, осциллограф С1-64, анализатор спектра СК4-58, двухкоординатный самописец Н307/2, киловаттметр Н385. Микрофон располагается на расстоянии 0,5 м от зоны резания. Время резания определяется по секундомеру.

Прибор ПОБ-1 (рис. 19 б) состоит из нагружающего блока и компьютеризированной измерительной системы. При включении электродвигателя нагружающего блока, вращение, посредством ременных передаточных механизмов, передается на шпиндель (11) с алмазным кругом (10) и подвижную каретку (5) с захватом образца горной породы. В результате, подвижная каретка (5) и захват с образцом горной породы перемещаются с постоянной скоростью в направлении вращающегося алмазного круга (10). Резание производится алмазным кругом сегментной формы диаметром 100 мм. Глубина реза постоянна (6 мм) но может регулироваться при установке образца горной породы. Скорость относительного перемещения круга и образца горной породы постоянна и равняется 0,01 м/с. Частота вращения алмазного круга равна 1400 мин^{-1} . Охлаждение круга осуществляется окунанием в емкость с технической водой.

Компьютеризированная измерительная система осуществляет: ввод сигналов с датчиков в ЭВМ; расчет параметров сигналов (спектра и реализуемой мощности) и показателей буримости; сравнение показателей буримости с заданными спектр-масками категорий и групп горных пород; выведение результатов расчетов на экран монитора, формирование и печать протокола испытаний. ИС включает персональный компьютер, комплекс программно - аппаратных средств, датчики (акустический и токовый) и комплект соединительных кабелей. Для измерения воздушного шума использован микрофон М101, входящий в комплект измерителя шума и вибрации ВШВ-003. Микрофон размещается на кронштейне на расстоянии 0,2 м от алмазного круга. Электрический сигнал пропорциональный звуковому давлению подается на вход платы АЦП. Для расчета реализуемой мощности используется значение силы тока в фазе приводного двигателя. Электрический сигнал (напряжение) пропорциональный силе тока снимается с сопротивления, установленного в фазе двигателя, и через трансформатор подается на вход платы АЦП. Комплекс программно - аппаратных средств в составе платы АЦП типа L-1250 АО L-Card, пакета обработки сигналов ПОС НПП "Мера" и программы командного

режима испытаний предназначен для регистрации, обработки и анализа измерительной информации с датчиков. При разработке программы командного режима испытаний использован Turbo Pascal 7.0 фирмы Borland International Inc.

Отбор образцов производится из керна горных пород, полученного при бурение вращательным способом. Размеры образца (керн): длина 5 - 6 см при бурении коронками диаметром 46 - 93 мм.

§ 3. Генетический тип горной породы и параметры механизма разрушения

Минеральный состав и структурно-текстурные особенности горных пород находятся в причинной зависимости от формирующих их геологических процессов, которые протекают в определенных физико-химических условиях.

Результаты испытаний на установке УОБ-1 более двух тысяч образцов горных пород с различных месторождений бывшего СССР позволяют говорить о характерных особенностях разрушения в зависимости от генетического типа горной породы. Индивидуальные особенности разрушения горной породы, выражаются в сочетании значений удельной акустической энергии, коэффициента распределения энергии и параметров акустического спектра (рис. 20). Диапазон изменения удельной акустической энергии, измеренной с помощью установки УОБ-1 составляет не менее 83 дБ (в 14250 раз): от $4000 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ (песок мелкозернистый) до $57000000 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ (кремний).

Осадочные горные породы, в целом, характеризуются низкочастотным спектром, невысокими значениями удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении, и коэффициента распределения энергии (табл. 10). Только грубообломочные несцементированные горные породы (галыки, конгломераты, валуны) и кремнистые горные породы, имеют $W_{\text{дв}}$, K_p и спектр, сравнимые с магматическими породами. Это объясняется тем, что обломки в грубообломочных горных породах имеют значительные размеры (диаметр обломков более 2 мм) и сохраняют свойства первичных пород (гранитов, габбро и др.). Вследствие масштабного фактора разрушение таких пород вращающимся инструментом сходно разрушению первичных горных пород.

Магматические породы характеризуются высокими значениями $W_{\text{дв}}$ и K_p и средне - высокочастотным спектром (табл. 11). Эффузивные горные породы, по сравнению с их глубинными аналогами, имеют более низкие значения $W_{\text{дв}}$, K_p , и

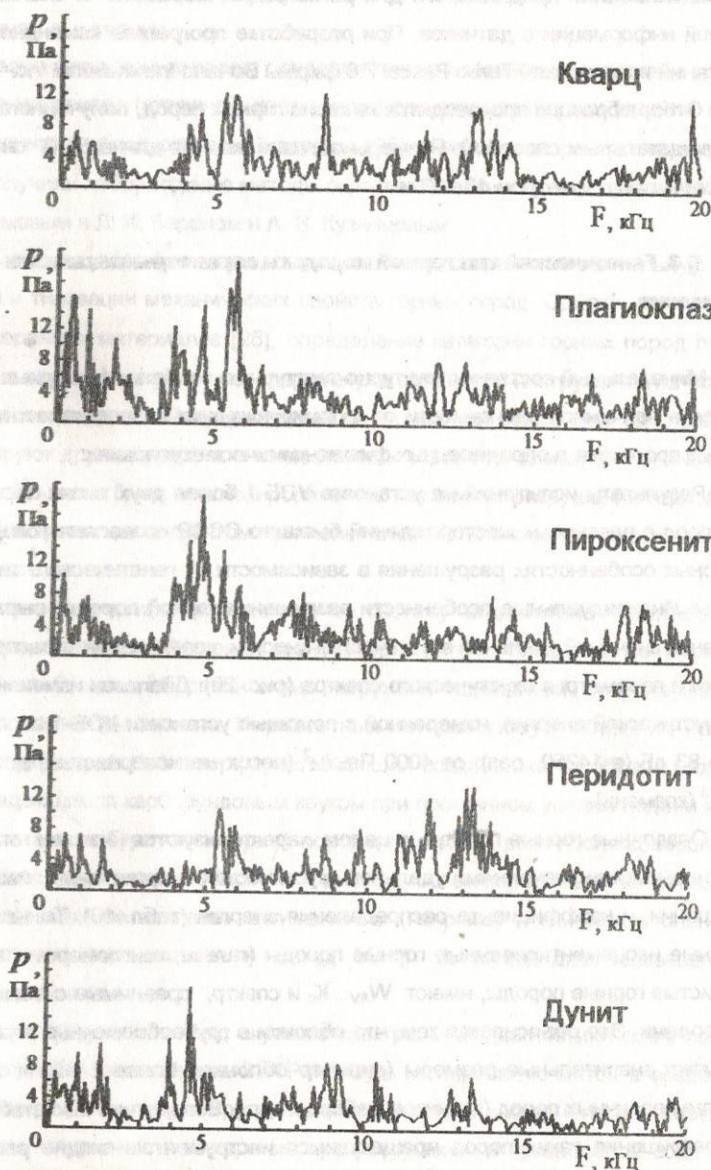


Рис. 20. Спектры звукового давления при резании дунита, перидотита, пироксенита, плаггиоклазита и кварца.

более низкочастотный спектр, что можно объяснить худшей раскристаллизованностью и наличием в них стекла.

Особенностями разрушения магматических горных пород является понижение коэффициента распределения энергии у жильных пород (аплитов), по сравнению с гранитами. Это можно объяснить структурными особенностями указанных горных пород: аплиты, как правило, имеют мелко-тонкозернистую структуру, а граниты, в основном, имеют средне-крупнозернистые структуры.

