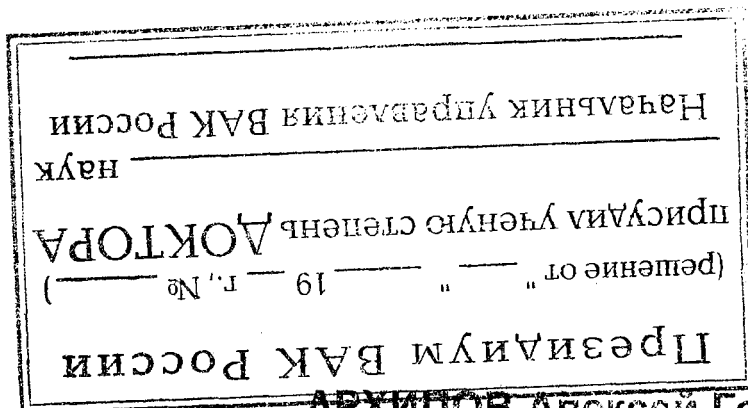


1:02-5/543-9

Всероссийский научно-исследовательский институт методики
и техники разведки /ВИТР/



На правах рукописи

АРХИПОВ Алексей Германович

АКУСТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАБОЙНЫХ ПРОЦЕССОВ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

*Специальность 25.00.14 - Технология и техника
геологоразведочных работ*

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург

2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава I. Формирование представлений о разрушении горных пород при алмазном бурении	10
§1. Краткий исторический очерк об алмазном бурении	10
§2. Экспериментальные методы исследования забойных процессов	11
§3. Исследования физических явлений в процессе бурения	18
Выводы по главе I	26
Глава II. Забойные процессы алмазного бурения и природа акустического шума разрушения горной породы	27
§1. Забойные процессы алмазного бурения	27
§2. Природа и амплитудно-частотные характеристики акустического шума разрушения горной породы	30
§3 Влияние акустических колебаний и тепла на разрушение горной породы и износ алмазного инструмента	43
Глава III. Акустико-спектральная диагностика забойных процессов	51
§ 1. Основы акустико-спектральной диагностики забойных процессов	51
§2. Технические средства и методика исследований	53
§3. Идентификация забойных процессов по частоте акустических колебаний	59
§ 4. Формирование списка диагностических параметров	63
Глава IV. Причины износа и прогноз ресурса алмазного инструмента при бурении	71
§ 1. Износ единичного алмаза с позиции теории усталости	71
§2. Виды износа алмазной коронки и диагностика их развития при бурении	73
§ 3. Прогноз ресурса и кривая износостойкости алмазной коронки	83
Выводы по главе IV	89
Глава V. Диагностика забойных процессов при решении практических задач бурения	91
§1. Диагностика вида движения алмазной коронки	91
§2. Механизм бурения, реализуемый алмазной коронкой	99
§3. Испытания алмазных коронок в стендовых условиях	109
§4. Исследование геологического разреза в процессе бурения	114

§5. Влияние и критерий оптимальности режима бурения	123
Выводы по главе V	129
Глава VI. Определение прочности и буримости горной породы.	131
§1. Акустико-спектральная диагностика буримости горной породы	131
§2. Технические средства и методика испытаний образцов горных пород.	134
§3. Обоснование выбора резания в качестве нагрузочного режима.	138
§4. Генетический тип, физико-механические свойства и параметры механизма разрушения горной породы	148
§5. Классификация горных пород по удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении	158
§6. Классификации горных пород по формациям для выбора параметров породоразрушающего инструмента для бурения	170
Основные выводы и рекомендации	178
Список литературы	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. 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.

Базисом для развития алмазного бурения является формирование объективных представлений о физике разрушения горных пород и износа алмазного инструмента. Изучению различных аспектов разрушения горных пород алмазным бурением посвятили работы многие отечественные и зарубежные исследователи, в числе которых: Ю.Д.Башкатов, Г.А.Блинов, Р.К.Богданов, Ю.Е.Будюков, Е.И.Быченков, В.И.Васильев, В.И.Власюк, В.Г.Гореликов, Л.К.Горшков, О.В.Иванов, М.И.Исаев, В.А.Каулин, Н.И.Корнилов, Б.Б.Кудряшов, Н.Ф.Кагарманов, П.Н.Курочкин, А.В.Марамзин, Н.Н.Михеев, Ю.А.Оношко, В.П.Онищин, О.В.Ошкордин, А.В.Сахаров, В.И.Спирин, Н.В.Соловьев, С.С.Сулакшин, Н.В.Цыпин, В.Г.Кардыш, Е.А.Козловский, С.И.Тараканов, Ф.А.Шамшев, K.Sasaki, F.C.Appl, D.S.Powley и N.B.Moore и др.

Однако 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 механизма разрушения горной породы. Можно констатировать, что традиционные каналы получения информации о забойных процессах практически исчерпали свои возможности. Вследствие этого:

- Испытания новых типов и серийно - выпускаемых коронок проводятся, в основном, в производственных условиях, что сопряжено со значительными временными и материальными затратами. При этом информативность испытаний недостаточна для принятия объективных решений по совершенствованию конструкции коронок.

- Не сложилось четкого подхода к выбору конструктивных параметров алмазного инструмента. Существуют лишь весьма общие рекомендации, основанные на практическом опыте его отработки. Процесс конструирования приравнивается к

“искусству”, во многом зависящим от опыта конструктора, что зачастую приводит к неправильным решениям и значительным экономическим потерям.

- Отсутствует возможность оперативной и точной дифференциации геологического разреза в процессе бурения, что не позволяет адекватно регулировать режим бурения и сдерживает расширение объемов бескернового бурения.

- Известные методы испытаний образцов горных пород, в числе которых метод ЦНИГРИ (ОСТ 41-89-74), не позволяют объективно оценивать буримость горных пород. Определенные с их помощью показатели слабо коррелируют с показателями бурения. Вследствие этого, затруднено планирование буровых работ и выбор инструмента для бурения.

Выход из создавшегося положения возможен только при более глубоком проникновении в физические аспекты разрушения горной породы, используя нетрадиционные каналы информации.

С начала шестидесятых годов двадцатого века во Всероссийском НИИ методики и техники разведки (ВИТР) начались исследования процесса бурения с использованием параметров физических явлений, возникающих при разрушении горной породы. Основу нового направления заложили работы П.Н.Курочкина, М.И.Исаева, В.И.Белякова и Б.Б. Шатрова по исследованию параметров теплового, акустического, электромагнитного и электрического полей. Наиболее перспективным каналом получения информации о механизме разрушения горных пород явились акустико-спектральные измерения в призабойной зоне бурящейся скважины, что вызвано органической связью акустических колебаний с забойными процессами.

В основу диссертации положены результаты научно исследовательских работ, проведенных автором в период с 1986 по 2000 год. Основной объем исследований выполнен в рамках госбюджетных договоров ВИТР с Министерством геологии СССР и с Министерством природных ресурсов РФ на создание аппаратуры дифференциации геологического разреза в процессе бурения, модернизацию стендов для испытаний технических средств бурения, разработку прибора для определения буримости горных пород и классификации горных пород для выбора породоразрушающего инструмента.

Основная идея работы состояла в системном подходе к разрушению горных пород при алмазном бурении и использовании для диагностики забойных процессов акустических спектров, регистрируемых в призабойной зоне бурящейся скважины.

Цель работы заключалась в создании объективных научных представлений о физике процессов, протекающих на забое, для решения практических задач бурения.

Указанная цель реализована посредством постановки и решения следующих задач:

1. Определение наиболее информативных параметров для контроля процессов разрушения горной породы и износа алмазного инструмента.
2. Установление зависимостей информативных параметров от типа, состояния и ресурса алмазного инструмента, физико-механических свойств разбуриваемых горных пород, режима бурения, гранулометрического состава шлама, механической скорости и энергетических показателей бурения.
3. Разработка методов и технических средств использования полученной диагностической информации в бурении.

Объектом исследования являлся процесс разрушения горных пород вращающимся алмазным буровым инструментом.

Методическую основу исследований составил системный подход при котором процессы взаимодействия алмазного инструмента с забоем, износа алмазного инструмента и разрушения горной породы рассматриваются как взаимосвязанная система.

Поставленные задачи решались путем научного анализа и обобщения работ в области исследования разрушения горных пород алмазным бурением; аналитических исследований, экспериментальных производственных и стендовых исследований с использованием акустических и тепловых измерений, лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород.

Существенным отличием исследований явилось помещение специализированного акустического датчика в призабойную зону бурящейся скважины, применение спектрального анализа в диапазоне частот 0 - 20 кГц и выше, а также совместное использование акустических и тепловых измерений. Тепловые измерения осуществлялись методом плавких вставок в торец коронки. Обработка экспериментальных данных проводилась на ЭВМ с использованием методов математической статистики.

Основные защищаемые положения.

1. Акустико-спектральная диагностика забойных процессов алмазного бурения является самостоятельным направлением в области техники и технологии бурения скважин, базирующимся на использовании параметров акустических спек-

тров, регистрируемых в призабойной зоне бурящейся скважины. В качестве необходимых информативных (диагностических) параметров должны использоваться акустический спектр в диапазоне 7-20 кГц, характеризующий “акустический шум разрушения” горной породы, и коэффициент распределения энергии при разрушении, представляющий отношение акустической мощности в диапазоне 7 - 20 кГц к реализуемой мощности.

2. Виды и интенсивность износа алмазного инструмента при бурении определяются уровнем и соотношением динамических и тепловых нагрузок, воспринимаемых матричной композицией, и могут прогнозироваться по параметрам акустического спектра и коэффициенту распределения энергии при разрушении. Зависимость между ресурсом H алмазной коронки и среднеквадратичным значением звукового давления p в призабойной зоне в диапазоне частот 7-20 кГц при условии нормальной циркуляции промывочной жидкости представляет экспоненциальную функцию вида $p = a \cdot e^{-\alpha H_k}$.

3. Акустический спектр и коэффициент распределения энергии при разрушении определяются типом породоразрушающего инструмента, свойствами горных пород и режимом бурения и могут использоваться для диагностики вида движения коронки, дифференциации геологического разреза и контроля качества изготовления алмазной коронки.

4. Удельная акустическая энергия W_{av} , выделившаяся в диапазоне частот 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы вращающимся алмазным инструментом представляет качественно новое свойство горной породы - “прочность на воздействие вращающимся инструментом” и может использоваться для определения категорий буримости горной породы.

Достоверность научных положений выводов и рекомендаций базируется на большом объеме производственных и лабораторных исследований, их современной методике, положительных результатах внедрения разработанных методов и технических средств. Акустические исследования разрушения горных пород бурением проведены на месторождениях и объектах Карело-Кольского региона (Енское, Риколатва, Неблогора, Лопатова губа, Малиновая Варакка, Коашва, Кальок и Олений Ручей), Донбасса (шахта Центральная-Новая) и Санкт-Петербурга (участок Парнас). Общий объем бурения с проведением измерений в призабойной зоне превышает 7000 м. Лабораторные исследования охватывают более 2 тысяч образцов различных горных пород.

Личный вклад автора заключается в определении стратегии исследований; постановке задач исследований и разработке методов их решения; методическом руководстве и личном участии в полевых, лабораторных и аналитических исследованиях; определении наиболее информативных параметров механизма разрушения горной породы; разработке методов ускоренных испытаний алмазного инструмента и определения прочности и буримости горной породы.

Научная новизна работы заключается в создании основ нового самостоятельного научного направления – акустико-спектральной диагностики забойных процессов алмазного бурения.

Впервые установлена возможность использования акустического спектра, измеренного в призабойной зоне бурящейся скважины, и коэффициента распределения энергии при разрушении для оценки качества алмазного инструмента, дифференциации геологического разреза, диагностики вида движения коронки, определения качественно нового свойства горной породы “прочности на воздействие вращающимся инструментом”, а также буримости горных пород.

Разработанные методы защищены двумя патентами РФ.

Практическое значение работы состоит в создании принципиально новых технологии дифференциации геологического разреза в процессе бурения, ускоренных испытаний алмазного инструмента, определения прочности и буримости горных пород.

Реализация результатов работы. Разработаны и внедрены информационно - аналитическая система АИАС-1 и методика МИ 41-13-31-01-94 “Инструмент алмазный породоразрушающий. Экспериментальная методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля”; аппаратура исследования геологического разреза в процессе бурения СИГР-2, установка УОБ-1 и методика определения буримости горных пород, классификация горных пород по формациям для выбора породоразрушающего инструмента.

Указанные технические средства и методы используются в ВИТРе при создании и испытаниях новых типов алмазного инструмента, определении буримости горных пород по кернам, получаемым от производственно - геологических предприятий, в числе которых ГМК “Печенганикель” и ООО “Щитстрой”.

Основные результаты исследований и отдельные положения работы докладывались и обсуждались на: 2, 3 и 4 Международных симпозиумах по бурению скважин в осложненных условиях (1992, 1994, 1998 г.г.), научно-технических конференциях “Диагностика, Информатика. Метрология - 95” и “Диагностика, Инфор-

матика. Метрология. Экология. Безопасность. - 96", V Международном горно-геологическом форуме "Минерально-сырьевые ресурсы стран СНГ" (1997), VI горно-геологическом форуме "Природные ресурсы стран СНГ" (1998) и VII международной конференции "Природные ресурсы стран СНГ" (1999). Серии работ по использованию акустико-спектральных измерений для решения практических задач бурения неоднократно занимали призовые места в конкурсах внеплановых работ НТО "Горное" (1989 - 2 место, 1990 - 1 место, 1991 - 3 место).

Публикации. По теме диссертации в отечественных и зарубежных источниках опубликована 51 работа, в том числе одна монография.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов и рекомендаций; содержит 193 страниц машинописного текста, 36 таблиц, иллюстрирована 37 рисунками. Список литературы включает 179 наименований.

Автор выражает глубокую признательность директору ВИТР И.С.Афанасьеву и зам.директора Н.Н.Михееву за поддержку и внимание к работе, а также сотрудникам ВИТР: Г.А.Блинову, И.М.Гинзбургу, Н.И.Корнилову, Д.Н.Плавскому, П.Н.Курочкину, В.И.Васильеву и О.С.Головину за помощь в работе.

Глава 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ

§1. Краткий исторический очерк об алмазном бурении

Алмазное бурение - вид вращательного способа бурения, при котором разрушение горной породы осуществляется инструментом, армированным алмазами [88]. Наибольший объем алмазного бурения приходится на колонковое бурение, позволяющее получать образцы (керны) горных пород. При колонковом бурении применяется алмазная коронка - породоразрушающий инструмент в виде цилиндрического кольца незначительной толщины. Конструкция коронки состоит из алмазосодержащей матрицы и стального корпуса, снабженного резьбой для присоединения коронки к буровому снаряду. Алмазы в коронке выполняют функции породоразрушающих резцов и при бурении воспринимают основные динамические нагрузки, ускоряют отвод тепла от забоя и защищают матрицу от чрезмерного износа.

Использование алмаза в бурении обусловлено его уникальными физико-механическими свойствами [57]. Алмаз является самым твердым известным веществом в природе. Относительная твердость алмаза по шкале Мооса - 10; твердость по Роквеллу – $14 \cdot 10^4$ HRC; абсолютная микротвердость, измеренная на грани (111), - 0,1 ТПа. Алмаз имеет самый большой модуль Юнга – 0,9 ТПа и высокую теплопроводность – 140 Вт/(м·К). Модуль Юнга и теплопроводность алмаза превышают аналогичные показатели твердого сплава, соответственно, в 1,5 - 3 и 2 - 5 раз. Уникальные свойства позволяют алмазу в течение длительного времени воспринимать значительные знакопеременные динамические и тепловые нагрузки, производя разрушение забоя. Ресурс алмазного инструмента в сравнимых геологических условиях значительно превышает ресурс твердосплавного инструмента, что и определяет ведущие позиции алмазного бурения при проходке скважин в наиболее прочных горных породах.

Современное алмазное бурение развилось из опытов швейцарского инженера Ж. Лешо (R.Leschot), предложившего зачеканивать алмазы в кольцевую коронку. Первые скважины с применением алмазного инструмента были пробурены в 1862 г. при проходке туннеля в горе Сени между Италией и Францией [77]. После 1880 г. алмазное бурение стало широко применяться при разведке месторождений полезных ископаемых.

Применение алмазного бурения в России началось в конце 19 века на Урале. Существенный вклад в развитие алмазного бурения внес С.Г.Войслав, который сконструировал для алмазного бурения оригинальные станки и предложил использовать мелкоалмазную коронку [53].

В СССР бурное развитие алмазного бурения началось с конца пятидесятих годов двадцатого столетия в связи с освоением алмазных месторождений Якутии. В 1955 г. был организован Всесоюзный институт методики и техники разведки (ВИТР). Одним из главных направлений научной деятельности ВИТРа стало развитие технологии и техники алмазного бурения. В 1959 г. в ВИТРе создана лаборатория алмазного бурения, которую возглавил Ф. А. Шамшев. К началу семидесятых годов алмазное бурение в СССР оформилось в самостоятельное научно-техническое направление в области разведки месторождений полезных ископаемых.