Таблица 10

Параметры механизма разрушения осадочных горных пород

Генетические группы	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		W_{av} $\times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$	K_p $\times 10^{-2}, \text{Па}/\text{Вт}$	Тип спектра
Обломочные	Щебень, галька	3,1 - 18,1	3,2 - 5,8	СЧ, ВЧ
	Пески	<0,046	0,3 - 0,7	НЧ
	Алевриты	<0,0054	0,3 - 0,5	НЧ
	Брекчии, конгломераты	1,4 - 14,3	0,2 - 3,8	СЧ, ВЧ
	Песчаники	1,1 - 15,9	3,5 - 6,0	НЧ, СЧ
	Алевролиты	0,7 - 3,4	0,2 - 2,8	НЧ
Глинистые	Глины	0,024 - 0,529	0,1 - 0,7	НЧ
	Аргиллиты и глинистые сланцы	0,18 - 13,3	0,1 - 2,6	НЧ
Хемогенные и органогенные	Торф	< 0,0054	> 0,3	НЧ
	Ископаемые угли	0,5 - 2,5	1,5 - 2,8	НЧ
	Гипс и ангидрит	0,7 - 1,4	0,4 - 3,1	НЧ
	Галит и сильвин	0,4 - 1,3	0,3 - 3,5	НЧ
	Фосфорит	0,7 - 2,6	0,6 - 2,6	НЧ
	Мергель	1,7 - 4,4	0,5 - 2,7	НЧ
	Доломит	4,4 - 13,1	2,3 - 3,4	НЧ, СЧ
	Известняк	5,5 - 21,4	2,8 - 3,1	НЧ, СЧ
	Кремнистые породы (трепел, опока, яшма)	7,1 - 57,0	1,9 - 2,4	НЧ, СЧ, ВЧ

Более низкие значения удельной акустической энергии и коэффициента распределения энергии у перидотитов и нефелиновых сиенитов, по сравнению с гранитами, можно связать с различиями в минеральном составе и вторичными изменениями. Перидотиты - пироксен оливиновые породы, содержащие 40-90% по объему оливина, обычно в той или иной степени серпентинизированы. Минеральный состав гранитов - кварц (30-40%), полевые шпаты (60-70%), темноцветные ми-

нералы (биотит, роговая обманка и др.) (5-10%). Твердость по Моосу основных породообразующих минералов гранита - кварц - 7-7,5, полевые шпаты - 6-6,5, перидотита - оливин - 6,5-7, пироксен - 5-6,5. Как видно, перидотит состоит из менее твердых зерен, чем гранит. Значительно понижает прочность перидотитов серпентинизация.

По сравнению с гранитами, их эффузивные аналоги дациты имеют несколько меньшие значения удельной акустической энергии и коэффициента распределения энергии, что можно объяснить наличием в дацитах стекла.

В целом эффузивные породы имеют более низкие значения коэффициента распределения энергии и более низкочастотный спектр, чем интрузивные породы.

Таблица 11

Параметры механизма разрушения магматических горных пород

Генетические группы	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		$W_{ав}$ $\times 10^6$, Па с/м ³	K_p $\times 10^{-2}$, Па/Вт	Тип спектра
Интрузивные	Граниты	20,6 - 34,4	3,9 - 7,0	ВЧ
	Пегматиты	21,3 - 26,5	5,1 - 7,3	ВЧ
	Аплиты	23,6 - 31,6	3,5 - 4,2	ВЧ
	Диориты	24,1 - 28,3	4,1 - 6,4	ВЧ
	Габбро	13,4 - 29,7	4,2 - 6,2	СЧ, ВЧ
	Перидотиты	10,8 - 18,4	2,7 - 4,9	СЧ
	Нефелиновые сиениты	15,4 - 26,5	2,9 - 5,1	СЧ, ВЧ
Эффузивные	Дацииты	17,1 - 29,4	4,6 - 5,2	СЧ, ВЧ
	Игнимбриты	18,3 - 22,2	3,5 - 5,1	СЧ
	Базальты	21,7 - 25,3	3,9 - 4,8	СЧ, ВЧ
	Туфы	9,1 - 15,4	3,1 - 4,5	НЧ, СЧ
	Обсидиан	14,4 - 16,6	3,5 - 4,7	СЧ
	Пемза	10,3 - 14,7	3,7 - 4,4	СЧ

Метаморфические породы имеют большой разброс значений $W_{ав}$, K_p и формы акустического спектра (табл. 12). Повышенные значения K_p фиксируются только у хорошо раскристаллизованных горных пород (гнейсы, гранито-гнейсы) и пород, состоящих из слабосцементированных кварцевых зерен (кварцито-песчаники). Близкими параметрами разрушения обладают филлиты и зеленые сланцы; мраморизованные известняки и мраморы; гнейсы, гранито-гнейсы и мигматиты; джеспилиты и роговики.

Значительные колебания параметров механизма разрушения имеют амфиболиты, скарны, кварциты, что можно объяснить большим разбросом свойств горных пород входящих в указанные группы. Так к амфиболитам относятся и змеевик и нефрит. К кварцитам отнесены горные породы с различной степенью окварцевания. Большой разброс параметров механизма разрушения имеют скарнированные породы.

Таблица 12

Параметры механизма разрушения метаморфических горных пород

Вид метаморфизма	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		$W_{ав}$ $\times 10^6$, Па с/м ³	K_p $\times 10^{-2}$, Па/Вт	Тип спектра
Региональный	Филлиты	11,3 - 16,0	1,4 - 2,6	НЧ
	Зеленые сланцы	9,3 - 15,2	1,6 - 2,3	НЧ
	Амфиболиты	7,7 - 27,0	0,9 - 2,8	НЧ, СЧ
	Кварцито-песчаники	14,2 - 28,9	3,5 - 5,6	СЧ
	Гнейсы	14,0 - 33,7	4,0 - 6,6	СЧ, ВЧ
	Гранито-гнейсы	24,4 - 36,3	4,1 - 6,3	СЧ, ВЧ
	Кварциты	5,6 - 35,7	2,8 - 4,2	СЧ, ВЧ
Контактный	Джеспилиты	31,7 - 42,7	1,9 - 2,9	ВЧ
	Роговики	25,3 - 37,1	1,7 - 2,5	ВЧ
Региональный или контактный	Скарны	23,1 - 31,2	2,6 - 5,7	СЧ, ВЧ
	Мраморизованные известняки	3,5 - 15,6	0,8 - 1,9	НЧ, СЧ
	Мраморы	4,5 - 17,4	1,1 - 2,2	НЧ, СЧ
	Мигматиты	20,7 - 33,1	4,3 - 6,1	СЧ, ВЧ

Петрофизические особенности горных пород оказывают следующее влияние на механизм разрушения:

- Увеличение прочности сцепления минеральных зерен в горной породе увеличивает удельную акустическую энергию и насыщенность спектра высокочастотными составляющими. К этому же приводит процесс окварцевания.
- Уменьшение размера минералов, слагающих горную породу, и появление скрытокристаллических, афанитовых структур увеличивает насыщенность спектра высокочастотными составляющими и уменьшает коэффициент K_p .
- Увеличение раскристаллизации горной породы и процентного содержания минералов с совершенной спайностью или внутрикристаллической трещиноватостью увеличивает коэффициент K_p .

§ 4. Классификация горных пород по удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении

Результаты исследований зависимостей между $W_{ав}$ и прочностными свойствами горных пород, механической скоростью бурения и ресурсом алмазных коронок позволяют утверждать, что удельная акустическая энергия $W_{ав}$ является качественно новым свойством горной породы "прочность на воздействие вращающимся породоразрушающим инструментом" и может использоваться в качестве показателя буримости горной породы.

С ростом прочностных свойств горной породы, определенным по методам царапания (Мооса), одноосного сжатия и вдавливания штампа (Л. А. Шрейнера) удельная акустическая энергия $W_{ав}$, выделившаяся при разрушении, увеличивается (табл. 13).

Таблица 13

Прочностные свойства некоторых мономинеральных образований (по данным Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского и М. М. Протодяконова) и удельная акустическая энергия $W_{ав}$

Минерал	Твердость по Моосу	Твердость по штампу, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	$W_{ав} \times 10^6$, Па·с/м ³
гипс	2	320	16	2,8
галит	2	200	32	2,5
мусковит	2,5-3,5	-	-	2,3
биотит	2,5-3,5	-	-	2,4
серпентин	2,5-3	850	48	6,9
кальцит	3	1300	16	11,0
магнезит	3,5-4	1350	40	10,5
доломит	3,5-4	2010	120	11,5
флюорит	4	-	60	16,2
апатит	5	2350	55	13,1
нефелин	5	-	110	17,6
лабрадор	6	3810	200	19,1
микроклин	6-6,5	4060	120	18,2
кварц	7-7,5	6000	260	30,1

Механическая скорость бурения и ресурс коронки уменьшаются при увеличении $W_{ав}$ разбуриваемой горной породы.

Для исследования зависимости между $W_{ав}$ и механической скоростью бурения проведены экспериментальные работы на стенде, оснащенный буровым стан-

ком СКБ-7 и контрольно-измерительной аппаратурой КУРС-613. Необходимость использования стендовых данных по механической скорости бурения в различных горных породах, выявилась после обработки производственных показателей, в результате которой установлено, что механическая скорость бурения в производственных условиях в значительной степени определяется режимом бурения.

В стендовых условиях алмазными коронками 01А3, А4ДП и И4ДП диаметром 59 мм разбуривали блоки серого гранита, гранодиорита, гранито-гнейса, биотитового гранита, гематитового кварцита и мрамора. Размер блоков - до 1 x 1 x 1 м. С целью увеличения объема исследований разбуривали осадочные горные породы (песок, алевролит песчаный, глина) и бетоны с различными наполнителями, которые помещались в скважину диаметром 93 мм пробуренную в блоке серого гранита. Всего было использовано 23 горные породы.

Методика исследований заключалась в следующем. В каждой горной породе бурили скважину глубиной 0,3. Бурение осуществляли одной коронкой на постоянном режиме при осевой нагрузке 1000 даН, частоте вращения снаряда 400 мин⁻¹ и расходе промывочной жидкости 20 дм³/мин. При бурении по секундомеру фиксировали время бурения скважины до конечной глубины. Механическую скорость бурения определяли как отношение глубины скважины к времени бурения. После окончания бурения отбирали керн. Керн кристаллических пород и бетонов распиливали на 5 частей длиной 6 см. Удельную акустическую энергию, выделившуюся при разрушении горной породы, определяли при испытаниях керна на установке УОБ-1. На каждом образце делалось три реза смещенные друг от друга на угол 120°. Всего по каждой горной породе сделано 15 резов. Значение $W_{ав}$ усреднялось по всем резам.

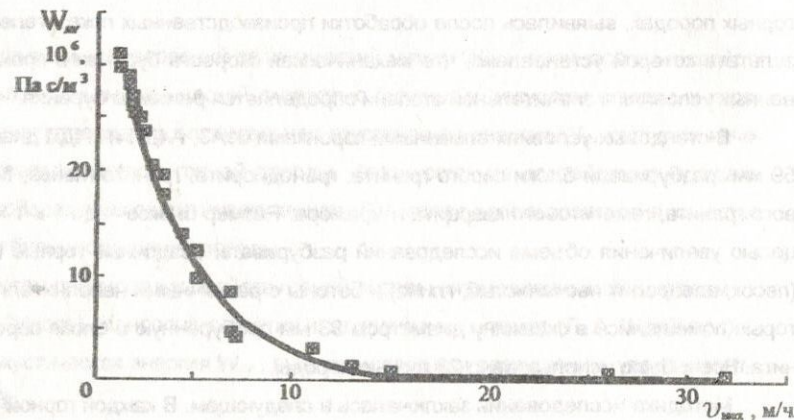
Для всех типов коронок зависимости между $v_{мех}$ и $W_{ав}$ при бурении на постоянном режиме аппроксимированы экспоненциальными функциями вида:

$$v_{мех} = a \cdot e^{(-W_{ав}/b)}$$

Зависимость между механической скоростью бурения коронкой 01А3-59 и $W_{ав}$ (рис. 21а) представляет экспоненциальную функцию: $v_{мех} = 8,43 \cdot e^{(-W_{ав}/3607592)}$.

Зависимости между ресурсом коронки, расходом алмазов на бурение и $W_{ав}$ разбуриваемой горной породы устанавливались по результатам отработки коронок в производственных условиях. Керна горных пород по которым имелись показатели отработки коронок были доставлены в ВИТР и подверглись испытаниям на

а



б

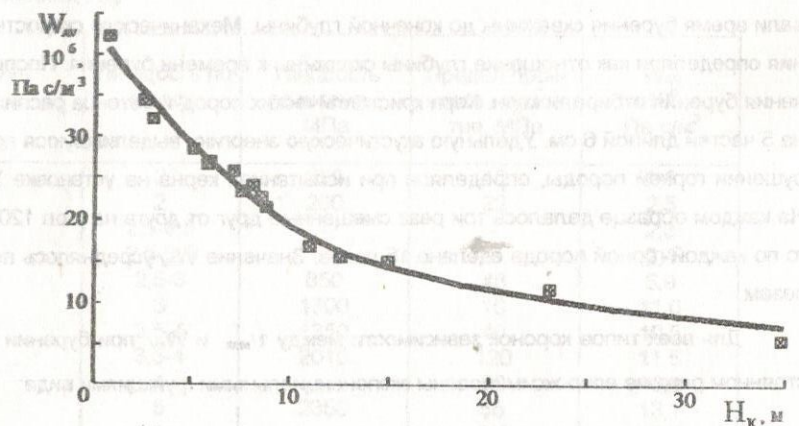


Рис. 21. Зависимости удельной акустической энергии W_{av} от механической скорости бурения v_{max} коронкой 01A3-59 (а) и ресурса H_k коронки 01A3-59

установке УОБ-1. Для большинства коронок зависимость между ресурсом и W_{av} является экспоненциальной функцией вида:

$$H_k = a \cdot e^{-(W_{av}/b)}$$

Зависимость между расходом q алмазов на бурение и W_{av} представляет степенную функцию вида:

$$q = a \cdot W_{av}^b, \quad b > 1.$$

Характерным примером являются результаты отработки однослойных алмазных коронок 01A3-59 (с содержанием алмазов в среднем 6 карат и твердостью матрицы 20 - 25 HRC) по глинистому и песчанистому сланцам, песчанику, известняку, туфопесчанику, игнимбриту, андезиту, дациту, гранато - биотитовому и дис-тен - гранат - биотитовому гнейсам, лейкоплагиограниту, плагиомикроклиновому пегматиту, железистому окисленному, гематит - магнетитовому и краснополосча-тому кварцитам. Оработка коронок производилась на объектах ПГО "Севзапгеология", ПГО "Южургеология", ПГО "Донбассгеология" и ряде других геологических организаций Мингео СССР. Зависимость между ресурсом H_k коро-нок 01A3-59 и W_{av} аппроксимирована функцией: $H_k = 5,9 \cdot 10^6 + 37,3 \cdot 10^6 \cdot e^{-(W_{av}/10,2)}$ (рис. 21б). Зависимость расхода алмазов q при бурении коронкой 01A3-59 от W_{av} аппроксимирована степенной функцией вида $q = 4,63 \cdot 10^{-3} W_{av}^{1,7}$ с коэффициентом корреляции 0,89.

Соотношение W_{av} и категорий горных пород по буримости ЕНВ установлено эмпирическим способом путем разделения диапазона изменения W_{av} на 12 под-диапазонов (табл. 14). Группирование горных пород по категориям по W_{av} качест-венно совпадает с группированием горных пород в классификации ЕНВ.

Классификация некоторых типичных представителей горных пород по кате-гориям буримости ЕНВ и по показателю W_{av} приведена в табл. 15. Первая кате-гория формируется за счет рыхлых осадочных горных пород (песок, растительный слой и др.) Во II-V категориях находятся осадочные песчано - глинистые породы (глины, суглинки, алевролиты и др.) и осадочные слабометаморфизованные поро-ды (сланцы глинистые и др.). Шестая - седьмая категории формируется за счет осадочных (известняк), вулканогенно-осадочных (туфопесчаник, туф и др.) и мета-морфизованных пород (филлит, мраморизованный известняк и др.). Восьмая-одиннадцатая категории формируются в основном за счет магматических (габбро, граниты и др.) и метаморфических (кварциты, гнейсы и др.) горных пород. К XII ка-

теории по результатам испытаний отнесены монолитно-сливные метаморфические горные породы (яшмы и др.).