§2. Экспериментальные методы исследования забойных процессов

Широкое распространение и перспективы алмазного бурения предопределили постоянное внимание к исследованиям физической природы разрушения горных пород с целью получения данных для совершенствования технических средств и технологии бурения. Исследования алмазного бурения интенсивно проводились в СССР и продолжаются в научно-исследовательских организациях СНГ (ВИТРе, ИСМе, ВНИИАлмазе, ВИМСе, ЦНИГРИ, СКБ "Геотехника" и др.), а также в высших учебных заведениях России (Санкт-Петербургском ГГИ, Томском ПИ, Екатеринбургской ГГА и др.) и некоторых производственно-геологических организациях. За рубежом исследования сконцентрированы, в основном, в фирмах-производителях алмазного инструмента, в числе которых Diamont Boart, Crealius, Christensen и др.

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. Учитывая огромное количество исследований в области алмазного бурения, рассмотрим только те из них, на основе которых, по мнению автора, происходила эволюция представлений о физике процессов, протекающих на забое.

С начала шестидесятих годов двадцатого века стало развиваться *направление исследований забойных процессов с использованием забойных измерительных систем*. Наиболее широко забойные системы применялись при бурении скважин на нефть и газ [4, 108]. Отечественными и зарубежными фирмами была разработана гамма телеизмерительных систем различного вида и назначения, параметры которых детально рассмотрены в монографии А.А.Молчанова [108].

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 г.г. 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 г.г. 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 [67]. 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 [67]. 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 единичным алмазом на основе тензометрирования усилий и скоростной киносъемки проведен в ВИТРе в период 1970 - 80 г.г. [113]. В исследованиях принимали участие: П.Н.Курочкин,

О.В.Иванов, Г.А.Блинов, М.И.Исаев и др.. Исследования проводили на специальных стендах “единичный резец” с свободной или жесткой подачей алмаза размером 10 шт/кар. В состав измерительной системы станков входили тензодатчики и тензоусилители 8АНЧ-7М-6 (частотный диапазон 0 - 500 Гц) и “Топаз-10” (частотный диапазон 0 - 8000 Гц). Также применялся оригинальный тензоусилитель с частотным диапазоном до 100 кГц. Размеры борозды (ширина и глубина) измеряли с помощью микроскопа МИС-11 или МИМ -7. 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 П.Н.Курочкиным, О.В.Ивановым, Г.А.Блиновым и др. сделан вывод, что каждый алмаз в коронке можно рассматривать как резец, движущийся с определенной скоростью [113]. Взаимодействие алмаза с горной породой носит импульсный характер, а разрушение горной породы происходит скачкообразно. Отмечено, что перед алмазом перемещается упругая волна сжатия, 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 30 до 150 Н. Частота взаимодействия алмаза с горной породой составляет 300 – 700 Гц и выше. При пересечении алмазом трещины или более твердого включения усилие на алмазе возрастает в 1,5-2 раз и именно резким возрастанием усилия определяется возможный скол алмаза. С увеличением скорости движения алмаза число микроударов по забою на единицу пути уменьшается. 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. Сопоставление осциллограмм и размеров борозды позволило П.Н.Курочкину, О.В.Иванову, Г. А.Блинову и др. установить, что существует оптимальное соотношение между расстоянием между алмазами и глубиной внедрения алмазов, обеспечивающее максимальный объем разрушенной породы [113].

Важнейшим результатом исследований П.Н.Курочкина, О.В.Иванова, Г.А.Блинова и др. можно считать установление импульсного характера нагружения алмаза при разрушении горной породы. В то же время полученные данные не могут быть в полной мере приложены к алмазам, находящимся в рабочем слое ко-

ронки, так как взаимодействие алмазов с забоем при бурении является интегральной функцией работы коронки. Следует ожидать значительного расширения диапазона изменения амплитуды и частоты нагружения алмазов при бурении в зависимости от их размеров, свойств горных пород и применяемых режимов бурения.

Необходимо отметить, что идентичные выводы о “скачкообразности” процесса разрушения горных пород единичным алмазом сделаны А. Ф. Кичигиным, С.Н.Игнатовым, Ю.И.Климовым и В.Д.Яремой в результате исследований резания горных пород с фотографированием через микроскоп отдельных этапов взаимодействия алмаза с горной породой и киносъемкой движения алмаза [81].

Традиционным направлением исследованием можно считать *изучение гранулометрического состава шлама*, образующегося при бурении. Большинство исследований проведены в лабораторных условиях, с использованием ситового метода определения гранулометрического состава шлама [39, 42, 84, 89, 105, 141, 144, 149].

Г.М.Толкачев в 1964 г. опубликовал данные, что при бурении мелкоалмазными коронками 95% шлама имеет размер частиц менее 250 мкм [144].

С.И.Кувыкин, Э.К.Латынов, Н.Ф.Кагарманов и П.С.Баландин показали, что при турбинном и роторном бурении долотами частицы шлама размером менее 250 мкм составляют, соответственно, 30 и 80% [89].

И.П.Мельничук и В.А.Сегаль [105] приводят зарубежные данные по исследованию гранулометрического состава шлама при бурении алмазными долотами. При бурении долотами, армированными алмазами размером 2 мм, частицы шлама размером менее 50 мкм составляют 54 - 85 % пробы. Отмечено, что промывочной жидкостью выносятся также крупные кусочки горной породы, размер которых превышает размер частиц шлама на 1 - 2 порядка.

В.Е.Копылов при бурении коронками с выступом алмазов до 0,25 мм получил следующее распределение пробы шлама по размеру частиц: менее 250 мкм – 71,6 %; 250 - 500 мкм – 5,1 %; 500 - 1000 мкм – 6,5 %; 1000 - 2000 мкм – 6,6 %; 2000 - 3000 мкм – 4,2%; 3000 - 5000 мкм - 3,1 %; 5000 мкм – 2,9 % [84]. Число частиц шлама, превышающих выступ алмаза в 5 - 20 раз, составляет по объему пробы 30 – 50 %.

А.А.Бугаев при бурении импрегнированными коронками получил шлам с размером частиц 1 - 40 мкм [42].

По данным Г.И.Сукманова и Г.С.Геворкова частицы размером менее 50 мкм составляют 40 - 75% пробы шлама [141].

Р.К.Богданов, В.В.Иванов, Н.В.Цыпин и Е.П.Поладко при бурении коронками, армированными алмазными порошками размером 315/250 мкм, получили шлам с размер частиц менее 40 мкм [39].

Н.В.Цыпин [149] отмечает, что при бурении блока коростышевского гранита алмазной коронкой диаметром 36 мм с алмазами зернистостью 30 - 20 шт/кар и высотой выступа алмазов над телом матрицы 0,4 мм основная масса шлама представляет собой частицы размером 40 - 80 мкм. Гранулометрического состав шлама по данным Н.В.Цыпина зависит от сочетания режимных параметров.

Как следует из всех выше приведенных данных, при алмазном бурении образуются, в основном, частицы шлама размером 0 - 250 мкм. Это позволяет оценить масштабность разрушения, которая оказывается значительно меньше, чем при шарошечном и твердосплавном бурении. По опубликованным данным прослеживается тенденция увеличения в шламе содержания частиц больших размеров с увеличением размера и выступа алмазов. Однако объемы исследований гранулометрического состава шлама при бурении недостаточны для получения каких-либо зависимостей размеров частиц шлама от свойств горной породы, режима бурения и типа алмазного инструмента.

Е.Р. Pfeider и R.L.Blake, *исследуя забой скважины* при бурении таконита, установили неодинаковый характер разрушения различных минералов [171]. 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. Исследования Е.Р.Рфлейдер и R.L.Blake позволяют сделать вывод о неодинаковом характере взаимодействия алмазов с участками забоя, сложенными различными минералами.

Исследование формирования при алмазном бурении зоны предварительного разрушения (зоны трещиноватости) горной породы, примыкающей к забою, начались в ИСМе с появлением метода люминисцентной дефектоскопии и продолжались в течение 1970 - 80 г.г. [137, 26, 52]. В исследованиях принимали участие: Э.М.Винник, И.А.Свешников, В.Ф.Фадеев, Г.В.Арцимович и др.. На стенде импрегнированными алмазными коронками диаметром 59 мм бурили коростышевский гранит, головинское габбро и шокшинский кварцит. При бурении фиксировали час-

тоту вращения, осевую нагрузку, расход промывочной жидкости и механическую скорость бурения. Для изучения поверхности забоя использовали микроскоп МБС-2. Призабойную зону разрезали на уровне забоя скважины и пропитывали люминисцентной жидкостью (люминофором ЛЖ-6). Источником ультрафиолетового излучения служило люминисцентное устройство ОИ-17, состоящее из ультрафиолетового осветителя ОИ-18 с ртутной лампой СВД-120А и набора светофильтров. Негатив зоны предразрушения, полученный в ультрафиолете, обрабатывали на микрофотометре МФ-2. Количественную оценку яркости свечения проводили по линиям, параллельным забою в отдельных точках.

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 [27]. 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 слюд. При разрушении зерен кварца, возникают выколы угловатых очертаний, которые становятся устьями трещин. Размеры трещин измеряются десятymi и сотыми долями миллиметра, а с ростом осевой нагрузки они увеличиваются и обрываются на подстилающих зернах. Размер и частота образования микровыколов в кварце в 2 - 7 раз меньше, чем в полевом шпате. Слюды разрушаются вследствие вырыва микрочешуи и образования борозд под зернами алмазов. В пироксене, несмотря на наличие двух систем совершенной спайности, только при осевом усилии 10 кН появляются микровыколы, а при усилии 15 кН возникает типичная зона предразрушения с образованием трещин до глубины 0,9 - 1,0 мм. 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. По опубликованным данным [26, 27, 52] можно сделать вывод, что механизм формирования зоны предразрушения зависит от свойств горной породы и режима бурения. К сожалению, исследователи не приводят данные о зависимости зоны предразрушения от типа алмазного инструмента.

Исследования процесса разрушения *методом скоростной киносъемки при бурении кварцевого (оптического) стекла* проводили ВИТР и МГРИ в период 1978- 1980 г.г. [47, 118, 54, 32]. 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. в ВИТРе были направлены на изучение процесса кернообразования [47], а исследования МГРИ [104, 54, 32] 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 [118]. 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 коронки, а 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 15А3 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

Интерес представляют попытки В.И.Васильева, Г.А.Блинова, М.Г.Глазова и др. (ВИТР) определить число алмазов, контактирующих с горной породой, *используя метод отпечатков и профилирования поверхности коронки* [37]. В качестве

имитатора горной породы использовали пластину из органического стекла. Методика эксперимента заключалась в следующем. На пластину устанавливали однослойную алмазную коронку 01АЗД40 и прикладывали к ней статическую нагрузку в 5 и 20 даН. Затем, не снимая нагрузки, коронку поворачивали на 0,5 - 1,0 мм. Полученные на оргстекле отпечатки алмазов заполняли тушью и производили их подсчет. Исследования показали, что у неприработанной коронки число контактирующих алмазов при нагрузке 5 даН меньше, чем у приработанной коронки, а с увеличением нагрузки до 20 даН возрастает на 10 – 20 %. У приработанной коронки число контактирующих алмазов составляет до 80 % от общего числа и с ростом нагрузки изменяется незначительно. С помощью профилометра произведены измерения выступа торцевых алмазов у 30 коронок типа А4ДП-59 по 5 окружностям (линиям резания) с радиусами 28,2, 27,5, 25,2, 23, 8 и 21,9 мм установлено наличие разновысотного выступа алмазов из тела матрицы. Превышение алмазов над средним уровнем матрицы колебалось от 0,05 до 0,31. По мере отработки однослойной коронки зафиксировано уменьшение выступа алмазов. В.И.Васильев, Г.А.Блинов, М.Г.Глазов и др. считают, что в начальный момент число контактирующих алмазов с породой составляет не более 4 – 5 %; после вступления в работу выступающих алмазов других линий резания - увеличивается до 16 - 20% , а в конечный период отработки коронки достигает 80 - 85%. Следует отметить, что данные о числе алмазов, контактирующих с горной породой при бурении, полученные с помощью метода отпечатков и профилирования поверхности коронки нуждаются в экспериментальном подтверждении.

§3. Исследования физических явлений в процессе бурения

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. Зарождение подобных исследований в ВИТРе нельзя признать случайным и исторически опре-

делялось наличием в институте бурового, геофизического и приборного направлений.

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 двадцатого столетия [73, 75, 76, 92, 93]. Исследования проводили на буровых стендах. Температуру матрицы коронки измеряли методом термопар. Для исследования напряженного состояния коронок применяли метод тензометрирования с использованием тензометрической станции 8АНЧ. По сути, с помощью тензодатчиков, исследовались упругие колебания, по параметрам которых определялись напряжения в коронке.

Основной объем исследований был выполнен на стенде, созданном на базе вертикально-сверлильного станка 2Б-125 с электродвигателем мощностью 2.8 (5.5) кВт. Станок позволял осуществлять безступенчатую регулировку частоты вращения в диапазоне $165 - 2130 \text{ мин}^{-1}$, и осевой нагрузки - до 900 даН и был оснащен датчиками частоты вращения, механической скорости, проходки, отметок времени, осевой нагрузки и крутящего момента на забое. Для бурения использовали однослойные и импрегнированные алмазные коронки диаметром 24 мм. Бурили керны горной породы, которые устанавливали в специальном устройстве, оборудованном тензодатчиками для измерения осевого усилия и реактивного крутящего момента на забое скважины.

Второй стенд был выполнен на базе бурового станка СБА-500. Бурение осуществляли при различном сочетании режимных параметров. Частота вращения изменялась в пределах от 182 до 2200 мин^{-1} , осевая нагрузка - от 100 до 2000 даН, расход промывочной жидкости - от 0 до 20 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Для бурения применяли серийные коронки АКМ, 02А3, 07А3, АКШ, диаметром 46 и 59 мм, а также экспериментальные коронки диаметром 28 мм. Бурили, в основном, блоки серого гранита.

Для замера температуры и напряженного состояния коронки использовался специальный снаряд со струнной системой съема сигнала. При сборке снаряда внутри коронки устанавливали защитный стакан для предохранения термопар и тензодатчиков от воздействия керна. После установки термопар и тензодатчиков зазор между корпусом и защитным стаканом заливали гидроизоляционным компаундом. Кабель от датчиков прокладывали вдоль внутренней поверхности колонковой трубы до струнного токосъемника ТК-1, позволяющего осуществлять съем сигнала с вращающегося снаряда. Для измерения температуры матрицы коронки

использовали хромель-копелевые (диапазон измерения 0 – 600 °С) и хромель-алюмелевые (диапазон измерения 0 – 1100 °С) термопары, а также контакты константановой проволоки с матрицей. Термопары (до трех штук) устанавливали в коронку на различном расстоянии от ее торца. Тензодатчики наклеивались на корпус или матрицу коронки в продольном и поперечном направлениях. Для замера напряженного состояния забоя устройство крепления керна оборудовали тензодатчиками для измерения осевого усилия и реактивного крутящего момента. Тензодатчики соединяли с тензометрической станцией 8АНЧ. Показания датчиков фиксировали на осциллографе Н041. Для измерения температуры забоя константановая проволока укладывалась в паз, проделанный в горной породе на траектории движения коронки. Сигналы с термопар записывали на 12 точечном приборе ЭПП-093 с циклом измерения 2,5 с.

В результате исследований П.Н.Курочкиным, М.И.Исаевым, Л.С.Голодцом и др. получены данные о характере изменения температуры и напряженного состояния коронки при бурении, которые можно свести к следующему. Динамические напряжения в коронке при бурении больше статических напряжений в 4,5 раза. Цикличность деформации коронки при бурении совпадает с числом оборотов снаряда, при этом напряжения, действующие в поперечном направлении, значительно меньше, чем продольном. При увеличении частоты вращения снаряда от 182 до 578 мин⁻¹ (при постоянной осевой нагрузке) продольные напряжения в корпусе коронки уменьшаются в 2 раза. Тепловой баланс на забое скважины при частоте вращения снаряда 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. При расходе промывочной жидкости 5 - 10 дм³/мин температура торца коронки не превышает 150 °С. Высокие температуры наблюдаются только в тонком слое матрицы коронки, измеряемом сотыми долями миллиметра. На расстоянии 0,5 мм от торца коронки температура не превышает 80 °С. При прекращении подачи промывочной жидкости температура матрицы достигает 750 °С и более в течение 10 - 30 с. После подачи промывочной жидкости температура снижается до 80 - 100 °С в течение 20 - 30 с. При бурении пород высоких категорий по буримости температура матрицы может повышаться до точки плавления ее составляющих. На глубине 0,5 - 0,6 мм от поверхности забоя в горной породе устанавливается постоянная температура равная 26 - 30 °С (при температуре промывочной жидкости +5); на глубине 4 - 6 мм - температура уже равна температуре массива горной породы. В призабойной зоне

толщиной 0,5 мм при бурении наблюдается колебание температуры с частотой равной произведению числа оборотов снаряда на число секторов коронки. Отдельные участки матрицы коронки имеют температуру 300 - 400 °С, что объясняется несовершенством промывочной системы. Зависимости температуры от частоты вращения и осевой нагрузки в целом нелинейны. Наиболее интенсивно температура матрицы коронки увеличивается при росте нагрузки и, в меньшей степени, при увеличении частоты вращения. При уменьшении расхода промывочной жидкости с 15 до 8 дм³/мин температура матрицы повышается незначительно. Значительное повышение температуры происходит только при снижении количества жидкости до минимума, не обеспечивающего очистку забоя от шлама.

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. Следует отметить, что инерционность термопар позволяет с достаточной точностью определять температуры только медленно меняющихся процессов с частотой в доли герц.

Исследования электрических и упругих колебаний, возникающих при бурении, были проведены в ВИТРе в период 1971 - 75 г.г. под руководством В.И.Белякова [33, 34, 35]. 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 упругих колебания и передавать их по кабелю на поверхность. Для анализа электрического сигнала использовали амплитудно-временной и спектральный анализ. Для амплитудно-временного анализа применяли самописец Н320-5 и осциллограф Н115. Спектральный анализ проводили с помощью блока из шести параллельных частотных фильтров с полосами пропускания 0,2 - 60, 0,4 - 1,2, 1,5 - 7,0, 4,5 - 60 и 0,2 - 15,0 кГц и последовательного анализатора спектра типа АШ-2М с набором третьоктавных фильтров в диапазоне 0,04-10,5 кГц. Результаты анализа регистрировали с помощью самописца Н320-5.

Лабораторные исследования проводили на буровом стенде и стендах “еди-
 ничный резец” и “едиичный удар”. Буровой стенд был создан на базе сверлильно-
 го станка НС-12А. Бурили специальным снарядом коронками диаметром 24 мм.
 При бурении измеряли электрические и упругие сигналы с коронки и образца гор-
 ной породы, крутящий момент, механическую скорость бурения и проходку. Стенд
 “едиичный удар” состоял из станины, экранированного устройства (ванны) для
 крепления образца горной породы, вертикальной трубы с бойком и измерительной
 системы, включающей каналы измерения электрических и упругих колебаний. При
 экспериментах производили удары падающим бойком по различным точкам по-
 верхности образца горной породы и измерение параметров электрических и упру-
 гих сигналов. Для приема электрических колебаний использовали два латунных
 электрода. Электроды устанавливали на образец горной породы с помощью при-
 жимов. Для приема упругих колебаний использовали датчик с пьезокерамическим
 (титанат-бариевым) преобразователем. Сигналы регистрировали на двухлучевом
 осциллографе С1-18 с фотоприставкой. Запуск развертки осциллографа был син-
 хронизирован с моментом взаимодействия бойка с горной породой.

В результате исследований, проведенных под руководством В.И.Белякова,
 установлено, что при ударном воздействии в горной породе возникает переменное
 электрическое и упругое поля. Параметры электрического поля связаны с мине-
 ральным составом и свойствами горной породы в точке удара. Амплитуда электри-
 ческого 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 электрическо-
 го и упругого сигналов

Особенностью исследований В.И.Белякова можно считать широкое приме-
 нение аппаратуры спектрального анализа, что позволяло получать частотные па-
 раметры электрических и упругих колебаний. Однако следует отметить некоторую
 зауженность исследований в направлении использования параметров электриче-
 ских и упругих полей только для определения свойств горных пород в процессе бу-
 рения. К сожалению работы В.И.Белякова были внезапно прекращены в 1975 г. и
 завершились только обобщением результатов исследований [34].

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 [3, 115, 150, 151, 152, 153, 154, 155]. 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 с помощью анализаторов фирмы “Брюль и Кьер” и СК4-56. В результате исследований установлено, что в акустическом спектре существует область частот от 5 до 20 кГц, в пределах которой фиксируются максимумы амплитуды, так называемых, “характеристических” частот [154]. По изменению “характеристических” частот возможна дифференциация геологического разреза в процессе бурения. Исследования под руководством Б.Б.Шатрова завершились созданием аппаратуры для исследования геологического разреза в процессе бурения СИГР-2 [115]. Более детально состав и принцип работы аппаратуры СИГР-2 рассмотрены в главе 3.

Работы Б.Б.Шатрова, О.С.Андреева, Д.М.Стрыгина и др. стали отправной точкой для оформления акустико-спектральных исследований в призабойной зоне бурящейся скважины в самостоятельное научное направление в области техники и технологии бурения скважин. Однако они не позволили установить связь параметров акустических колебаний с техническими показателями бурения, конструктивными параметрами алмазной коронки, режимом бурения и физико-механическими свойствами горной породы.

Исследования физических явлений проводятся при бурении на нефть и газ, поэтому целесообразно кратко рассмотреть полученные результаты. Наиболее интенсивно при бурении на нефть и газ ведутся исследования акустических полей, что можно объяснить возможностью их регистрации на поверхности [61].

J.Lutz, M.Raynaud, S.Gstalter и др. разработали динамическую теорию бурения на базе представления долота как генератора продольных упругих волн в системе “горная порода - бурильная колонна - буровая вышка” [168]. Теория позволяет определить вибрационную характеристику возбуждения, сообщаемого долотом горной породе и бурильной колонне. Фирмой Societe Nationale des Petroles D'Aquitaine разработана аппаратура получения информации о разбуриваемой поро-

де, на основе параметров вибраций, регистрируемых в верхней части колонны бурильных труб [158]. Аппаратура успешно использовалась в течение нескольких лет при бурении скважин в осадочных толщах горных пород на юго-западе Франции (Аквитанская бухта).

В СССР получили развитие два основных направления: исследование динамических характеристик процесса турбинного бурения по параметрам колебательных процессов, возникающих в бурильной колонне, и исследование кинематических и динамических характеристики волнового поля по измерениям на поверхности Земли

Первое направление разрабатывалось в период 1965 - 1975 г.г. В.Е.Копыловым и И.Л.Гуреевым с целью контроля работы шарошечного долота на забое при турбинном бурении [61-66, 83-85]. Колебания регистрировались с помощью датчика, расположенного на поверхности ведущей трубы (квадрата). В.Е.Копыловым и И.Л.Гуреевым разработана частотная классификация колебаний, связанных с конкретными возмущающими силами и регистрируемых на ведущей трубе. Колебания инфранизких частот 0 - 5 Гц связаны с пульсациями давления промывочной жидкости, осадкой колонны бурильных труб при подаче инструмента и колебаниями талевого системы и буровой вышки под действием ветровой нагрузки. Низкочастотные колебания 5 - 50 Гц обусловлены движением шарошек по неровному забою. Колебания средних частот 100 - 500 Гц генерируются ударами зубьев долота о забой скважины. Высокочастотные колебания 500 - 5000 Гц связаны с кавитационными и турбулентными процессами в гидравлической системе скважины. Практическим результатом исследований В.Е.Копылова и И.Л.Гуреева явилось создание индикатора скорости вращения долота (ИВД) на основе анализа среднечастотных колебаний, регистрируемых на ведущей трубе [84]. ИВД измеряет скорость вращения шарошек, что позволяет использовать его для контроля работы долота на забое. Применение ИВД позволяет увеличить механическую скорость бурения вследствие улучшения загрузки турбобура [85]. Возможность приема на устье скважины упругих волн, возбуждаемых ударами зубьев долота о забой, установлена до глубины 4184 м.

Г.В.Рогоцкий разработал способ регулирования режима бурения по энергетическим характеристикам упругих волн, распространяющихся по колонне бурильных труб и измеряемых на поверхности Земли [125, 126]. Регулирование режима бурения основано на поддержание оптимальных значений режимных параметров по минимуму энергии упругих волн в бурильной колонне. Г.В.Рогоцкий отмечает,

что использование способа позволяет увеличить механическую скорость бурения и проходку за рейс за счет увеличения упругой энергии, передаваемой в горную породу.

Второе направление разрабатывается институтами ВНИИЯГГ и ВНИИБТ [6, 71, 90, 91, 98, 127-135]. Исследуются кинематические и динамические характеристики упругих волн, распространяющихся при бурении по колонне бурильных труб и в около скважинном пространстве в верхнем слое Земли. Для измерения упругих колебаний применялись сейсмоприемники и сеймостанции типа СС-24-61 М и "Поиск-48-МОВ". В результате исследований установлена возможность регистрации упругих колебаний, возбуждаемых буровым инструментом, с помощью наземной системы наблюдений, которая может использоваться для решения следующих задач.

1. Определение текущих координат долота в процессе бурения. Отмечено, что результаты определения пространственного положения ствола скважины путем акустических измерений в процессе бурения и инклинометрические замеры имеют удовлетворительную сходимость [90, 91, 98, 128].

2. Расчленение геологического разреза и оценка деформационно-прочностных характеристик разбуриваемых горных пород; определение расстояния от долота до первой литологической границы [71, 98, 129-132].

3. Оптимизация режима бурения [133-135]. Отмечается, что дифференцированное применение параметров режима бурения в соответствии с акустическими параметрами горных пород позволяет повысить механическую скорость бурения.

Характерные отличия акустических исследований при бурении на нефть и газ алмазном бурении на твердые полезные ископаемые заключаются в следующем.

1. При бурении на нефть и газ используется наземная система измерений. При алмазном бурении для регистрации колебаний, связанных с разрушением горной породы, приемник размещается в призабойной зоне.

2. Информативный частотный диапазон акустических сигналов, измеряемых при бурении на нефть и газ, занимает диапазон до 1 кГц. При алмазном бурении информативный частотный диапазон достигает 20 кГц.

Возможность регистрации колебаний на поверхности при бурении на нефть и газ объясняется значительно большей мощностью, реализуемой на забое, чем при алмазном бурении, а также относительно низким затуханием акустических колебаний в толще горных пород. Различия в информативном частотном диапазоне, по-

видимому, заложены в физике разрушения горной породы. Алмазное бурение применяется в наиболее прочных горных породах, разрушение которых сопровождается возникновением высокочастотных колебаний. При разрушении малопрочных осадочных горных пород нефтяного комплекса возникают низкочастотные колебания.

Выводы по главе I

На основе выполненного анализа литературных источников в области исследования забойных процессов сделаны следующие основные выводы.

Эволюция представлений о физике забойных процессов связана с развитием экспериментальных методов, в числе которых: измерение осевой нагрузки и крутящего момента с помощью забойных измерительных систем; тензометрирование усилий, воспринимаемых алмазами и коронкой; измерение термопарами температуры в коронке и горной породе; скоростная киносъемка забоя при бурении кварцевого стекла и движении единичного алмаза; люминисцентная дефектоскопия горной породы, примыкающей к забою.

Результаты исследований позволяют рассматривать алмаз как резец, движущийся с определенной скоростью и взаимодействующий с забоем с некоторой частотой. При бурении в горной породе, примыкающей к забою, формируется зона трещиноватости. Глубина развития и параметры возникающих трещин зависят от свойств минералов, режима бурения и конструктивных параметров алмазной коронки.

Разрушение горных пород при бурении сопровождается возникновением физических явлений: акустического, электрического, электромагнитного и теплового поля. Физические явления - важный источник информации о процессе разрушения горной породы, получение которой традиционными методами невозможно.

Глава 2. ЗАБОЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ И ПРИРОДА АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

§1. Забойные процессы алмазного бурения

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

Забойные процессы (механизм бурения) - 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.

В первом приближении механизм бурения реконструируется следующим образом (рис. II.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. Механическое взаимодействие коронки с забоем реализуется в виде многочисленных микросиловых процессов, протекающих в площади забоя, следствием которых являются упругие и пластические деформации горной породы и матрицы коронки и трение между горной породой и торцом коронки. 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. Суммарная сила трения между горной породой и торцом коронки определяется тремя составляющими: трением между горной породой и алмазом, трением между горной породой и матрицей, трением между частицами шлама и матрицей.

Наиболее значимыми, с точки зрения влияния на показатели бурения, являются следующие забойные процессы:

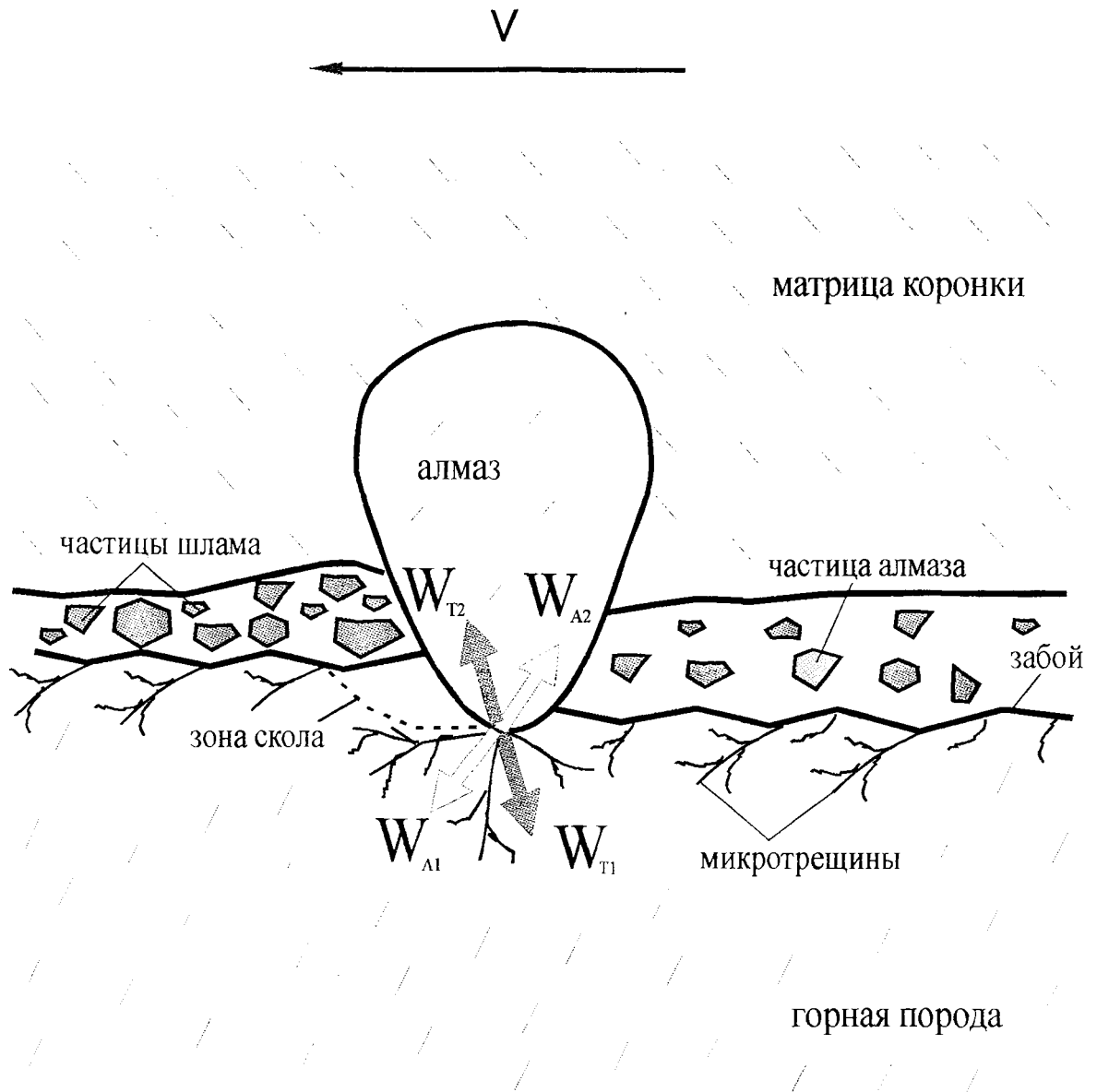


Рис. II.1. Схема взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с забоем

W_{A1} - акустическая энергия в горной породе; W_{T1} - тепловая энергия в горной породе; W_{A2} - акустическая энергия в инструменте; W_{T2} - тепловая энергия в инструменте.

1. Поражение алмазами с забоя и разрушение горной породы;
2. Вибрации коронки;
3. Трение между горной породой и торцем коронки.

К описанию механизма бурения можно подойти и с энергетической точки зрения.

Часть механической энергии, подводимой к забою, W_m^1 преобразуется в процессе взаимодействия коронки с забоем в физические явления (акустические, тепловые, электрические и электромагнитные колебания), которые начинают распространяться от забоя вглубь массива горных пород и инструмента.

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). Акустические волны являются следствием динамических забойных процессов. Выделяющееся на забое тепло, прежде всего, определяется трением между коронкой и горной породой.