Таблица 14

Соотношение показателя W_{AV} и категорий горных пород по буримости ЕНВ

Категория (группа) горных пород по буримости ЕНВ	Диапазон изменения W_{AV} , $\times 10^6$ Па·с/м ³
I	менее 0,01
II	0,01 - 0,1
III	0,1 - 1,0
IV	1-4
V	4-8
VI	8-12
VII	12-16
VIII	16-21
IX	21-26
X	26-31
XI	31-37
XII	более 37

С целью выявления возможностей метода ВИТР-А были проведены сравнительные исследования определения буримости горных пород по методу ВИТР-А и ЦНИГРИ.

Как известно, контрольное определение буримости для вращательного бурения по методу ЦНИГРИ основывается на числовых значениях коэффициентов динамической прочности F_d и абразивности K_{abr} , определяемых с помощью комплекта прибора ПОАП-2М. Показателем буримости является объединенный показатель ρ_m , рассчитываемый по формуле:

$$\rho_m = 3 F_d^{0,8} K_{abr}$$

Категория пород по буримости для вращательного бурения определяется затем по значению ρ_m , исходя из табличных данных [42].

Для проведения сравнительных исследований были отобраны образцы, представляющие все генетические комплексы горных пород с I по XII категорию по шкале ЕНВ. Отбор образцов производился, в основном, из керна диаметром до 100 мм. Рыхлые породы I-II категорий отбирались в объеме 1 дм³ на каждый образец.

Каждый образец был разделен на три части, одна из которых испытывалась по методу ВИТР-А, вторая - по методу ЦНИГРИ, третья являлась контрольным

Таблица 15

Классификация горных пород по показателю буримости W_{AV} - удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении

Категория (группа) пород по буримости ЕНВ	W_{AV} , $\times 10^6$ Па·с/м ³	Типичные представители горных пород (значение W_{AV})
I	<0,01	ил влажный (<0.0037), песок мелкозернистый (<0.0042), торф (<0.0047), растительный слой (<0.0045), супесь (<0.0057)
II	0,01 - 0,1	глина песчаная (0.024), песок кварцевый глинистый (0.048), суглинок (0.056), глина (0.065), алевролит (0.07)
III	0,1 - 1	глина серо-зеленая (0.18), глина аргиллитоподобная (0.45), глина алевролитовая (0.53), аргиллит тонкозернистый (0.61), алевролит тонкослоистый (0.99)
IV	1 - 4	песчаник (1.05), уголь (1.9), сланец песчаный (2.0), известняк доломитизированный (2.7), мел (3.1), алевролит кварцсодержащий (3.4), гипс (3.5), аргиллит (3.9)
V	4 - 8	сланец глинистый (5.3), песчаник (5.6), мергель (5.6), песчаник (5.8), змеевик (7.7)
VI	8 - 12	сланец углистый (8.5), перидотит (8.7), туфопесчаник ожелезненный (9.2), известняк (9.4), сланец песчано-глинистый (9.7), мрамор (11.0), доломит (11.7)
VII	12 - 16	известняк мраморизованный (12.1), туф дацитового состава (12.1), скарн гранатовый (12.1), перидотит (13.2), филлит (14.9), песчаник (15.1), мрамор (15.9)
VIII	16 - 21	туфогравелит (16.2), песчаник кварцитовидный (16.3), туфопесчаник (17.7), микроклин (18.2), игнимбрит дацитового состава (18.3), амфиболит (18.4), гранит каолинизированный (19.1), габбро-норит (19.7), известняк (20.1)
IX	21 - 26	известняк (21.4), пегматит (21.8), дацит окварцованный (22.8), габбро (23.2), гнейс гранатово-биотитовый (24.0), гранито-гнейс (24.4), гранит биотитовый (24.9), диорит кварцевый (25.9), габбро-диабаз (25.9)
X	26 - 31	гнейс окварцованный (26.6), гранит биотитовый (26.6), мигматит-гранит (26.8), фельзит окварцованный (27.2), гранодиорит (28.5), кварцит железистый (28.7), аплит (29.7), кварц жильный (30.1), кварцит гематитовый (30.9)
XI	31 - 37	яшмоид красный (31.2), кварцит (32.1), песчаник окварцованный м/з (32.5), кварцит розовый (33.8), кварцит красный м/з (34.6), роговик гематито-магнетитовый (36.7), джеспилит (37.0)
XII	> 37	яшма (39.0), джеспилит (40.3), яшма (40.3), роговик гематито-магнетитовый (43.5), кремнь (57.0)

образцом. Необходимый объем образца горной породы, предназначенный для испытаний по каждому методу, определяли по методикам испытаний.

Генетические комплексы были представлены следующими горными породами.

Осадочные горные породы - пески, глины, супеси, суглинки, известняки, песчаники, доломит, гипс, мергель, аргиллиты, алевролиты и др.

Вулканогенно-осадочные горные породы - туфы различного состава, туфопесчаники, туфогравелиты, игнимбриты и др.

Магматические горные породы представлены интрузивными и эффузивными горными породами.

Интрузивные горные породы - граниты, гранодиориты, габбро, мигматиты, аплиты, гранито-гнейсы, кварц жильный и др.

Эффузивные горные породы - дациты, фельзиты, порфириты, базальты и др.

Метаморфические горные породы - мраморизованные известняки, мраморы, сланцы глинистые, песчано-глинистые, песчанистые и углистые, гнейсы, амфиболиты, кварциты, железистые кварциты, джеспилиты, роговики, яшмы.

Для расширения области исследования испытаны образцы искусственных "пород": асфальта, шамотного и силикатного кирпича, других строительных материалов.

Испытания образцов горных пород по методу ВИТР-А проведены на установке УОБ-1 на базе Опытно-методической экспедиции ВИТРа (пос.Стекланный, Ленинградская область); испытания по методу ЦНИГРИ - на кафедре технологии и техники бурения скважин Санкт-Петербургского горного института с использованием прибора ПОАП-2М по методике испытаний, изложенной в ОСТ 41-89-74. Количество образцов горных пород, испытанных по обоим методам, составило 114 штук.

В результате испытаний для каждого образца горной породы определены значения показателей W_{AV} и ρ_m и затем установлены категории горных пород по буримости по методу ВИТР-А и ЦНИГРИ.

Из 114 образцов горных пород, отобранных для сравнительных исследований, категория пород по буримости методом ВИТР-А определена для всех образцов. Категория по буримости методом ЦНИГРИ определена только для 88 образ-

цов: для остальных 26 образцов категорию буримости не удалось установить из-за невозможности определения:

1) динамической прочности по толчению вследствие рыхлого или текучего состояния ряда образцов (влажный ил, мелкозернистый песок, торф, растительный слой, супесь), повышенной пластичности и малой прочности образца (песчанистая глина, кварцевый глинистый песок, суглинок, глина, алевролит, серо-зеленая глина, алевролитистая глина, алевролиты глинистый и тонкослоистый, песчаник), повышенной вязкости образца (асфальт);

2) коэффициента абразивности образца (уголь).

Категория буримости "ниже 5" по методу ЦНИГРИ зафиксирована у тонкозернистого аргиллита, алевролита, доломитизированного известняка, мела и гипса.

Анализ образцов, для которых методом ЦНИГРИ не удалось определить категорию пород по буримости, показал, что их можно отнести к малопрочным, нетвердым горным породам; при механическом воздействии на некоторые из них, наблюдается большая остаточная деформация. На эти горные породы, как известно, метод ЦНИГРИ не распространяется [42].

Результаты испытаний в целом подтвердили известные характерные особенности, присущие методу ЦНИГРИ:

1. Метод имеет ограничение по области применения в малопрочных горных породах (I - IV категорий), а также в таких горных породах как уголь, мел и др. Установлено, что метод не может применяться и для некоторых искусственных каменных материалов, используемых в строительном и дорожном деле.