Запишем баланс энергии на забое в виде уравнения:

$$W_m^1 = W_T + W_A + W_3 + W_{3m} \quad \text{Дж,} \quad (\text{II.1})$$

где W_m^1 - механическая энергия, преобразуемая на забое в физические явления, 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 (II.1) принимает вид:

$$W_m^1 = W_T + W_A \quad \text{Дж.} \quad (\text{II.2})$$

Механическая энергия на забое 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:

$$W_m^1 = W_1 + W_2 = W_{T1} + W_{A1} + W_{T2} + W_{A2} \quad , \quad (II.3)$$

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

§2. Природа и амплитудно-частотные характеристики акустического шума разрушения горной породы

В силу масштабности, а также кинетических и динамических особенностей процесс поражения забоя алмазами и разрушения горной породы при алмазном бурении будет сопровождаться возникновением акустического сигнала, спектральный состав которого резко отличается от параметров акустических сигналов от вибраций колонны и других скважинных источников. Назовем акустический сигнал, излучаемый при разрушении горной породы алмазами, "акустическим шумом разрушения горной породы" и рассмотрим причины его возникновения и амплитудно-частотные характеристики.

Природа акустического шума разрушения горной породы. Взаимодействие алмаза с забоем носит циклический характер и происходит с некоторой частотой. Длительность контакта алмаза с забоем составляет тысячные доли секунды и, вследствие, динамического характера, каждый акт взаимодействия будет сопровождаться излучением от забоя акустической волны. Это позволяет рассматривать алмаз в коронке как элементарный акустический излучатель – устройство для преобразования механической энергии в звуковую энергию и излучения ее в упругую среду. Площадка контакта алмаза с забоем в момент взаимодействия представляет источник колебаний, обращенный к среде и создающий в пограничном слое переменное давление. Относительно инструмента источники неподвижны, так как

алмазы жестко закреплены в матрице коронки. Относительно массива горной породы источник колебаний непрерывно перемещается по плоскости забоя с некоторой окружной скоростью. Воздействие алмаза на забой приводит к смещению и местному изменению объема частиц горной породы в области, примыкающей к площадке контакта. Возникшая деформация в силу действия закона неразрывности передается соседним частицам. Изменение объема частиц сопровождается изменением плотности и давления в горной породе. Смещение частиц происходит в определенных направлениях с образованием фронта волны, все частицы которого имеют синфазное смещение.

Забой скважины представляет акустический излучатель, состоящий из нескольких элементарных излучателей, которые периодически активизируются в плоскости забоя. Излучение акустических волн происходит одновременно в направлении массива горной породы и инструмента. В соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка излучающей поверхности сложной формы может рассматриваться как элементарный сферический излучатель, а общее поле является суперпозицией волн от этих источников.

Частотные характеристики акустического шума разрушения горной породы. Назовем условную окружность, по которой движется алмаз, линией резания. Число N единичных актов разрушения на пути равном длине линии резания L определяется размером l скалываемой частицы по траектории движения алмаза. Полагая, что размеры скалываемой частицы для пары коронка-порода при бурении на постоянном режиме группируются около некоторых средних значений, выразим N :

$$N = \frac{L}{l} \quad \text{актов.} \quad (II.4)$$

Рассмотрим теперь процесс взаимодействия алмаза с забоем во временной области. Размеры скалываемой частицы горной породы будут определять время t_{xx} движения алмаза без контакта с забоем. Назовем время t_{xx} временем холостого хода алмаза, а сумму времен взаимодействия t_b алмаза с забоем и холостого хода - временем цикла взаимодействия $t_{ц}$. Тогда, число актов разрушения горной породы будет равно отношению времени T прохождения алмазом пути L к времени цикла $t_{ц}$:

$$N = \frac{T}{t_{ц}} \quad \text{актов.} \quad (II.5)$$

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

$$f = \frac{N}{T} \quad \text{Гц} . \quad (\text{II.6})$$

Размерность частоты f - число актов в секунду или, принимая размерность системы СИ, герцы (Гц).

Окружная скорость $v_{\text{окр}}$ движения алмаза определяется частотой вращения снаряда n и радиусом окружности R на которой находится алмаз в коронке.

$$v_{\text{окр}} = \omega \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n \quad \text{м/с}, \quad (\text{II.7})$$

где ω - угловая скорость коронки, рад/с; n - частота вращения коронки, с⁻¹.

Подставляя (II.1) в (II.3) получаем формулу для частоты f в виде:

$$f = \frac{L}{T \cdot l} = \frac{v_{\text{окр}}}{l} \quad \text{Гц} . \quad (\text{II.8})$$

Во временной области акустический сигнал, излучаемый забоем, представляет последовательность импульсов. Частота акустического сигнала связана с частотой поражения алмазом забоя и зависит от размера скалываемой частицы горной породы и скорости движения алмаза. Расчет по формуле (II.8) показывает, частота поражения алмазом забоя при скорости движения 1 – 10 м/с и размере скалываемых частиц 100 – 1000 мкм изменяется в пределах от 1000 до 100000 Гц (табл. II 1).

Алмазная коронка в силу конструктивных особенностей и, прежде всего, размеров алмазов, при бурении будет реализовывать оригинальный механизм разрушения горной породы. В первом приближении частоту поражения алмазом забоя можно определить на основе анализа вооружения коронки и используемых частот вращения. Полагая, что каждый алмаз, расположенный на торце коронки, периодически взаимодействует с забоем, средняя частота акустического сигнала может быть выражена формулой.

$$f = N_a \cdot n \quad , \quad \text{Гц} \quad (\text{II.9})$$

где N_a – число алмазов в коронке, штук.

Расчетные частоты акустического сигнала при изменении числа алмазов на торце от 50 до 1200 штук и частоте вращения коронки от 10 до 30 с⁻¹ (от 600 до 1800 мин⁻¹) находятся в диапазоне 500 – 36000 Гц (табл. II.2). Следует отметить, что алмазы, расположенные на различных диаметрах коронки и перемещающиеся с различными скоростями, будут поражать забой с разными частотами и в спектре будут фиксироваться размытые максимумы.

Таблица II.1

Расчетные частоты поражения забоя алмазом и возникающего акустического сигнала при скорости движения 1 – 10 м/с и размере скалываемых частиц 100 – 1000 мкм

Размер скалываемой частицы, мкм	Число сколов на метр пути, штук	Частота поражения алмазом забоя и акустического сигнала, Гц при скорости движения алмаза, м/с				
		1	3	5	7	10
100	10000	10000	30000	50000	70000	100000
200	5000	5000	15000	25000	35000	50000
300	3333	3333	9999	16665	23331	33330
400	2500	2500	7500	12500	17500	25000
500	2000	2000	6000	10000	14000	20000
600	1667	1667	5001	8335	11669	16670
700	1429	1429	4287	7145	10003	14290
800	1250	1250	3750	6250	8750	12500
900	1111	1111	3333	5555	7777	11110
1000	1000	1000	3000	5000	7000	10000

Таблица II.2

Расчетные частоты поражения забоя алмазом и возникающего акустического сигнала при числе алмазов на торце коронки 50-1200 штук и частоте вращения коронки 10-30 с⁻¹

Число алмазов на торце коронки, штук	Частота акустического сигнала, Гц при частоте вращения коронки, с ⁻¹				
	10	15	20	25	30
50	500	750	1000	1250	1500
100	1000	1500	2000	2500	3000
200	2000	3000	4000	5000	6000
400	4000	6000	8000	10000	12000
800	8000	12000	16000	20000	24000
1200	12000	18000	24000	30000	36000

Частоту поражения забоя алмазами можно также рассчитать приняв размер скалываемой частицы горной породы равным среднему диаметру алмаза. Это можно сделать, так как размер частиц шлама при алмазном бурении сравним с размерами алмазов, используемых для армирования коронок. В результате формула для определения частоты взаимодействия единичного алмаза с забоем приобретает следующий вид

$$f = \frac{V_{\text{окр}}}{d_a} \cdot \text{Гц}, \quad (\text{II.10})$$

где d_a – диаметр алмаза, м.

Для наиболее употребимых в бурении размеров фракций алмазов расчетные частоты поражения забоя и спектры акустических сигналов находятся в диапазоне от сотен герц до десятков килогерц (табл. II.3).

Таблица II.3

Расчетные частоты поражения забоя алмазом и возникающего акустического сигнала при бурении коронками, армированными алмазами различной крупности

Число алмазов в 1 кар	Линейные размеры алмазов, мкм	Средний диаметр алмазов, мкм	Число сколов на метр пути, штук	Частота поражения алмазом забоя и акустического сигнала, Гц при скорости движения алмаза, м/с				
				1	3	5	7	10
8000 - 5500	250/200	230	4348	4348	13044	21740	30436	43480
4500 - 2000	400/315	360	2778	2778	8334	13890	19446	27780
2000 - 800	500/400	450	2222	2222	6666	11110	15554	22220
800 - 600	630/500	570	1754	1754	5262	8770	12278	17540
600 - 400	800/630	720	1389	1389	4167	6945	9723	13890
120 - 90	1000/800	900	1111	1111	3333	5555	7777	11110
90 - 60	1250/1000	1100	909	909	2727	4545	6363	9090
40 - 30	1600/1250	1430	639	639	1917	3195	4473	6390
20 - 30	2000/1600	1800	556	556	1668	2780	3892	5560

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. 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 (II.10) 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).

Сравнивая данные в табл. 1-3 и можно отметить, что варианты расчета частоты поражения алмазами забоя по формулам (II.9) и (II.10) в целом дают близкие значения, измеряемые в тысячи герц.

В реальных условиях частота возникающего при бурении акустического сигнала будет определяться не только размерами и скоростью движения алмазов, но и осевой нагрузкой, свойствами горной породы, а также рядом трудноконтролируемых факторов. Учитывая различия в прочности сцепления минеральных зерен в горной породе можно прогнозировать изменение частоты поражения алмазами забоя при смене геологического разреза. При разбуривании гигантскозернистых пород с размерами минеральных зерен, превышающими размеры алмазов, с отдельных участков забоя будут излучаться разночастотные сигналы, а в акустическом спектре присутствовать несколько максимумов.

Для расчета частоты f для конкретных условий бурения необходимо знать размер скалываемой частицы горной породы по траектории движения алмаза. Однако прогноз f в настоящее время затруднен вследствие недостаточной изученности процесса разрушения горной породы при бурении. Очевидно, что размер скалываемой частицы горной породы зависит от размеров алмаза, скорости его движения, величины и направления передачи энергии в горную породу и свойств разбуриваемой горной породы. Поэтому основным путем исследования частоты поражения алмазом забоя является экспериментальное измерение акустического шума разрушения в призабойной зоне.

Амплитудные характеристики акустического шума разрушения. Рассматривая контактную площадку как излучатель акустических волн и, базируясь на законах общей акустики, считаем, что интенсивность генерируемого акустического сигнала связана с давлением алмаза на горную породу и сопротивлением горной породы механическому воздействию.

Влияние свойств горной породы на излучаемую акустическую мощность опишем с помощью локального импеданса, представляющего отношение давления алмаза на забой к составляющей скорости, нормальной к площадке контакта.

$$Z = - \frac{P_k}{\xi'} \quad \text{Па} \cdot \text{с/м}, \quad (\text{II.11})$$

где P_k - давление алмаза на забой, Па; ξ' - колебательная скорость частиц, м/с.

Положительное значение ξ' соответствует нормали, направленной во внешнюю по отношению площадке сторону. Знак “–” появляется в связи с тем, что деформация сжатия должна приводить к появлению колебательной скорости, направленной внутрь массива горной породы. Локальный импеданс определяет величину акустической мощности, поступающей в горную породу. Акустическая мощность будет тем меньше, чем больше импеданс горной породы. Частные случаи $Z = 0$ и $Z = \infty$ соответствуют акустически мягкой и акустически жесткой горной породе.

Энергия и давление в точке контакта имеют двоякую природу: они связаны с тепловым движением и взаимодействием частиц. Поэтому в акустические волны переходит только часть энергии, которая не затрачивается на пластические деформации и тепловое движение молекул (трение). К сожалению, в настоящее время не существует теории, позволяющей обосновать количество механической энергии, переходящей в акустическую энергию. Отсюда возникают трудности в расчете Z разрушаемой горной породы. Поэтому для оценки импеданса излучения горных пород воспользуемся известными в акустике величинами и зависимостями.

Как было указано выше алмаз можно рассматривать как элементарный сферический излучатель. В случае сферической волны акустическое сопротивление имеет комплексной характер.

$$Z_s = \rho \cdot c \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2} + j \cdot \varpi \cdot \frac{\rho \cdot r}{1 + \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^2}, \quad (\text{II.12})$$

где λ - длина волны, м; r - расстояние фронта волны от площадки контакта алмаза с забоем, м; ϖ - круговая частота ($\varpi = 2\pi f$; f - частота колебаний); ρ - плотность среды, кг/м³; c - скорость распространения продольных упругих волн, м/с.

Активная составляющая (первый член равенства) связана с потерями энергии на излучение звука. Реактивная составляющая (второй член равенства) - обусловлена реакцией сил упругости или инерцией некоторой массы среды (соколеблющейся массы). Возникновение реактивной составляющей связано с колебательным переносом некоторой массы среды между соседними поверхностями фронтов

волны с разными давлениями. При приближении к площадке контакта реактивность акустического сопротивления проявляется сильнее за счет уменьшения r/λ и увеличения λ/r . По мере удаления от забоя преобладает активная составляющая. За счет реактивной составляющей связь между звуковым давлением и колебательной скоростью имеет вид

$$\frac{p}{\xi'} = \frac{j \cdot \omega \cdot \rho \cdot r}{1 + j \cdot k \cdot r}, \quad (II.13)$$

где k – волновое число ($k = 2 \cdot \pi/\lambda = \omega/c$).

За счет реактивной составляющей появляется фазовый сдвиг между давлением и колебательной скоростью,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{k \cdot r} = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi r}, \quad (II.14)$$

Максимальный сдвиг фазы 90° существует при $r = 0$. По мере удаления от забоя скорость по фазе все меньше отстает от давления. На расстояниях $r \gg \lambda$ фазовым сдвигом между ξ' и p и реактивной составляющей акустического сопротивления можно пренебречь, а фронт волны может быть принят за плоский. В плоской волне давление и колебательная скорость частиц находятся в фазе и различаются только коэффициентом $\rho \cdot c$, называемым акустическим (волновым) сопротивлением.

$$\frac{p}{\xi'} = \rho \cdot c. \quad (II.15)$$

Акустическое сопротивление характеризует способность материала передавать колебательное движение и представляет произведение плотности на скорость распространения упругих волн.

Для инженерных расчетов примем сопротивление излучению акустической волны с контактной площадки с забоем чисто активным. Тогда, в первом приближении импеданс излучения можно принять равным акустическому сопротивлению горной породы.

Рассмотрим импеданс излучения при бурении горных пород. Большинство горных пород обладают зернистыми структурами с размерами минеральных зерен более 0,1 мм (мелко, средне и крупно зернистые горные породы) и площадью S_3 сечения минерального зерна более 7850 мкм². Площадь сечения минерального

зерна оказывается значительно больше площади S_k контакта алмаза с забоем, которая, как было показано выше находится в пределах $0,02 - 1,08 \text{ мкм}^2$. Очевидно, что при условии $S_k \ll S_3$ алмаз с высокой вероятностью будет контактировать с отдельными минеральными зернами, а параметры излучаемой волны будут связаны со свойствами минерала. По опубликованным значениям плотности и скорости упругих волн рассчитано акустическое сопротивление некоторых породообразующих минералов (табл. II.4). Из числа рассмотренных минералов минимальное акустическое сопротивление имеет каолинит, максимальное - корунд.

Таблица II.4

Плотность ρ , скорость продольных упругих волн c и акустическое сопротивление некоторых породообразующих минералов [68, 100]

Минералы	ρ $\times 10^3, \text{ кг/м}^3$	c $\times 10^3, \text{ м/с}$	$\rho \cdot c$ $\times 10^6, \text{ Па} \cdot \text{с/м}$
Каолинит	2,63	1,0	2,6
Галит	2,16	4,6	9,9
Гипс	2,32	5,2	12,1
Микроклин	2,56	5,7	14,6
Нефелин	2,60	5,9	15,3
Кварц	2,62	6,3	16,1
Лабрадор	2,70	6,5	17,6
Кальцит	2,73	6,7	18,3
Биотит	3,07	6,1	18,7
Роговая обманка	3,26	7,2	23,5
Пироксен	3,38	7,3	26,7
Оливин	3,32	8,5	28,2
Корунд	4,05	11,0	45,6

Из вышеизложенного следует, что при увеличении акустического сопротивления минералов и горной породы в целом при бурении будут наблюдаться увеличение мощности акустического шума разрушения.

Влияние контактного давления на излучаемую акустическую мощность, вытекает из формулы импеданса. Преобразуя формулу (II.11) получаем выражение для начальной колебательной скорости частиц горной породы

$$\xi' = \frac{P_k}{Z} \quad \text{м/с}, \quad (\text{II.16})$$

При условии неизменности свойств горной породы ($Z=\text{const}$) колебательная скорость частиц горной породы увеличивается с ростом контактного давления.

Уникальность процесса разрушения горной породы движущимся алмазом требует рассмотрения вопроса создания контактного давления. При этом оказывается сложно использовать богатый экспериментальный материал, полученный при внедрении в горную породу плоского штампа, так как исследования на установке УМГП-3 показали, что процессы разрушения горной породы под алмазом и штампом имеют резкие отличия [73]. При внедрении алмаза момент объемного разрушения горной породы на диаграмме нагрузка-деформация не фиксировался, отмечено постепенное внедрение алмаза в горную породу и “лавинное” появление вокруг него разрушенной породы. Это подтверждает микроуровень процессов разрушения горной породы алмазом и необходимость учета площади контакта его с горной породой.

Разрушение горной породы происходит перед движущимся алмазом. Величина внедрения алмаза в горную породу ограничивается выступом его из тела матрицы. Учитывая, что после обнажения алмаза более чем на $1/3$ диаметра возможен его скол, полагаем, что глубина внедрения алмаза в горную породу не будет превышать этой величины. Для упрощения расчетов давления алмаза на забой примем следующие допущения:

- форма алмаза является сферической;
- алмаз внедрен в горную породу на $1/5$ от диаметра;
- контакт алмаза с забоем происходит частью передней полусферы, ограниченной по высоте глубиной внедрения алмаза в горную породу.

Контактное давление определяется силой F и площадью S_k контакта алмаза с забоем.

$$P_k = \frac{F}{S_k} \quad \text{Па} . \quad (\text{II.17})$$

Исходя из сделанных допущений, выразим площадь площадки контакта алмаза с забоем:

$$S_k = 0,5 \cdot d_a \cdot \pi \cdot h = r \cdot \pi \cdot h \quad \text{м}^2, \quad (\text{II.18})$$

где d_a – диаметр алмаза (сферы), м; h – глубина внедрения алмаза в породу, м.; r – радиус алмаза, м.

Для алмазов размером 230 – 1800 мкм, внедренных в горную породу на 1/5 от диаметра, площадь площадки контакта составляет 0,02 – 1,08 мкм (табл. II.5).

В силу циклического характера взаимодействия алмаза с забоем, осевая нагрузка не будет равномерно распределяться на алмазы, расположенные на торце коронки. В момент времени осевая нагрузка, достаточная для разрушения горной породы, прикладывается на несколько алмазов, а остальные не взаимодействуют или находятся в упругом контакте с забоем. Однако в первом приближении силу F , прикладываемую на единичный алмаз, можно рассчитать как отношение осевой нагрузки P на число алмазов, находящихся торце коронки и выступающих из тела матрицы.

$$F = \frac{P}{N_a} \quad \text{Н.} \quad (\text{II.19})$$

Рекомендуемые удельные нагрузки на алмаз в однослойных коронках составляют 30 – 100 Н. Рассчитаем удельные нагрузки на алмаз в импрегнированных коронках. Для импрегнированных коронок возможное давление на забой составляет 3 – 18 МПа (300 – 1800 Н/см²). Прямым подсчетом алмазов на торце импрегнированных коронок диаметром 59 мм установлено, что максимальное число алмазов 140 шт/см² находится на торце коронки БС, армированной алмазами размером 250/200 мкм, и минимальное – 20 шт/см² у коронки 02ИЗ, армированной алмазами размером 800/700 мкм. Относя нагрузку к числу алмазов, получаем, что статическая нагрузка на алмаз в импрегнированной коронке изменяется от 1,3 до 90 Н. Как видно, удельные нагрузки на алмаз в импрегнированных и однослойных коронках имеют близкие значения. Конечно, рассчитанная таким образом удельная нагрузка на алмаз является условной величиной, предназначенной для облегчения выбора осевой нагрузки для бурения. Реальные нагрузки на алмаз при бурении могут изменяться в более широких пределах.

Подставляя (II.18) и (II.19) в (II.17) получаем формулу давления алмаза на забой

$$P_k = \frac{2 \cdot P}{N_A \cdot d_a \cdot \pi \cdot h} \quad \text{Па.} \quad (\text{II.20})$$

Результаты расчета по формуле (II.20) показывают, что давление алмаза на забой при удельных нагрузках 1 – 100 Н может достигать тысяч МПа (табл. II.5).

Таблица II.5

Расчетное давление алмаза на забой

Средний диаметр алмаза, $\times 10^{-6}$, м	Площадь поверхности алмаза, $\times 10^{-6}$, м ²	Глубина внедрения алмаза $\times 10^{-6}$, м	Площадь площадки контакта, $\times 10^{-6}$, м ²	Давление алмаза на забой, МПа при усилии на алмаз, Н				
				1	5	10	50	100
230	0,17	46	0,02	60	301	602	3010	6020
360	0,41	72	0,04	25	123	246	1230	2457
450	0,64	90	0,06	16	79	157	790	1573
570	1,02	114	0,10	10	49	98	490	980
720	1,63	144	0,16	6	31	61	310	614
900	2,54	180	0,25	4	20	39	200	393
1100	3,80	220	0,38	3	13	26	130	263
1430	6,42	286	0,64	2	8	16	80	156
1800	10,17	360	1,08	1	5	10	50	98

Излучаемая с контактной площадки акустическая мощность связана с мощностью N силы воздействия алмаза на горную породу. Поэтому для качественной оценки излучаемой акустической мощности, в первом приближении, достаточно иметь представление о реализуемой механической мощности. Мощность N равна скалярному произведению силы F на скорость перемещения алмаза.

$$N = F \cdot v_{\text{окр}} \quad \text{Вт.} \quad (\text{II.21})$$

Расчетные значения мощности, реализуемой при взаимодействии алмаза с забоем при скоростях движения алмаза 1 - 10 м/с и силе 0,1 – 100 Н находятся в диапазоне 0,1 – 1000 Вт (табл. II.6).

Таблица II. 6

Мощность, реализуемая при взаимодействии единичного алмаза с забоем

Сила, Н	Мощность, Вт при скорости движения алмаза, м/с				
	1	3	5	7	10
0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	1
0,5	0,5	1,5	2,5	3,5	5
1	1	3	5	7	10
5	5	15	25	35	50
10	10	30	50	75	100
50	50	150	250	350	500
100	100	300	500	750	1000

Удельная мощность N_s , приходящаяся на единицу площади контакта, равна:

$$N_S = \frac{F \cdot v_{\text{окр}}}{S_K} = P_K \cdot v_{\text{окр}} \quad \text{Вт/м}^2. \quad (\text{II.22})$$

Подставляя в формулу (II.19) выражение для силы F и контактного давления P_K получаем выражение для удельной мощности в следующем виде:

$$N_S = P_K \cdot v_{\text{окр}} = \frac{2 \cdot P \cdot v_{\text{окр}}}{N_A \cdot d_a \cdot \pi \cdot h} \quad \text{Вт/м}^2. \quad (\text{II.23})$$

На забое при бурении, как правило, реализуется мощность до 10 кВт. Расчеты по формуле (II.21) подтверждают, что мощность реализуется через ограниченное число алмазов. Так как в противном случае забойная мощность превысила мощность бурового станка. Удельная мощность, реализуемая в процессе взаимодействия алмаза с забоем, при скоростях движения алмаза 1 - 10 м/с и контактном давлении 0,1 – 6000 МПа достигает 60000 Вт/м² (табл. II.7).

Высокие значения удельной мощности не должны вводить в заблуждение относительно энергии, расходуемой при взаимодействии. Длительность взаимодействия алмаза с забоем составляет доли миллисекунды. Учитывая, что работа совершается при деформации горной породы и участок скола алмаза проходит, не взаимодействуя с забоем, длительность периода излучения сокращается еще вдвое. Например, при мощности 500 Вт и длительности периода излучения 0,5 мс затрачиваемая энергия равна 0,25 Дж. Поэтому энергия, затрачиваемая во время взаимодействия, относительно невелика и ограничивается первыми джоулями.

Таблица II.7

Расчетная мощность, отнесенная к контактной поверхности

Контактное давление, $\times 10^6$, Па	Мощность, отнесенная к контактной поверхности, Вт/м ² при скорости движения алмаза, м/с				
	1	3	5	7	10
1	1	3	5	7	10
50	50	150	250	350	500
100	100	300	500	700	1000
500	500	1500	2500	3500	5000
1000	1000	3000	5000	7000	10000
6000	6000	18000	30000	42000	60000

Суммируя изложенное можно утверждать, что мощность акустических колебаний, излучаемых при взаимодействии алмаза с забоем, будет возрастать с увеличением акустического сопротивления горной породы, контактного давления и окружной скорости движения алмаза.

Однако взаимодействие алмазов с забоем нельзя считать одним источником акустического шума разрушения горной породы. В области физики разрушения твердых тел установлено явление излучения акустических волн, обусловленное возникновением и развитием дефектов структуры материалов [111, 112]. Это явление получило название акустическая эмиссия или эмиссия волн напряжений [60]. Излучение акустических сигналов зафиксировано при деформации и разрушении горных пород [40, 51, 121, 123, 148, 166, 167]. В результате исследования микроструктуры образцов горных пород, подвергшихся деформации, установлено, что источниками акустических сигналов являются трещины. Диапазон спектра акустической эмиссии при неограниченном сжатии монолитов горных пород достигает 50 кГц, но основная энергия в спектре находится в диапазоне до 20 кГц [167]. R.M.Kocuncu, W.M.Mc.Cabe и A.E.Lord установили, что изменение акустических эмиссионных спектров отражает ход развития аварийных процессов в горной породе [166]. 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.

§ 3. 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 [37, 101, 119, 142, 143, 161, 178]. 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 (1635 - 1703 г.г.), Ш. Кулона (1736 - 1806 г.г.), А. Навье (1785 - 1836 г.г.), А. Сен-Венана (1797 – 1886 г.г.) и О. Мора (1835 - 1918 г.г.). 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 (1893 - 1963 г.г.). 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 некотором 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 [73] в 1975 г. была предложена волновая теория разрушения горной породы при алмазном бурении. Согласно этой тео-

рии, 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.

Предложим волновую теорию для объяснения износа алмазной коронки при бурении. В процессе взаимодействия коронки с забоем возникают колебания частиц торца коронки и вверх по колонне бурительных труб начинают распространяться акустические волны. Торец алмазной коронки рассмотрим 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.

Волновое уравнение, описывающее распространение волн в сплошных средах, выводится из основных уравнений динамики: уравнения движения

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \xi^1}{\partial t} + \xi^1 \cdot \frac{\partial \xi^1}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{II. 24})$$

и уравнения неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{d\xi^1}{dx} = 0 \quad (\text{II.25})$$

где ρ - плотность материала матрицы; ξ^1 - колебательная скорость частиц материала матрицы, p - звуковое давление.

Для плоской волны волновое уравнение относительно смещения записывается в виде

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (\text{II.26})$$

Волновое уравнение относительно звукового давления p имеет вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (\text{II.27})$$

Общее решение волнового уравнения с помощью метода Д'Аламбера выражается в виде суммы прямой и обратной волн

$$\xi = f_1 \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2 \cdot \left(t + \frac{x}{c}\right) \quad , \quad (\text{II.28})$$

где f_1 и f_2 – произвольные функции.

Первый член представляет волну, распространяющуюся в прямом направлении, второй член - волну, распространяющуюся в обратном направлении.

Для прямой волны изменение смещения частиц материала матрицы при гармонических колебаниях описывается уравнением:

$$\xi = \xi_0 \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) = \xi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad , \quad (\text{II.29})$$

где: ξ_0 - амплитуда смещения частиц матрицы; ω - круговая частота колебаний ($\omega = 2\pi f$, где f – частота колебаний); c - скорость распространения волны; t - время; x - текущая координата расстояния; k – волновое число, соответствующее сдвигу фазы на единице длины, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$; λ - длина волны, $\lambda = c/f = cT$; T – период колебаний.

Изменение звукового давления и колебательной скорости для прямой волны описывается уравнениями:

$$p = p_0 \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) = p_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad , \quad (\text{II.30})$$

$$\xi^1 = \xi_0^1 \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad (\text{II.31})$$

В плоской волне, как уже упоминалось, давление и колебательная скорость частиц совпадает по фазе и различаются только множителем ρc , называемым акустическим сопротивлением.

$$\frac{p}{\xi^1} = \rho \cdot c$$

Отношение амплитудных значений звукового давления к смещению частиц (так как $\xi' = \omega \xi$) представляет акустическую жесткость среды

$$\frac{P_m}{\xi_m} = \omega \cdot \rho \cdot c \quad (\text{II.32})$$

Энергетической характеристикой звукового поля распространяющейся акустической волны является интенсивность J или сила звука. Интенсивность представляет количество энергии, проходящее через единицу площади, перпендикулярной направлению распространению волны. В плоской бегущей волне при отсутствии затухания интенсивность равна

$$J = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_m^2}{\rho \cdot c} = \frac{1}{2} \cdot \xi_m^2 \cdot \rho \cdot c \quad (\text{II.33})$$

В реальных средах по мере распространения происходит поглощение энергии волны, поэтому для звукового давления, колебательной скорости и интенсивности добавляется экспоненциальный множитель, учитывающий поглощение звука. Изменение интенсивности с расстоянием описывается формулой

$$J = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_m^2 \cdot e^{-2\alpha \cdot x}}{\rho \cdot c} = \frac{1}{2} \cdot \xi_m^2 \cdot \rho \cdot c \cdot e^{-2\alpha \cdot x}, \quad (\text{II.34})$$

где: α - коэффициент затухания.

На установившемся режиме уравнение баланса энергии в любом сечении матрицы, расположенном параллельно торцу коронки, может быть представлено в виде суммы потока $w(z)$ акустической энергии, поглощаемого единицей высоты матрицы коронки, и потока I_m акустической энергии, проходящего через данное сечение материала матрицы коронки:

$$W = I_m + \int_0^x w(z) dz, \quad (\text{II 35})$$

где 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:

$$w(z) = \frac{\partial I_m}{\partial z} = -\rho \cdot c \cdot \omega^2 \cdot \xi_m \frac{\partial \xi_m}{\partial z}. \quad (\text{II .36})$$

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

Температурный фактор также оказывает значительное влияние на режущие свойства и ресурс алмаза. Физическая сущность теплообменных процессов в призабойной зоне скважины рассмотрены в работах Л. К. Горшкова и Б. Б. Кудряшова. 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 разупрочнения 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. Скол алмазов возможен при увеличении динамической нагрузки выше критических значений [52].

По данным Л. М. Ступкиной удельная энергия, затрачиваемая на разрушения алмаза при динамическом приложении нагрузки, 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 P.Sauvan и G.Chennauv [78] при взаимодействии алмаза с горной породой температура алмаза в зоне контакта 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.Лоладзе 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 синте-

тических 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]. H.Duer 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.Куручкина 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 забое, 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.*

Специфичность возникающих на забое акустических и тепловых колебаний заключается в том, что с одной стороны их параметры определяют интенсивность разрушения горной породы и износа алмазной коронки, с другой несут информацию о процессе разрушения.

Глава III. АКУСТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАБОЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

§ 1. Основы акустико-спектральной диагностики забойных процессов

Техническая диагностика - отрасль знаний, исследующая технические состояния объектов диагностирования, разрабатывающая методы их определения, а также принципы построения и организацию использования систем диагностирования [79].

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

В первую очередь диагностированию подлежат процессы, определяющие технические показатели бурения (механическую скорость бурения, ресурс алмазной коронки и энергоемкость бурения). К таким процессам можно отнести:

1. Поражение алмазами с забоя и разрушение горной породы;
2. Вибрации коронки;
3. Трение между горной породой и торцом коронки.
4. Распределение энергии на забое при бурении.

Параметры указанных процессов в значительной степени определяют процессы разрушения горной породы и износа алмазной коронки и, в общем, зависят от физико-механических свойств горных пород; конструктивных параметров породоразрушающего инструмента и технологических параметров (осевой нагрузки, частоты вращения бурового снаряда, расхода промывочной жидкости). Поэтому в параметрах забойных процессов содержится диагностическая информация, которая может быть использована для решения следующих задач:

1. Определение состояния, наличия конструктивных дефектов и прогноза ресурса алмазной коронки.
2. Дифференциация геологического разреза в процессе бурения.
3. Контроль вида движения коронки на забое.
4. Определение буримости горной породы.

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 [8, 9, 57, 69, 110]. 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 забойных процессов в качестве объекта диагностирования, а акустических спектров, как носителя диагностической информации, возникают признаки нового научного направления – акустико-спектральной диагностики забойных процессов (аббревиатура АСДЗП).

Предметом изучения АСДЗП являются закономерности изменения акустических спектров от состояния алмазного инструмента, режима бурения, свойств горных пород.

Сущность проблемы АСДЗП состоит в разработке и практической реализации алгоритмов оценки механизма бурения по параметрам акустического спектра.

Назначением АСДЗП является оценка степени отклонения механизма бурения от нормы по изменению акустических спектров.

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

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

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

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

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

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

Предложим терминологию АСДЗП.

Состояние механизма бурения - совокупность подверженных изменению свойств, характеризуемая в определенный момент времени рядом признаков.

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

Ненормальное состояние механизма бурения – 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 забойных процессах 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 и методика исследований

В силу слабой изученности механизма разрушения горной породы при алмазном бурении в основу методики исследований были положены системный подход и эмпирический метод. Системный подход заключался в получении максимально возможной информации о различных аспектах механизма разрушения. Существенным отличием исследований явилось помещение акустического датчика в призабойную зону бурящейся скважины, применение спектрального анализа в диапазоне частот 0 - 20 кГц и выше, а также совместное использование акустических и тепловых измерений.