2. При группировании горных пород по коэффициенту динамической прочности по толчению, в одни группы попадают горные породы с резко отличающимися прочностными свойствами и показателями бурения [42]. Например, большинство гранитов имеет динамическую прочность, значительно меньшую, чем динамическая прочность песчанистых сланцев или известняков. Динамическая прочность филлита, наоборот, даже превышает динамическую прочность железистого кварцита и других труднобуримых пород.

3. При группировании горных пород по коэффициенту абразивности, в одну группу могут попасть горные породы, имеющие резко различающиеся прочностные характеристики и показатели бурения. Например, низкопрочная, легко буримая порода типа кварцсодержащего алевролита, разбуриваемая твердосплавным инструментом, находится в одной группе по абразивности с труднобуримыми гранитами и кварцитом, при бурении которых применяется алмазный инструмент.

Сопоставление результатов определения категорий буримости по методам ВИТР-А и ЦНИГРИ показало, однако, в целом достаточно высокую сходимость. Из 88 образцов, для которых была определена категория пород по буримости по обоим методам, категория совпала у 30 образцов (34%), отличалась на одну категорию у 48 образцов (55%); на две категории - у 9 образцов (11%).

Зависимость $W_{ав} = f(\rho_m)$, рассчитанная по 93 образцам аппроксимирована линейной функцией $W_{ав} = 0,64\rho_m + 7,06$ с коэффициентом корреляции $r = 0,87$ (рис.20а). В число образцов включены также 5 образцов с категорией по буримости по методу ЦНИГРИ "ниже 5". Высокий коэффициент корреляции указывает на существование достаточно тесной связи между двумя показателями буримости.

По знаку отклонения в категории пород по буримости, определенной для одних образцов, горные породы разделены на две группы.

Первая группа состоит из горных пород, у которых категория по буримости, определенная по методу ВИТР-А, меньше, чем по методу ЦНИГРИ. Как показал анализ, данную группу можно разделить на две подгруппы. В первую подгруппу входят горные породы с невысокими значениями динамической прочности по толчению, но с относительно высоким коэффициентом абразивности (аргиллит, различные песчаники и др.). Наиболее характерным представителем данной группы является кварцсодержащий алевролит, для которого установлен очень высокий коэффициент абразивности (2,03). В результате категория пород по буримости алевролита по методу ЦНИГРИ на две единицы больше, чем по методу ВИТР-А. Вторая подгруппа формируется за счет горных пород, имеющих относительно высокие значения динамической прочности и относительно низкий коэффициент абразивности. В эту подгруппу входят перидотит, ожелезненный туфопесчаник, доломит, песчанистый сланец, туф и игнимбрит дацитового состава, амфиболит, габбро-норит, окварцованный дацит.

Вторая группа - горные породы, у которых категория пород по буримости по методу ВИТР-А оказалась выше, чем по методу ЦНИГРИ, также разбивается на две подгруппы. Первая подгруппа составлена из осадочных (известняк) и метаморфизованных пород (мраморы, мраморизованные известняки, гранатовый скарн, филлит) с относительно высокой динамической прочностью по толчению ($F_d > 6$) и низким коэффициентом абразивности ($K_{абр} < 0,5$). Характерный представитель этой подгруппы - мрамор, для которого установлен низкий коэффициент абразивности (0,48). Вторая подгруппа составлена магматическими и метаморфизованными магматическими породами (различными гранитами, гранито-гнейсами,

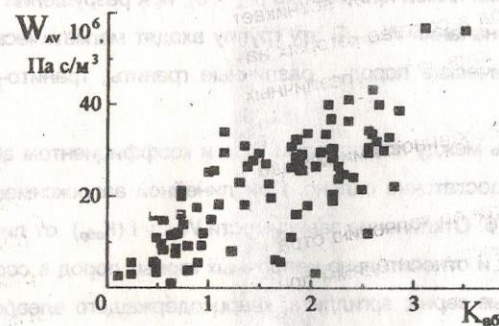
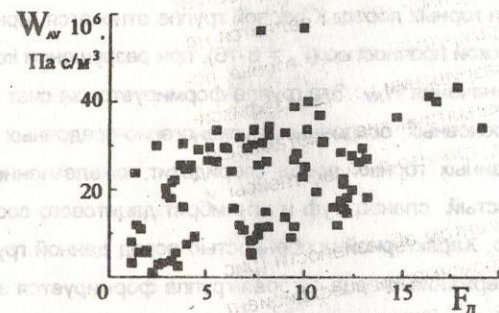
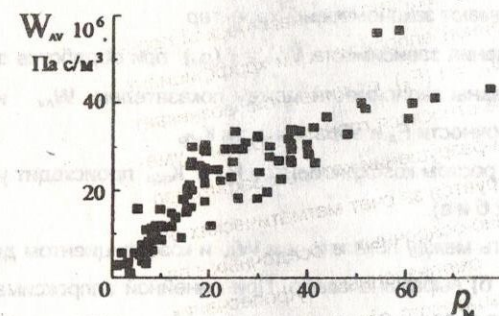


Рис. 22. Зависимости удельной акустической энергии $W_{ав}$ от показателей, определенных по методу ЦНИГРИ: объединенного показателя ρ_m (а), коэффициента динамической прочности F_d (б) и коэффициента абразивности $K_{абр}$ (в).

гнейсами и др.) с малой динамической прочностью ($F_d < 5$), но с высоким коэффициентом абразивности ($K_{абр} > 2,0$).

Таким образом, несмотря на тесную связь между $W_{ав}$ и ρ_m отклонения в категории пород по буримости, определенной по двум методам для одного образца горной породы, имеют закономерный характер.

Для понимания зависимости $W_{ав} = f(\rho_m)$ при обработке экспериментальных данных исследованы зависимости между показателем $W_{ав}$ и коэффициентами динамической прочности F_d и абразивности $K_{абр}$.

В целом, с ростом коэффициентов F_d и $K_{абр}$ происходит увеличение показателя $W_{ав}$ (рис. 22 б и в).

Зависимость между показателем $W_{ав}$ и коэффициентом динамической прочности F_d (рис. 22 б) выражена слабо. При линейной аппроксимации коэффициент корреляции $r = 0,64$. Отклонение зависимости $W_{ав} = f(F_d)$ от линейной возникает за счет двух групп горных пород. К первой группе относятся горные породы с умеренной динамической прочностью ($F_d = 8-16$), при разрушении которых зафиксированы невысокие значения $W_{ав}$. Эта группа формируется за счет магматических основных и ультраосновных, осадочных, вулканогенно-осадочных и осадочных слабометаморфизованных горных пород: перидотит, ожелезненный туфопесчаник, доломит, песчанистый сланец, туф и игнимбрит дацитового состава, амфиболит, габбро-норит и др. Характерной особенностью пород данной группы является незначительное содержание кварца. Вторая группа формируется за счет горных пород с малой динамической прочностью ($F_d < 8$), при разрушении которых зафиксированы высокие значения $W_{ав}$. В эту группу входят магматические и метаморфизованные магматические породы: различные граниты, гранито-гнейсы, гнейсы и др..

Зависимость между показателем $W_{ав}$ и коэффициентом абразивности (рис. 22 в) выражена достаточно сильно. При линейной аппроксимации коэффициент корреляции $r = 0,76$. Отклонение зависимости $W_{ав} = f(K_{абр})$ от линейной возникает за счет осадочных и относительно непрочных горных пород в составе которых находятся абразивные зерна: аргиллита, кварцсодержащего алевролита, различных песчаников и др..

По мнению автора, это определяется следующими особенностями метода ЦНИГРИ.

С одной стороны, коэффициент динамической прочности по толчению отражает только свойство кусочков породы создавать шлам крупностью до 0,5 мм при

десятикратном воздействии падающего груза и никоим образом не связан с способностью горной породы сопротивляться разрушению под воздействием вращающегося инструмента. Именно поэтому в одни группы по динамической прочности попадают известняки и граниты, а динамическая прочность филлита может превышать динамическую прочность жильного кварца. С другой, коэффициент абразивности отражает свойство свинцовой дроби изнашиваться при взаимодействии с частицами горной породы размером менее 0,5 мм и не связан со способностью горной породы изнашивать породоразрушающий инструмент при бурении. Именно поэтому в одни группы по абразивности могут попасть граниты и слабые песчаники, состоящие из кварцевых зерен.