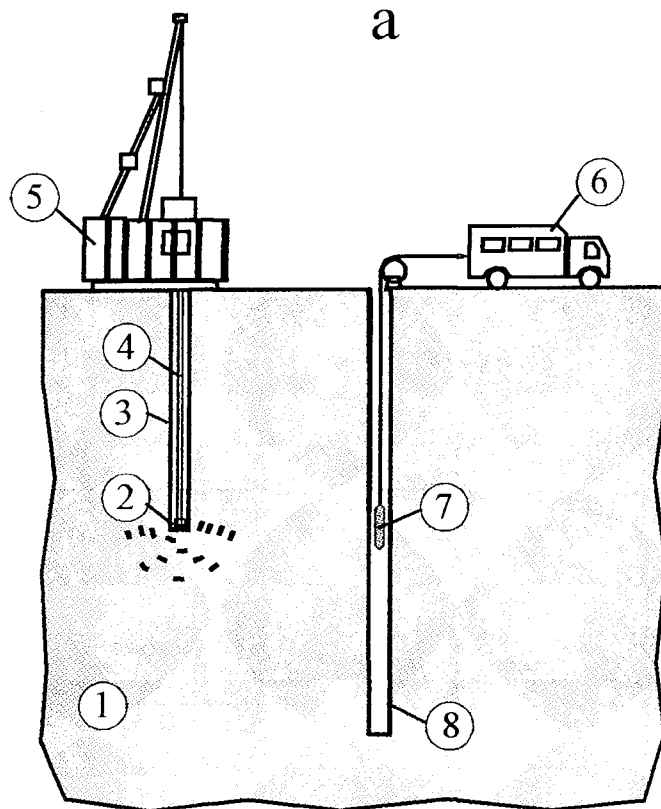
Для исследования механизма разрушения горных пород при бурении в ВИТ-Ре созданы измерительные комплексы, включающие стандартную аппаратуру и специализированные датчики, генерирующие электрический сигнал пропорционально звуковому давлению в широком диапазоне частот. Исследования проводили буровых стендах ВИТРа и на ряде месторождений Карело-Кольского региона и Донбасса. Схемы исследований в стендовых и полевых условиях показаны на рис. III.1.

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.III.1а). Максимальное удаление наблюдательной скважины от бурящейся - 60 м. Глубина исследований ограничивается длиной кабеля на барабане лебедки.

В стендовых условиях измеряли акустические колебания в горной породе и инструменте (рис. III.1б). Стенд оснащен буровым станком СКБ-7, контрольно-измерительной аппаратурой КУРС-613 и киловаттметром Н-395. Датчики устанавливаются в наблюдательной скважине (рис. III.2), пробуренной в блоке горной породы, и в буровом снаряде над колонковой трубой. 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.

При бурении измеряли: осевую нагрузку, частоту вращения бурового снаряда, расход промывочной жидкости, механическую скорость бурения, крутящий момент, реализуемую мощность и звуковое давление в призабойной зоне. Температуру матрицы коронки определяли с помощью плавких вставок. По окончании бурения измеряли геометрические размеры коронки и отбирали пробы шлама и образцы керна.

а



б

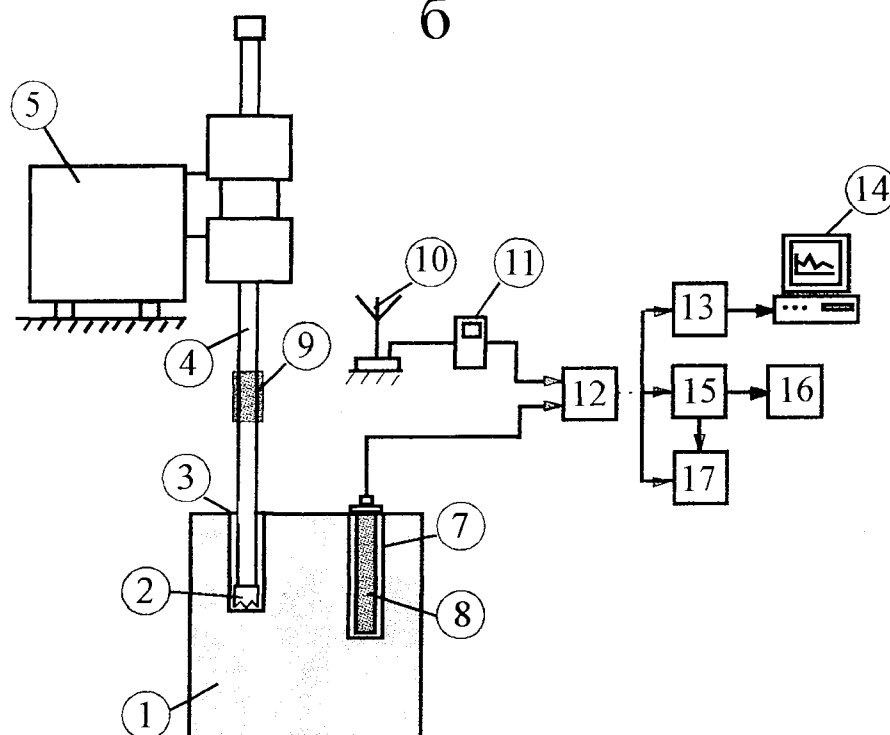


Рис. Ш.1 Схемы исследования колебательных процессов при бурении в полевых (а) и стендовых (б) условиях

1 - массив (блок) горной породы; 2- породоразрушающий инструмент; 3 - бурящаяся скважина; 4- колонна бурильных 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.

Акустические сигналы при бурении подвергали амплитудно-временному и спектральному анализам или записывали на магнитную ленту магнитографа Н067 для последующей обработки в лабораторных условиях.

Амплитудно-временной анализ позволял определить изменение формы сигнала во времени. Для анализа интервалов сигналограмм длительностью до 5 секунд применяли запоминающий осциллограф С8-13. Осциллограммы, полученные на различных скоростях развертки осциллографа, фотографировали фотоаппаратом “Зенит-3Е” для последующего детального изучения. Для анализа более длительных участков сигналограмм использовали самописец Н307/2.

Спектральный анализ позволял определить совокупность гармонических составляющих акустического сигнала. Для спектрального анализа сигналограмм применяли анализатор спектра СК4-58 и двухкоординатный самописец. В результате спектрального анализа получены акустические спектры - зависимости амплитуды A от частоты колебаний F в диапазоне 0 - 20 кГц. Для получения достоверных результатов производили усреднение спектров, полученных с одной сигналограммы. В лабораторных условиях применяли численный метод получения спектров

Считывание данных с магнитной ленты и обработка сигналов осуществлялась комплексом программно-аппаратных средств в составе платы L-CARD –1250 и пакета программ “ПОС” фирмы “Мера”. Для этих же целей было разработано устройство, включающее 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

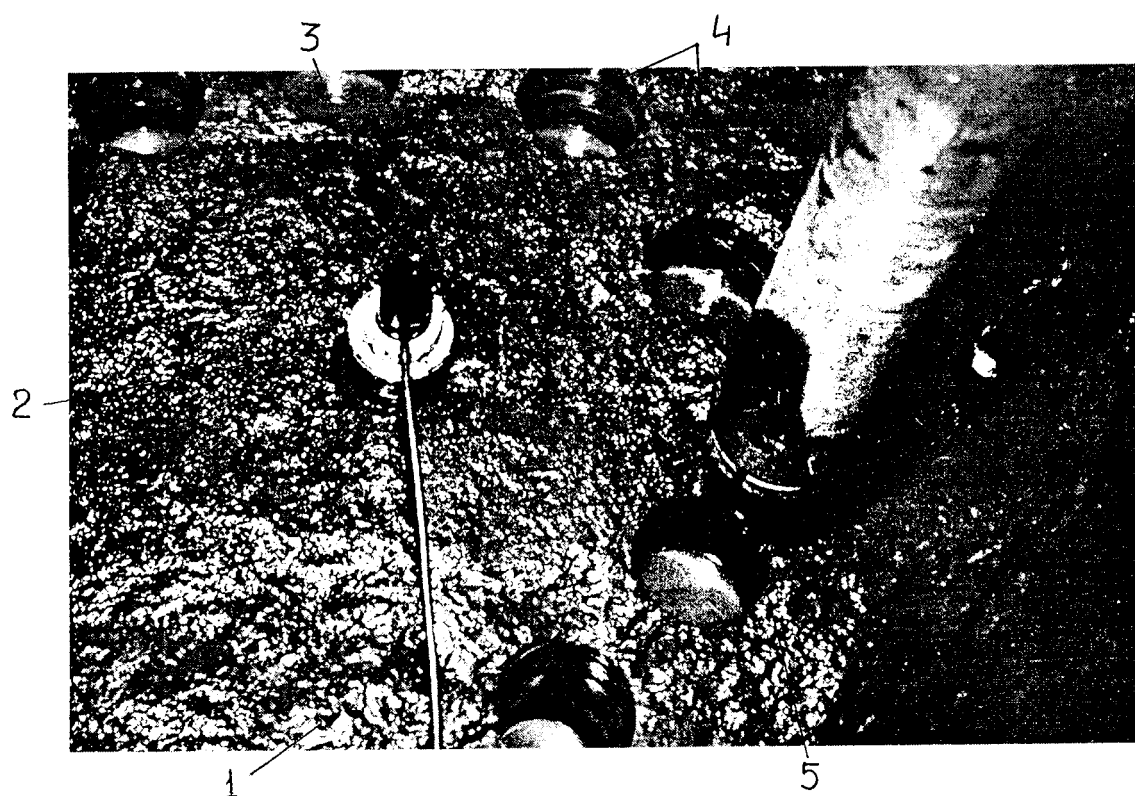


Рис. III.2 . Расположение датчика в блоке горной породы.

1 - блок горной породы; 2 - наблюдательная скважина; 3 - датчик;
4 - пробуренные скважины; 5 - алмазная коронка.

использовали контрольно-измерительную аппаратуру КУРС-613. В стендовых условиях применяли автоматизированную систему управления процессом бурения АСУ-ПБ на базе ПЭВМ ДВК-3 и УСО “Электроника” МС 9505 с частотой опроса датчиков 50 Гц.

Мощность, реализуемую при бурении, измеряли с помощью самопишущего киловаттметра Н -395. Забойную мощность N_3 определяли по формуле:

$$N_3 = N_n - N_{хв} \quad \text{Вт,}$$

где: N_n - полная мощность, реализуемая при бурении, Вт; $N_{хв}$ - мощность, реализуемая при холостом вращении снаряда.

Удельную энергоёмкость разрушения W_v рассчитывали по формуле:

$$W_v = \frac{N_3}{V_{\text{мех}} \cdot S} = \frac{W_3}{V} \quad \text{Дж/м}^3,$$

где N_3 - мощность, реализуемая на забое, Вт; $V_{\text{мех}}$ - механическая скорость бурения, м/с; S - площадь забоя, м²; W_3 - энергия, затраченная на забое, Дж; V - объем разрушенной породы, м³.

При проведении экспериментальных исследований обеспечивался метрологический контроль применяемых средств измерений. Акустические датчики ежегодно подвергались государственной поверке во ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева. По результатам поверки датчики признаны годными и допущены к применению по классу 2 дБ при доверительной вероятности 0,95 (МН-1620-87). Радиоизмерительные приборы проходили периодический контроль в специализированных метрологических организациях. Контрольно-измерительная аппаратура КУРС-613 проверялась перед каждым этапом экспериментальных работ.

Обработку экспериментальных данных производили с помощью пакетов прикладных программ “Параметрическая идентификация систем (ППП “Парис”) и “Статистическая обработка данных” (ППП “Санд”) для решения задач статистического исследования многофакторных матриц наблюдения на ЭВМ СМ-1420 и программы обработки научных данных ORIGIN на персональном компьютере с 486 и Pentium-150 процессорами.

§3. Идентификация забойных процессов по частоте акустических колебаний

Типичный спектр звукового давления, зафиксированный в призабойной зоне бурящейся скважины, является сплошным с отдельными дискретными выбросами (рис. III.3). Диапазон спектра составляет 0-20 кГц и выше. Характерная особенность спектра выражается в уменьшении амплитуды колебаний с ростом частоты. Амплитуды дискретных составляющих на 10- 30 дБ превышают уровень сплошного спектра.

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 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 бурильных труб и породоразрушающего инструмента, процесс разрушения горной породы и протекание промывочной жидкости (табл. III.1).

Таблица III.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 бурильных труб и стенками скважины.	0 - 2
Вибрации колонны бурильных труб - нормальный режим	Динамический характер взаимодействия колонны со стенками скважины. Применение качественных бурильных труб, жесткое крепление станка, правильный выбор промывочной жидкости и др.	0 - 7
- вибрационный (крутильные автоколебания, качение)	Применение бурильных труб с повышенной кривизной, недостаточная жесткость крепления станка и др.	0 - 20
Разрушение горной породы	Физическая особенность феномена разрушения	7 - 20 и выше

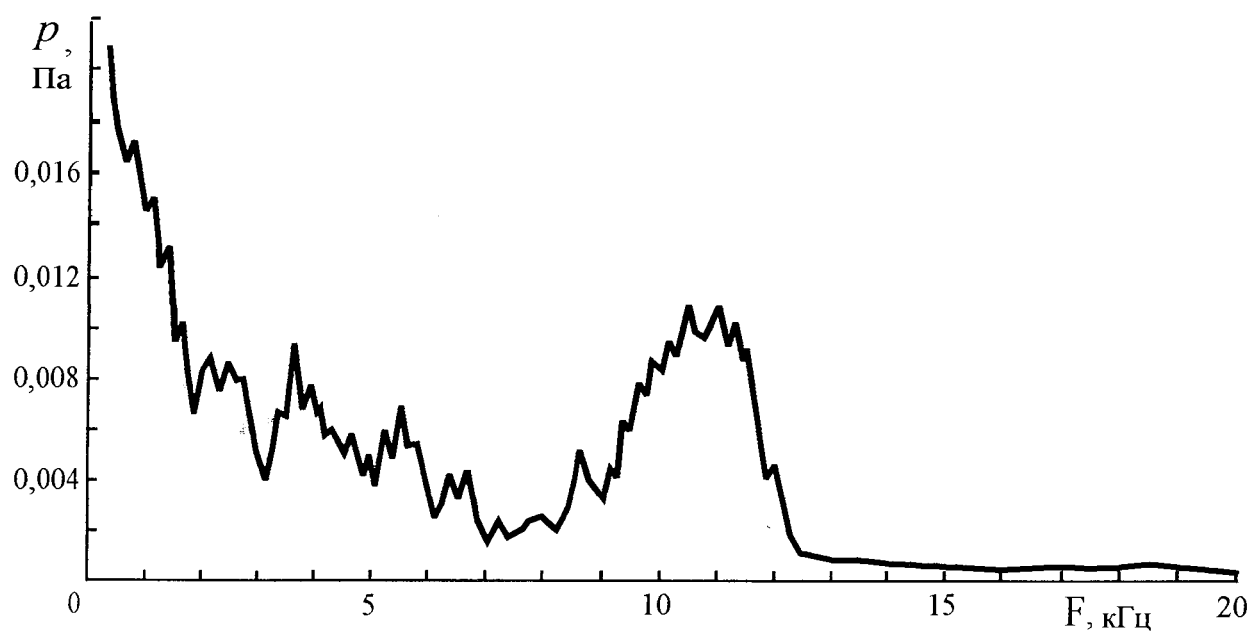


Рис. III.3. Спектр звукового давления, зафиксированный на расстоянии 6 м от забоя скважины №1182 на глубине 337м при бурении левочоррита алмазной коронкой 02ИЗ-76 на участке Северный Лявочорр-Валепакх месторождения Кальйок.

В результате исследований впервые установлено, что в области забоя протекает высокочастотный физический процесс с незначительной амплитудой колебаний, следствием которого является возникновение акустического шума разрушения. Частотный диапазон акустического шума разрушения установлен на основе анализа изменения спектров звукового давления по мере удаления от забоя бурящейся скважины и сравнения спектров, зафиксированных на одинаковом расстоянии от забоя, при бурении коронками в нормальном состоянии и с полностью изношенным рабочим слоем. Построены зависимости звукового давления на различных частотах от глубины спуска датчика в наблюдательной скважине (рис.III.4). Звуковое давление в диапазоне частот 0 - 20 кГц остается примерно одинаковым по всей глубине скважины. На низких частотах 500 и 1000 Гц амплитуда убывает по мере приближения датчика к забою. Это свидетельствует о том, что источником низкочастотных колебаний являются вибрации колонны бурильных труб. Повышение амплитуд низкочастотных колебаний в верхней части разреза объясняется увеличением зазора между колонной бурильных труб и обсадной колонной. Амплитуды высокочастотных колебаний свыше 5 - 7 кГц по мере приближения датчика к забою, наоборот, увеличиваются и достигают максимальных значений на минимальных расстояниях от забоя (рис. III.4). Амплитуда высокочастотных колебаний возрастает до максимальных значений за доли миллисекунд (рис.III.5).

Сравнение спектров звукового давления, зафиксированных при бурении алмазными коронками в нормальном состоянии и при полном износе коронки, показало, что высокочастотные колебания фиксируются в призабойной зоне в процессе разрушения горной породы и исчезают при прекращении углубки скважины. При бурении гранодиорита коронкой ИМВ-3-46 на постоянном режиме ($P=1000$ даН, $n=640$ мин⁻¹, $Q=19$ дм³/мин) с механической скоростью 1,8 м/ч диапазон акустического спектра составлял 0 - 20 кГц (рис.III.6, кривая 1). Но как только был полностью изношен алмазосодержащий слой коронки разрушение горной породы прекратилось и диапазон спектра снизился до 7 кГц (рис. III.6, кривая 2).

Установленные факты позволили сделать вывод о связи высокочастотных колебаний с разрушением горной породы алмазами. Экспериментально установленный диапазон акустического шума разрушения составляет от 5 -7 до 20 кГц и выше и совпадает с диапазоном, теоретически рассчитанным в главе II. 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

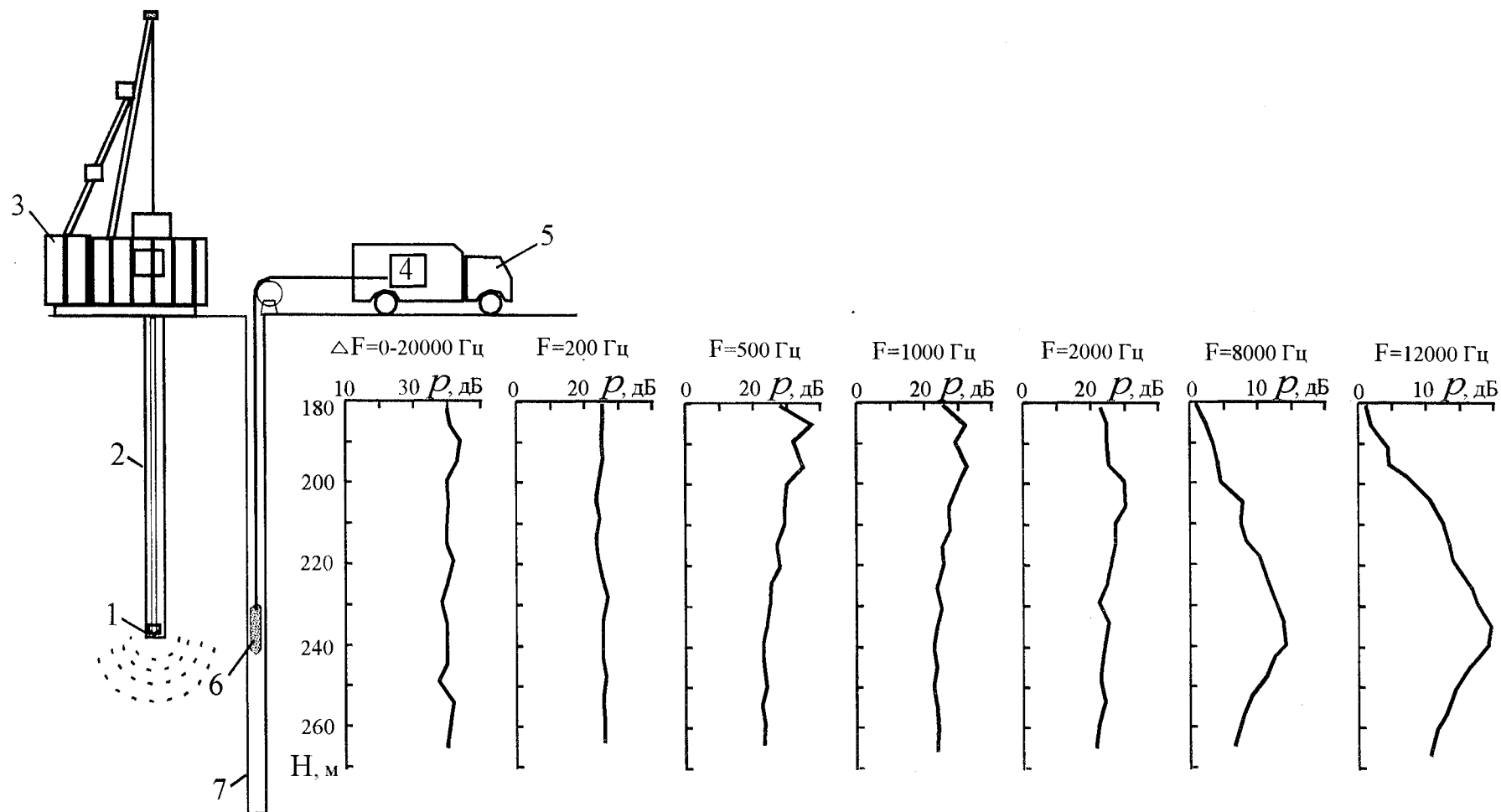


Рис. III.4. Зависимости звукового давления p на различных частотах F от глубины H спуска датчика в наблюдательной скважине при глубине бурящейся скважины 239 м

1 - алмазная коронка; 2 - бурящаяся скважина; 3 - буровая установка; 4 - измерительная аппаратура; 5 - самоходная лаборатория; 6 - акустический датчик; 7 - наблюдательная скважина.

взаимодействием со стенками скважины. При надежном закреплении бурового станка и использовании не искривленных бурильных 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

§ 4. Формирование списка диагностических параметров

Информативные параметры акустического шума разрушения. Информация о разрушении горной породы при бурении заложена в амплитудно-частотных свойствах акустического сигнала. Одним из важнейших параметров акустического сигнала, который напрямую связан с амплитудой колебаний, является энергия (мощность). Из вибродиагностики машин и механизмов известно, что мощность акустического сигнала пропорциональна кинетической энергии взаимодействия деталей [55]. Поэтому мощность акустического шума разрушения связана с кинетической энергией взаимодействия алмазов с забоем. Так как обрабатывается временная выборка сигнала, рассмотрим связь его энергетических параметров во временной и частотной областях.

Средняя мощность стационарного сигнала на временном интервале $(0, T)$ определяется [102] по формуле:

$$P_{xx}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt \quad , \quad (III.3)$$

где x - амплитуда сигнала, t - время.

Энергия сигнала равна интегралу от мощности по всему промежутку существования сигнала:

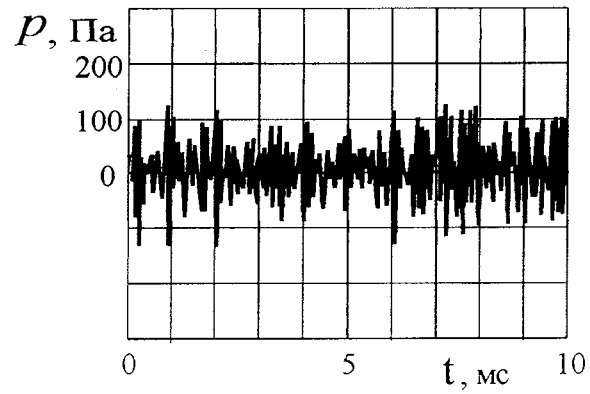
$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{xx}(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad . \quad (III.4)$$

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

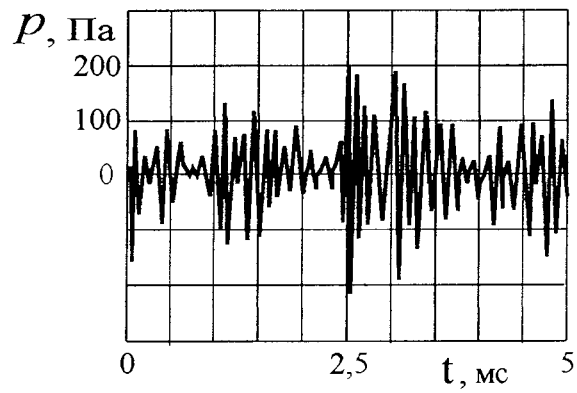
$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(f)|^2 df \quad , \quad (III.5)$$

где: f - частота сигнала, Гц.

а



б



в

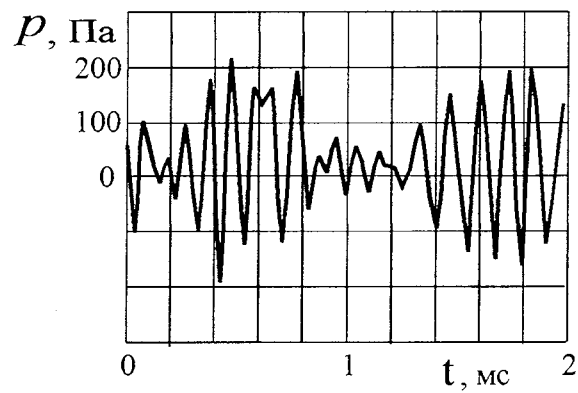


Рис. III.5 Осциллограммы звукового давления, зафиксированные на расстоянии 0,3 м от забоя при бурении коронкой И4ДП-59 гранито-гнейса на скорости развертки осциллографа 0,001 (а), 0,0005 (б) и 0,0002 (в) с/дел.

Согласно равенству Парсеваля полная энергия сигнала не зависит от формы представления:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(f)|^2 df . \quad (\text{III.6})$$

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

$$E_A = \int_7^{20} |x(f)|^2 df . \quad (\text{III.7})$$

Однако вычислять энергию сигнала по результатам обычного спектрального анализа оказалось не совсем удобным и 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, поэтому СКЗ акустического шума разрушения характеризует и кинетическую энергию взаимодействия алмазов с забоем. Вычисление СКЗ в диапазоне 7-20 кГц (рис. III.7) производилось после оцифровки спектрограмм от нижней границы 7 кГц с шагом 1 (0,5) кГц по формуле

$$СКЗ = \sqrt{\frac{(A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2)}{n}} \quad \text{Па} , \quad (\text{III.8})$$

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

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. III.7). 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 звукового давления и средней частоты f_A позволяет оценивать амплитудно-частотные изменения в акустическом шуме разрушения.

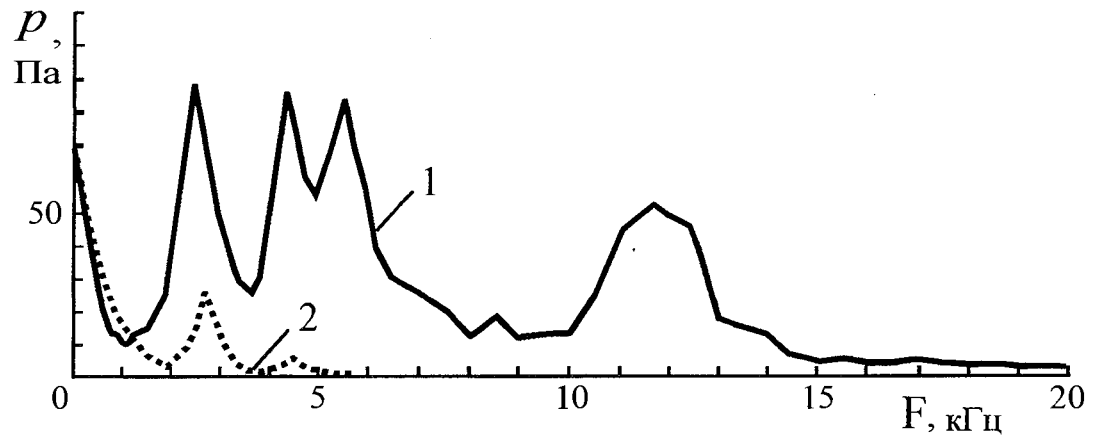


Рис. III.6. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении гранита алмазной коронкой ИМВ-3-46 с механической скоростью 1,8 м/ч (1) и при полной потере режущих свойств и прекращении углубки скважины (2)

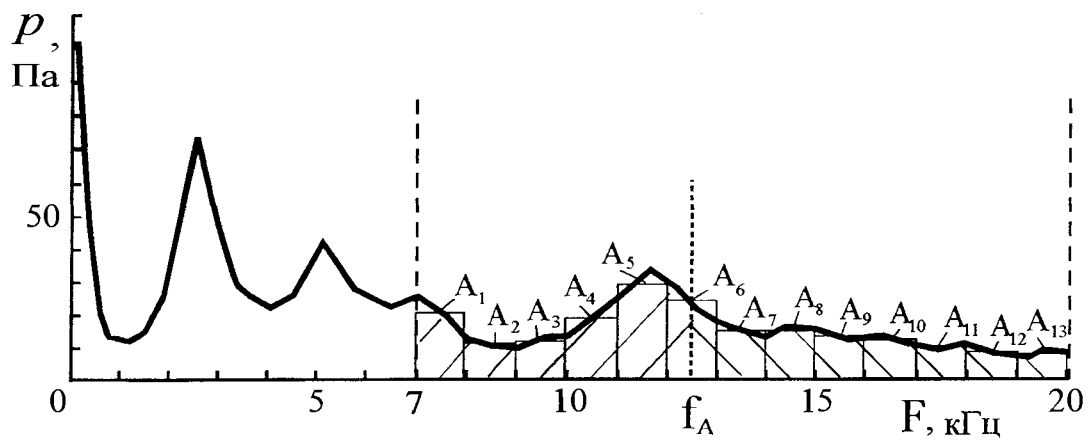


Рис. III.7. Спектр звукового давления с выделенным высокочастотным диапазоном 7-20 кГц

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:

$$W_{AV} = \frac{W_A}{V} = \frac{W_A \cdot t}{V} \text{ Дж/м}^3, \quad (\text{III.9})$$

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 акустической мощности 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, оснащенном 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 [12]. Вставки зачеканивали в глухие отверстия, просверленные в торце однослойной алмазной коронки типа А4ДП. Одновременно в 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 звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения и температуры торца коронки в трех технологических ситуациях: заполировании, нормальном режиме и прижоге алмазной коронки (рис. III.8).

В режиме заполирования осевая нагрузка $P = 500$ дан была явно недостаточной для эффективной работы однослойной алмазной коронки, что и предопределило постепенное ухудшение режущих свойств алмазов. После окончания бурения

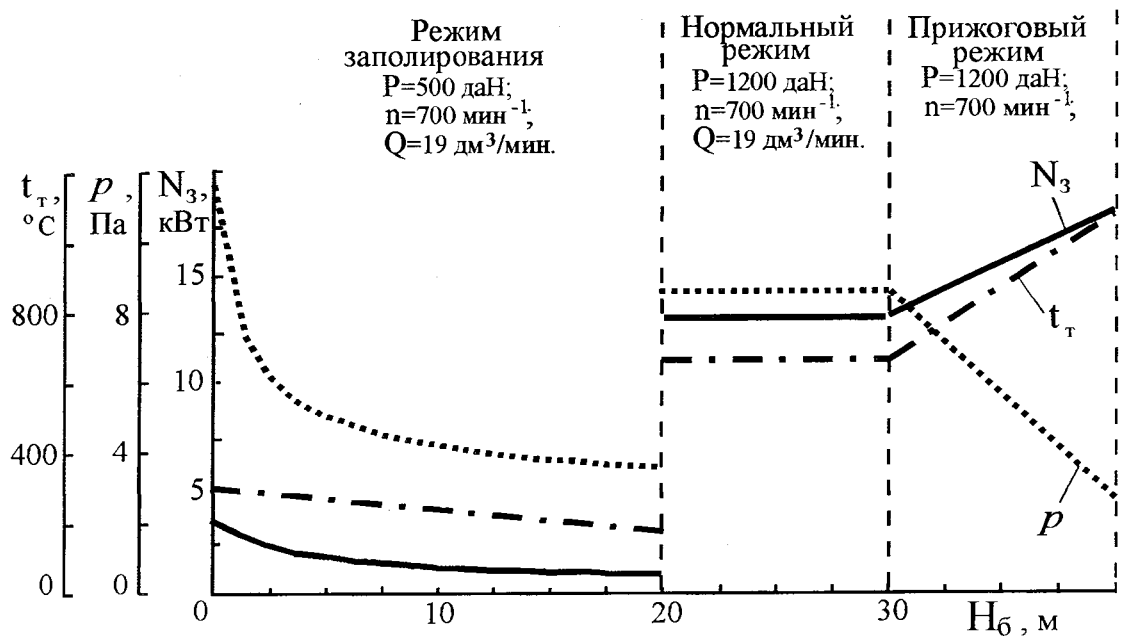


Рис. III.8. Зависимости забойной мощности N_3 , СКЗ звукового давления p в призабойной зоне и температуры t_T торца однослойной алмазной коронки от режима и глубины H_6 бурения

у части алмазов отмечено появление поверхностей со стеклянным блеском. В процессе заполирования коронки забойная мощность, температура матрицы коронки и звуковое давление постепенно уменьшались. После проходки 20 см изменилась оловянная вставка, что свидетельствует о невысокой (порядка 300°C) температуре матрицы коронки. По окончании бурения изменение отмечено лишь в центре оловянной вставки, т.е. температура торца коронки продолжала снижаться и в конце бурения не превышала 232 °C.