Парадокс возможности определения показателя буримости по формуле $\rho_m = 3F_d^{0,8}K_{абр}$, по мнению автора, связан с ростом содержания наиболее твердого и абразивного породоразрушающего минерала (кварца) в труднобуримых породах. Этот факт позволяет получать высокие значения категорий пород по буримости за счет коэффициента абразивности.

Особенности метода ЦНИГРИ, заключающиеся в испытании породы в раздробленном состоянии, в используемых видах воздействия на горную породу и в методике расчета показателя буримости, вносят в результаты определения категорий пород по буримости значительную погрешность. Метод ВИТР-А лишен указанных недостатков, так как основывается на интегральном показателе, отражающем реакцию породы при разрушении вращающимся инструментом.

Результаты определения буримости по методу ВИТР-А лучше согласуются с результатами на практике бурения, что можно проиллюстрировать следующими примерами. Кварцсодержащий алевролит, имеющий VII категорию по методу ЦНИГРИ (за счет высокого коэффициента абразивности), по методу ВИТР-А отнесен к V категории, что совпадает с результатами бурения в Невской ГРП ГП "Севзапгеология", где был отобран образец.

Группа гранитов и плагиогранитов, отобранных при бурении скважины "Тепловая" (г. С-Петербург, ВИТР), соответствуют по методу ЦНИГРИ VIII категории (за счет пониженной динамической прочности, $F_d = 3,67 - 5,93$), но к IX категории по методу ВИТР-А; последнее подтверждено сравнением показателей механической скорости и ресурсом алмазных коронок зафиксированных в ходе работ. Жильный кварц с Печенгского рудного поля, отнесенный по методу ЦНИГРИ к VIII категории (за счет невысокой динамической прочности, $F_d = 2,39$), имеет по методу

ВИТР-А X категорию, что согласуется с результатами многолетнего опыта бурения на данном объекте.

В процессе испытаний производилось сравнение технико-экономических показателей методов ВИТР-А и ЦНИГРИ. Временные затраты на проведение операций при определении буримости горных пород получены на основе данных хронометража. Сравнение полученных показателей выявило преимущество метода ВИТР-А за счет:

- отсутствия ограничений по области применения: метод ВИТР-А может использоваться для всех горных пород, разрушаемых механическим способом;
- экономии невосполнимого ядерного материала: необходимый объем пробы для проведения испытаний по методу ВИТР-А составляет 3-8 см зерна диаметром 30-60 мм, что в 4 раза меньше, чем для метода ЦНИГРИ;
- отсутствия операции пробоподготовки;
- увеличения производительности испытаний: на определение буримости по методу ВИТР-А затрачивается 7 мин - это в 10 раз меньше, чем по методу ЦНИГРИ;
- уменьшения стоимости испытаний: стоимость одного испытания по методу ВИТР-А не менее чем в 5 раз ниже, чем по методу ЦНИГРИ.

§ 5. Основы выбора параметров алмазных коронок для бурения

Многолетний опыт ВИТР в области геологоразведочного бурения показывает, что существуют группы горных пород с определенным влиянием на износ породоразрушающего инструмента. При бурении алмазы и матрица могут изнашиваться с различной скоростью. Распространенными видами износа алмазных коронок являются: чрезмерное обнажение алмазов, заполирование алмазов, заполирование алмазов и матрицы [44]. Очевидно, что при соблюдении нормального технологического режима общая скорость износа матрицы по высоте зависит от соотношения скоростей изнашивания алмазов и матрицы, которые, в свою очередь, определяются комплексом свойств разбуриваемой горной породы.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что различные виды износа алмазных коронок являются следствием определенных комбинаций динамических и тепловых нагрузок, возникающих на забое. Отсюда следует, что более правильно будет говорить не об абразивных свойствах горной породы, а о харак-

тере механизма разрушения, который возникает в результате силового воздействия на горную породу вращающимся алмазным инструментом.

Метод акустико-спектральной диагностики может успешно применяться для выделения горных пород с близкими механизмами разрушения. На основе W_{AV} и K_p , определенных на установке УОБ-1, типизированы формации (механизмы разрушения) горных пород и разработана классификация, предназначенная для выбора конструктивных параметров алмазного инструмента для бурения (табл. 15).

Физической основой классификации явились следующие выводы:

1. Чем больше удельная акустическая энергия, выделяющаяся при разрушении горной породы, тем выше уровень динамических нагрузок, воспринимаемых алмазами при бурении и меньше ресурс алмазов и коронки в целом.
2. Чем меньше коэффициент распределения энергии при разрушении, тем больше энергии расходуется на пластические деформации и трение и переходит в тепло, что является дополнительным фактором уменьшения ресурса алмазов.
3. Насыщение спектра высокочастотными составляющими (рост крайней и средней частот акустического спектра) указывает на увеличение частоты взаимодействия алмазов с забоем и, соответственно, на снижение их ресурса.

Для создания классификации осуществлялось группирование горных пород с близкими значениями W_{AV} , K_p и типа акустического спектра и анализировались производственные данные по отработке породоразрушающего инструмента в каждой группе. При разработке классификации использовались данные сектора государственных испытаний ВИТР по отработке алмазных коронок на объектах ПГО "Севзапгеология", ПГО "Южургеология", ПГО "Добассгеология" и др. Основным источником производственной информации явились порейсовые и накопительные ведомости отработки алмазных коронок.

Обработка данных испытаний горных пород по методу ВИТР-А и результатов отработки алмазных коронок показала, что горные породы, в которых происходит развитие определенного вида износа алмазных коронок, образуют достаточно компактные группы с определенным сочетанием W_{AV} , K_p и типа акустического спектра. Формации горных пород с повышенным абразивным воздействием к матрице, выделяются по высокому значению коэффициента K_p . Наиболее абразивны песчаники, выветрелые граниты и гранатовые гнейсы. Формации горных пород, предрасположенные к заполированию алмазного инструмента характеризуются

Таблица 16. Классификация механизмов разрушения горных пород и рекомендуемые параметры алмазных коронок

Рекомендуемые конструктивные параметры алмазных коронок																	
Группа	$W_{AV} \times 10^6, \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$	Подгруппа	$K_r \times 10^{-2}, \text{ Па} / \text{Вт}$	Характер влияния на износ коронок			Наименование типичных горных пород	однослойных				наплетенных					
				Износ алмазов	Абразивность к матрице	Заполнение матрицы		Качество алмазов	Размер шт/кар	Тип матрицы	Качество алмазов	Размер алмазов, мкм	Тип матрицы				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
1	1-8	-	-	Низкий	Очень низкая	Очень низкая	Алевролит, аргиллит, уголь, известняк, мергель, туф, гипс.	Н	12-8	С	Н	800/630	Применение не рекомендуется				
														Низкая	Очень низкая	30-20	50-30
2	8-16	1	<3	Средний	Средняя	Очень низкая	Мрамор, перидотит, фидилит, доломит. Сланец песчанистый, известняк, туф.	Н, С	60-40	С	Н, С	630/500	М				
														Высокая	Средняя	60-40	90-60
3	16-26	1	<3	Низкая	Средняя	Низкая	Скарн гранатовый, песчаник.	Н, С	60-40	Т	Н	800/630	Т				
														Средняя	Низкая	60-40	90-60
4	26-37	1	<3	Очень высокий	Низкая	Высокая	Кварц, железистый кварцит, аллит.	С, В	60-40	Т	Н, С	630/500	Т, ОТ				
														Средняя	Низкая	60-40	90-60
5	>37	1	<3	Средняя	Очень низкая	Средняя	Яшма, джеспилит, гранатовый гнейс, кремль.	В	Применение не рекомендуется	Т	Н	400/315	ОМ				
														Средняя	Низкая	60-40	90-60

высокой W_{AV} и низким K_r . Отличительной особенностью механизма разрушения "полирующих" горных пород является насыщенность спектра высокочастотными составляющими. Типичными представителями "полирующей" формации являются яшмы, джеспилиты и кремнь.

В предлагаемой классификации (табл. 15, гр. 1 - 4) по величине W_{AV} устанавливается 5 основных групп механизмов разрушения горных пород. Группы 2-5 по величине коэффициента K_r разбиты каждая на 3 подгруппы. Графы 5 - 7 таблицы качественно характеризуют влияние механизма разрушения на износ алмазов, абразивность к матрице и заполирование коронки. В графе 8 приведены типичные представители горных пород, а в графах 9 - 14 - рекомендуемые конструктивные параметры коронки.

Для каждой формации разработаны рекомендации по выбору рациональной комбинации конструктивных параметров алмазных коронок, обеспечивающей самозатачиваемость коронки и снижение вероятности развития аномальных видов износа (табл. 15).

За основу рекомендаций были взяты три наиболее важных конструктивных элемента алмазных коронок - качество и размер (зернистость) объемных алмазов и тип матрицы. В классификации принята следующая маркировка конструктивных параметров.

а) Типы матрицы: ОМ - очень мягкая (до 84 HRB), М - мягкая (84-88 HRB); С - средней твердости (88-93 HRB и 25-35 HRC); Т - твердая (30-40 HRC); ОТ - очень твердая (45-55 HRC).

б) Порошки природных и синтетических алмазов разбиты на три группы:

"В" (высокого качества) - природные алмазы марок А8 - А9 (по классификации компании "Алмазы Якутии - Саха") и синтетические алмазы прочностью свыше 160 Н, характеризующиеся высокой прочностью, износостойкостью, ударной стойкостью и термостойкостью.

"С" (среднего качества) - природные алмазы марок А6 и А7 и синтетические алмазы прочностью свыше 100 - 160 Н, характеризующиеся хорошей прочностью, износостойкостью, ударной стойкостью и термостойкостью.

"Н" (низкого качества) - природные алмазы марки А5 и синтетические алмазы прочностью 65 - 100 Н, характеризующиеся термостойкостью и не слишком высокой прочностью, износостойкостью, ударной стойкостью и термостойкостью.

в) Размер объемных алмазов, применяемых для армирования коронок, изменяется от 12-8 до 400-120 шт/кар (от 1000-800 до 250/200 мкм).

Практическое применение и апробация классификации проведены при выполнении договоров поставки алмазного инструмента для Печенгской КГРЭ ГМК "Печенганикель" и ООО "Щитстрой".

Физические принципы, заложенные в классификации, позволяют использовать ее в других отраслях экономики, связанных с механической обработкой горных пород и искусственных материалов алмазным инструментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуладзе А. М., Аббасов И. К. Тепловые явления, возникающие при бурении алмазными долотами. - Нефть. хоз-во, 1968, №3, с. 3 - 5.
2. Алексеев В. Н. Резервы совершенствования систем "буровой снаряд - скважина". - В сб.: Высокопрочные бурильные трубы для прогрессивных способов бурения. Л., ВИТР, 1988, с. 5 - 14.
3. Архипов А. Г. Разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. СПб., СПГИ, 1993.
4. Архипов А. Г. Перспективы использования акустических измерений при испытаниях серийно выпускаемого алмазного породоразрушающего инструмента. - В сб.: Методика и техника разведки. СПб., ВИТР, 1994, №3 (141), с. 69 - 72.
5. Архипов А. Г., Авдеев С. А., Андреев О. С., Шатров Б. Б. Использование акустических полей для оценки эффективности конструкций алмазных коронок при бурении. - В сб.: Применение синтетических алмазов в бурении. Л., ВИТР, 1991, с. 65 - 72.
6. Архипов А. Г., Андреев О. С. Исследование затухания высокочастотных упругих колебаний в колоннах бурильных труб различных конструкций. - В сб.: Методика и техника разведки. СПб., ВИТР, 1994, №3 (141), с. 62-68.
7. Архипов А. Г., Блинов Г. А., Курочкин П. Н. Классификация горных пород по формациям и типаж породоразрушающего инструмента. (Методические рекомендации). - СПб., ВИТР, 1999.
8. Архипов А. Г., Васильев В. И., Серов С. А. Акустический метод диагностики режима работы породоразрушающего инструмента в процессе бурения. - В сб.: Методика и техника разведки. СПб., ВИТР, 1995, №4 (142), с. 38 - 41.
9. Архипов А. Г., Гореликов В. Г. Исследование распределения энергии на забое при алмазном бурении. - В сб.: Исследование технологии и внедрение новых технических средств для бурения геологоразведочных скважин. Л., ВИТР, 1991, с. 114 - 122.
10. Арцимович Г. В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. Новосибирск, Сибирское отд. изд-ва "Наука", 1985.
11. Афанасьев И. С., Горбушин А. П., Лебедев В. Н. Опыт скоростного геологоразведочного бурения. Л., Недра, 1986.

12. Бакуль В. Н. Зависимость микротвердости синтетических алмазов от температуры. — Тез. докл. Всес. конф. "Новое в теории и практике создания и применения синтетических сверхтвердых материалов в народном хозяйстве". Киев, 1977, с. 25 - 27.

13. Бакуль В. Н., Лошак М. Г., Мальнев В. И. Микротвердость алмаза и ее зависимость от температуры. — Синтетические алмазы. 1978, №1, с. 7 - 10.

14. Беляков В. И., Блинов Г. А., Комарова З. В. и др. Исследования по разработке аппаратуры для определения горных пород и получения информации о режимных параметрах бурения с помощью электрических и упругих сигналов, возникающих на забое в процессе бурения скважин. Отчет по теме Г.П.5/300 138-2/45-И. № гос. рег. 72018724. Л., ВИТР, 1975.

15. Беляков В. И., Блинов Г. А., Григоренко П. М. и др. Исследование упругих колебаний породоразрушающего инструмента. — В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1974, с. 15 - 25.

16. Блинов Г. А., Васильев В. И., Глазов М. Г. и др. Алмазосберегающая технология бурения. Л.: Недра, 1989.

17. Борщ-Компаниец 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.

18. Бродов Г. С., Алексеев В. Н. Экспериментальные исследования термомеханического способа бурения. — В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1998, №8 (146), с. 89-95.

19. Быченков Е. И. Особенности износа алмазов в коронках при бурении скважин. — В сб.: Методика и техника разведки, Л., ВИТР, 1976, №102, с. 32 - 37.

20. Быченков Е. И. Исследование поверхности алмазов в буровых коронках. — В сб.: Методика и техника разведки, Л., ВИТР, 1976, №102, с. 38 - 43.

21. Васильев В. В., Каулин В. А., Пономарев П. П., Захарьев Б. В., Кочкарев А. С. Исследование условий самозаклинивания керна в одинарной керноприемной трубе с использованием методов скоростной киносъемки процесса. — В сб.: Техника и технология направленного бурения. Л., ВИТР, 1986, с. 98 - 102.

22. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ результатов. М., Машиностроение, 1964.

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

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

25. Гинзбург И. М., Оношко Ю. А. Методы выбора конструктивных параметров алмазного породоразрушающего инструмента. Обзор. М., ВИЭМС, 1983.

26. Горная энциклопедия. Т.1. М., Изд-во "Советская энциклопедия", 1984, с. 95.

27. Горшков Л. К., Гореликов В. Г. Температурные режимы алмазного бурения. М., Недра, 1992.

28. Горшков Л. К. Роль температурного фактора в алмазном бурении. — В кн.: Исследования, разработка и внедрение технологии алмазного бурения на твердые полезные ископаемые. Л., ВИТР, 1984, с. 52 - 58.

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

30. Дорота П. Н., Богданович А. И., Исаков А. Н. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры для научно исследовательских работ по технологии алмазного бурения. Отчет по теме Е.И.1.1/130И, Л., ВИТР, 1970.

31. Иванов О. В., Блинов Г. А., Зубков П. Л. Новые способы разрушения горных пород и перспективы их применения в геологоразведочном бурении. М., ОЦНТИ ВИЭМС, 1977.

32. Илларионова Т. М., Горин В. Н. Критическая скорость вращения алмазных коронок с учетом температурной стойкости алмазов — В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1978, №121, с. 22 - 29.

33. Исаев М. И., Голодец Л. С. Исследование напряженного состояния алмазных коронок. — В сб.: "Методика и техника разведки". Л., ВИТР, 1972, №78, с. 17-26.

34. Исаев М. И., Пономарев П. В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1975.

35. Касаточкин А. В. Перспективы применения синтетических поликристаллических материалов в железобетонных конструкциях. — В сб.: Труды ВНИИАЛМА-ЗА, 1976, №4, с.78 - 82.

36. Качество продукции, испытания, сертификация. Терминология: Справочное пособие. Вып. 4. М., Изд-во стандартов, 1989.

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

38. Курочкин П. Н., Исаев М. И. Исследование температурного режима работы алмазной коронки на забое скважины. - В кн.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1967, №58, с. 71 - 76.
39. Курочкин П. Н. Влияние конструктивных элементов алмазного бурового инструмента на его стойкость и механическую скорость. Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Л., 1965.
40. Лопадзе Т. Н., Бокучава Г. В. Износ алмазов в алмазных кругах. М., Машиностроение, 1967.
41. Лопадзе Т. Н., Бокучава Г. В. О рациональных областях применения инструментов из синтетических алмазов и кубического нитрида бора. - В сб.: Синтетические алмазы, 1971, с. 18-22.
42. Любимов Н. И. Классификация горных пород и рациональное применение буровой техники. М., Недра, 1977.
43. Мамбетов Р. М., Кагарманов Н. Ф. Разрушение горных пород единичным резцом в динамике. - В кн.: Тезисы докладов Всес. науч.-техн. конф. "Разрушение горных пород при бурении скважин", Уфа, 1973.
44. Марамзин А. В., Блинов Г. А. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ. Л., Недра, 1977.
45. Мухин М. Е. Прочностные свойства алмазов марки САМ. - В сб.: Науч. труды рег. совещ. "Алмазы и сверхтвердые материалы", 1974, №8, с.4-6.
46. Мэзон У. Физическая акустика. М., 1968.
47. Отчет о НИР. Исследование механизма работы породоразрушающего инструмента и влияние параметров процесса бурения на механическую скорость и затраты мощности на забое (заключительный). № гос. рег. 78037096. Курочкин П. Н., Иванов О. В., Блинов Г. А. и др. Л., ВИТР, 1980.
48. Патент РФ (АС СССР) № 1661386. Способ регулирования режима бурения. Авторы: Архипов А.Г., Авдеев С.А., Шатров Б.Б. и др. Заявл. 03.07.89. Оpubл. 07.07.91, бюл. №25.
49. Патент РФ (АС СССР) №18009023. Способ оптимизации процесса бурения. Авторы: Архипов А.Г., Шатров Б.Б., Гореликов В.Г. и др. Заявл.25.12.90. опубл. 15.04.93, бюл. №14.
50. Питерский В. М., Воробьев Г. А., Новожилов Б. А., Козловский А. Е. Перспективы разработки автоматизированной системы управления процессом бурения. - Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства. Обзор ВИЭМС, М., 1987.

51. Пономарев П. П. Алмазное бурение трещиноватых пород. - Л.: Недра, 1985.
52. Пономарев П. П., Припула Э. К. Влияние трещиноватости горных пород на работоспособность алмазных коронок и выход керна. - В кн.: Методика и техника разведки, Л., ВИТР, 1976, №107, с. 42 - 47.
53. 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 геофизике. Л., ВНИМИ, 1983, с. 53 - 57.
54. Ревнищев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов. М., Недра, 1988.
55. Ступкина Л. М. Влияние полирования поверхности алмазов на их прочность при одноосном сжатии. - В сб.: Методика и техника разведки. Л., ОНТИ ВИТР, 1975, №96, с. 5 - 8.
56. Ступкина Л. М. Исследование прочности алмаза при воздействии ударных нагрузок. - В кн.: Кристаллография. М., Наука, 1970, т.15, №4, с. 841 - 844.
57. Сулакшин С. С. Технология бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1975.
58. Тараканов С. Н. О работе мелкоалмазной коронки. М., Разведка и охрана недр, 1968, №10, с. 22 - 26.
59. Толкачев Г. М. О влиянии вида промывки на механическую скорость проходки при алмазном бурении. - Разведка и охрана недр, 1964, №8, с. 25 - 28.
60. Тхагапсоев Х. Г., Хапачев П. С., Кульчаев А. Ю. и др. Исследование повреждаемости алмаза при циклическом нагружении. - Алмазы и сверхтвердые материалы, 1979, №2, с. 4 - 6.
61. Ханин М. В. Механическое изнашивание материалов. М., Изд-во стандартов, 1984.
62. Холунов Э. А., Первухин А. В. Устройство для регистрации хрупкого разрушения при микродеформировании твердых тел. - Заводская лаборатория, 1987, №2, с. 65 - 68.
63. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев. Наук.думка, 1983.
64. Шатров Б.Б., Архипов А.Г., Андреев О.С. Исследование акустических явлений при бурении скважин и их использование в геологоразведочной практике. - В сб.: Исследование и разработка технологии и новых технических средств для геологоразведочного бурения. СПб., ВИТР, 1993, с. 38 - 50.

65. Шатров Б. Б., Андреев О. С., Рудакова Н. П., Стрыгин Д. М. Способ гео-акустического исследования скважин в процессе бурения. Авт. свид. №1385114 (СССР). Оpubл. в БИ №3, 1988.

66. 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.

67. Bulletin "Longyear" B-3100B 10 M., 1995.

68. Diamont Boart Creelius product catalogue. Part2. Printed matter №110 175/2, 1990.

69. Duer H. Physical and mechanical properties of diamond. - In: Proc.techn.conf. "Industrial Diamond": Rev., 1967, p.13 - 15.

70. Evans I., James D. Study of transformation of diamond into the graphite. - Proc. Roy Soc. London, 1964, 277, №1369, p. 260 - 269.

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

72. Horton R. M., Horton M.D. Graphitisation of diamond by high pressure - High Temperature - High pressure, 1973,5, №1, p. 39.

73. IDR. Okt. 1975, p. 363 - 365.

74. Industrie Diamanten Rundschau, 1975, 9, №6, p.223 - 227.

75. Kocuncu R. M., McCabe W. M., Lord A.E. Overview of acoustic emission monitoring of rock structures. Rock mechanics. 1981, v.14, №1, p. 249 - 259.

76. Kuwabara Takao, Kawanami Hidetugi, Nakay Mituo, Koyama Shunei. "Hore gobocy rakkau rombyncu, Trans. Jap.Soc.Jrrig, Drain and Reclam Eng.", 1984, №112, p. 87 - 92.

77. Pfeleider E. P., Blake R. L. Research on the cutting action of the diamond drill bits- Mining engineering. Vol.5. №2, 1953.

78. Sauvan P., Chennauv G. Geochemical modifications undergone by debris during drilling. - Bull. Centre Rech. Pan, 1975, 9, p. 391 - 405.

79. Seal M. Influence of surface orientation on diamond graphitisation. - Phys. status. solidi. 1963, 3, №4, p. 379 - 393.

80. Tooling, 1975, V.29, p. 36 - 43.

81. Volume DCDMA, 1995.

82. Wearend R.C., Dier H.B. A new type of Drill stone Proc. First International Congress od diamonds in industru, Paris, 1962, p. 196 - 197.

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ И ЕГО АКУСТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА

Компьютерный набор - А. Г. Архипов

Редактор - В.А. Сметлова

Подписано к печати 17.02.2000г.

Формат 50×90 1/16

Уч.- изд. л. 6, 7

Усл.печ. л. 6, 7

Тираж 50 экз.

Заказ № 403

Лицензия на издательскую деятельность ЛП №000150 от 15.04.99

ВИТР, 199106, Санкт-Петербург, ул. Веселая, 6

Ротапринт ВИТР