Создание нормального режима путем увеличения осевой нагрузки до 1200 даН сопровождалось увеличением забойной мощности, температура матрицы коронки и звукового давления (рис. III.8). После окончания бурения отмечено изменение свинцовой и алюминиевой вставок, что указывает на достижение температуры матрицы 600°C.

Для прижога коронки была прекращена подача промывочной жидкости. После 10 см проходки у коронки был полностью изношен алмазосодержащий слой вместе с плавкими вставками. Забойная мощность и температура матрицы коронки при прижоге резко возросли, а акустический шум разрушения исчез (рис. III.8).. Температура матрицы коронки достигла температуры плавления меди (1085 °C).

Экспериментальные исследования в целом подтвердили упрощенную формулу (I.2) баланса энергии, выражающую энергию, подведенную к забою, через сумму акустической и тепловой энергий. В режиме заполирования (рис. III.8) 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 .

$$K_p = \frac{W_A}{N_3} \quad (\text{III.10})$$

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 бурения выглядит следующим образом:

а) Акустический спектр, измеренный в призабойной зоне бурящейся скважины в диапазоне частот 0 - 20 кГц. Спектр является комплексным источником информации о вибрации коронки при бурении. Наличие максимума в спектре показывает существование на забое физического колебательного процесса с частотой расположения максимума, а амплитуда максимума связана с амплитудой (мощностью) физического процесса.

б) Информативные параметры акустического шума разрушения: СКЗ звукового давления и средняя частота f_A диапазона 7 - 20 кГц.

в) Удельная акустическая энергия W_{AV} , выделившаяся при разрушении единицы объема горной породы в диапазоне частот 7-20 кГц.

г) Коэффициент распределения энергии при разрушении K_p .

Способы контроля механизма бурения на основе диагностических параметров защищены в патентах РФ [116, 117].

Глава IV. 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. IV.1 а). Коэффициентом асимметрии называют отношение наибольшего и наименьшего напряжений цикла. Так как после скола частицы горной породы алмаз некоторое время движется, не встречая сопротивления забоя, то соответственно и напряжения в нем в этот период равны нулю. Поэтому цикл изменения напряжений в алмазе будет пульсационным или однонулевым, т.е. минимальное напряжение 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

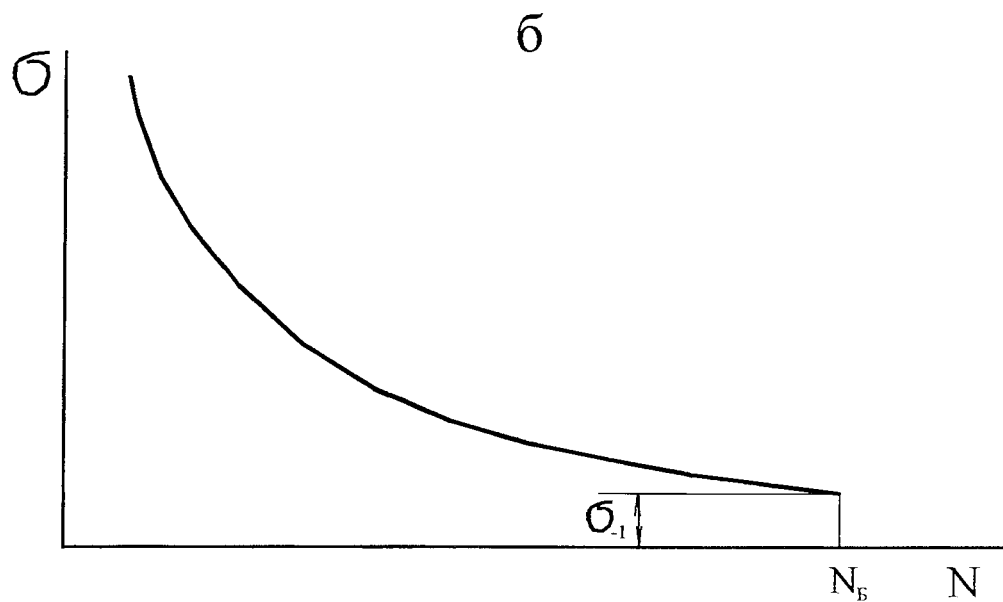
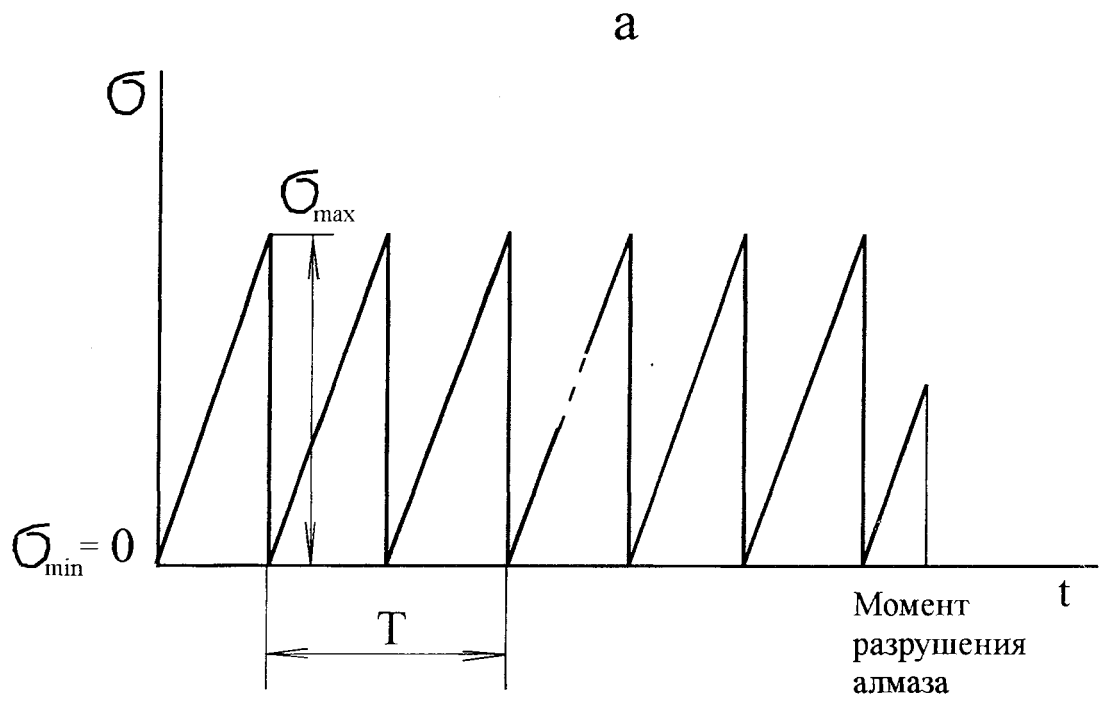


Рис. IV.1. Схема изменения напряжений σ , испытываемых единичным алмазом во времени t (а) и предполагаемая кривая усталости алмаза (б)

напряжений, которое алмаз выдерживает до разрушения, от наибольшего напряжения σ в цикле показана на рис.V.16. Зависимость $N = f(\sigma)$ представляет кривую усталости единичного алмаза, а наибольшее значение максимального напряжения σ_0 цикла, которое алмаз может выдержать без разрушения до числа циклов N_B , является его пределом выносливости.

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 [50, 138, 146]. 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

В настоящее время известно несколько классификаций износа алмаза [45, 73, 173, 175, 179] и алмазных коронок [103, 119] при бурении. В наиболее полной классификации Г.А.Блинова установлено четыре вида износа алмазных коронок: нормальный технологический износ, аварийно-технологический износ, абразивно-технологический износ и механический износ [103].

Для установления связи между механизмом бурения и видами технологического износа алмазных коронок проведены стендовые исследования с использованием акустико-спектральной диагностики. Условия благоприятные для развития различных форм износа создавали путем изменения режимных параметров. Оценку состояния и измерение геометрических размеров коронки производили перед началом и по окончании рейса.

Исследования подтвердили вывод (см. главу II) о необходимости совместного учета разрушающих воздействий физических полей различной природы при износе алмазного инструмента. Установлены зависимости между акустическим спектром в призабойной зоне, температурой матрицы и видом износа алмазной ко-

ронки, на основе которых разработаны диагностические признаки развития основных видов износа алмазных коронок (табл. IV.1).

Таблица IV.1

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	<i>Предприжог:</i> Увеличение звукового давления в диапазоне 7-20 кГц (в 2-3 раза) и K_p (в 2-3 раза) <i>Прижог:</i> резкое уменьшение 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 звукового давления и средней частоты f_A 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.

Равномерный износ коронки. Исследован износ 22 коронок типа И4ДП (5 шт), 02ИЗ (10 шт), И6ДХ (2 шт) БС (2 шт), ИС (1 шт) диаметром 59 мм и ИМВ-3 (2 шт) диаметром 46 мм при бурении гранитов и гематитового кварцита. Для всех коронок равномерный износ развивался при отсутствии вибрации бурового снаряда и достаточном охлаждении промывочной жидкостью. Поэтому условием равномерного износа коронки при бурении является нахождение температуры и динамических нагрузок на забое пределах допустимых значений. Экспериментально определенным методом плавких вставок диапазон изменения температуры торца ко-

ронки при равномерном ее износе, в зависимости от режима бурения, составляет 200 - 600 °С, а звуковое давление в призабойной зоне в диапазоне акустического шума разрушения не превышало 50 Па. При равномерном износе импрегнированных коронок при бурении горной породы на постоянном режиме акустический спектр и коэффициент K_p в течение всего времени бурения до полного износа рабочего слоя коронки оставались практически постоянными.

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

Типичным примером является развитие прижога коронки ИМВ-3-46 при бурении гранита при $P = 1200$ 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 имеет характерную для нормального бурения форму с уменьшением амплитуд колебаний с ростом частоты (рис. IV.2а), а технические показатели бурения практически не изменяются (рис. IV.3). 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. IV.2 б) 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 энергоемкость бурения уменьшилась (рис. IV.3). 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. IV.2 в) исчезли высокочастотные колебания и резко уменьшились амплитуды колебаний в низкочастотном диапазоне. Звуковое давление в диапазоне 7-20 кГц уменьшилась до минимальных значений. Коэффициент распределения энергии

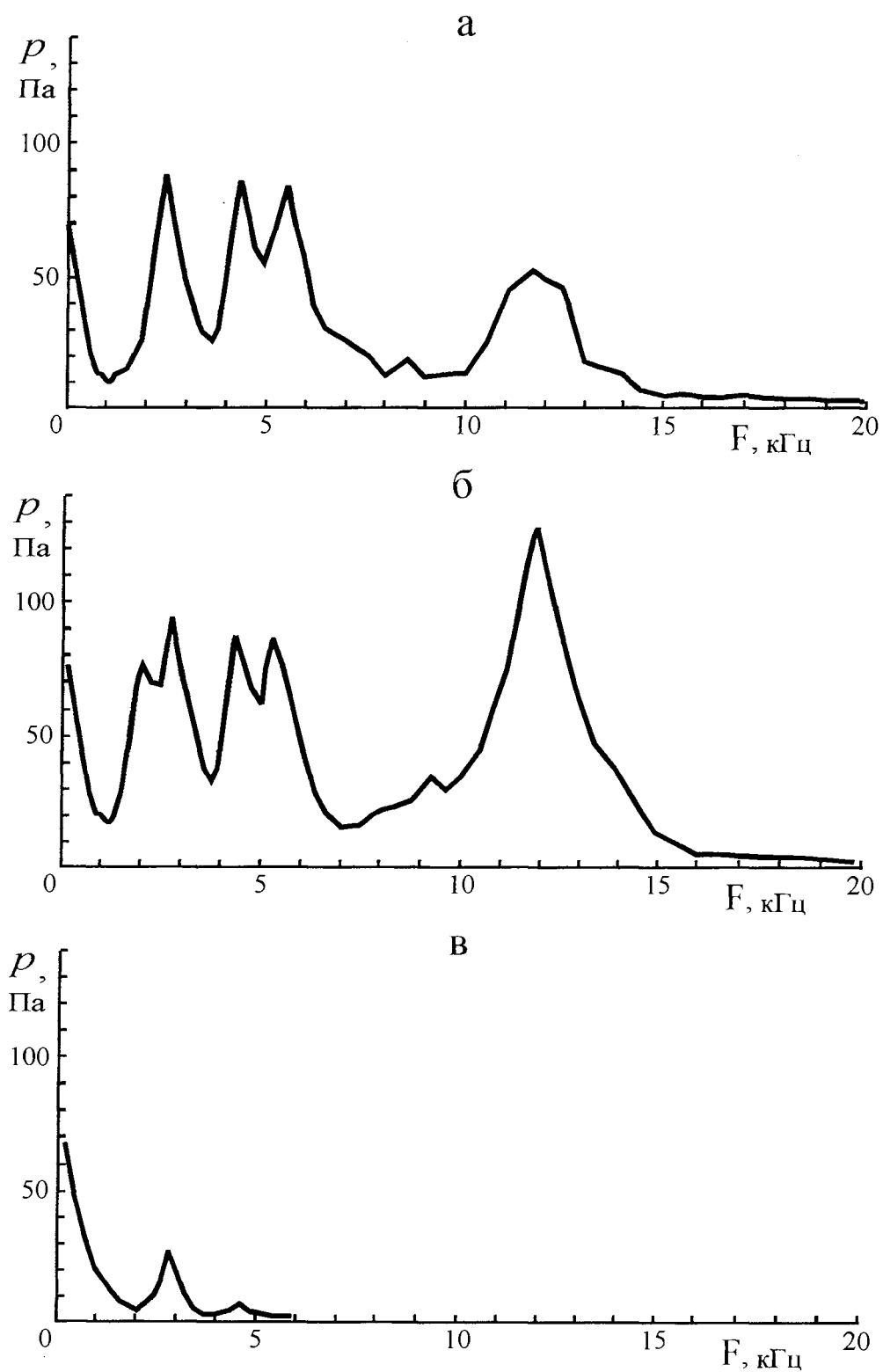


Рис. IV.2 Спектры звукового давления в призабойной зоне в процессе прижога алмазной коронки ИМВ-3-46
 а - глубина бурения 0,35 м; б - глубина бурения 0,4 м;
 в - глубина бурения 0,45 м.

уменьшился до $0,2 \cdot 10^{-3}$ Па/Вт (в 78 раз). Реализуемая мощность и удельная энергоемкость 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 (рис. IV.4). Износ коронки по высоте составил около 10 мм. Состояние коронки типично для высокотемпературного износа и характеризуется следующими признаками: материал матрицы напелз 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 обнажился слой стекловидной массы толщиной до 3 мм, прилегающий к внутренней поверхности коронки.

Механизм бурения 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, 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

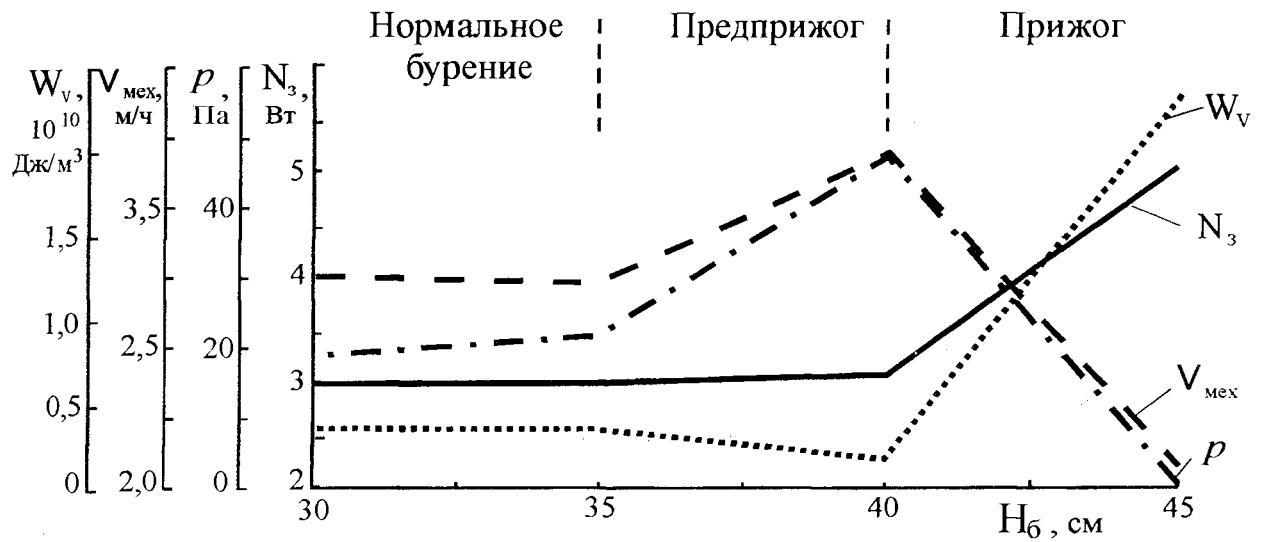


Рис. IV.3. Зависимости забойной мощности N_z , СКЗ звукового давления P в призабойной зоне, механической скорости бурения $V_{мех}$ и удельной энергоёмкости W_v от глубины бурения H_b в процессе прижога алмазной коронки ИМВ-3-46

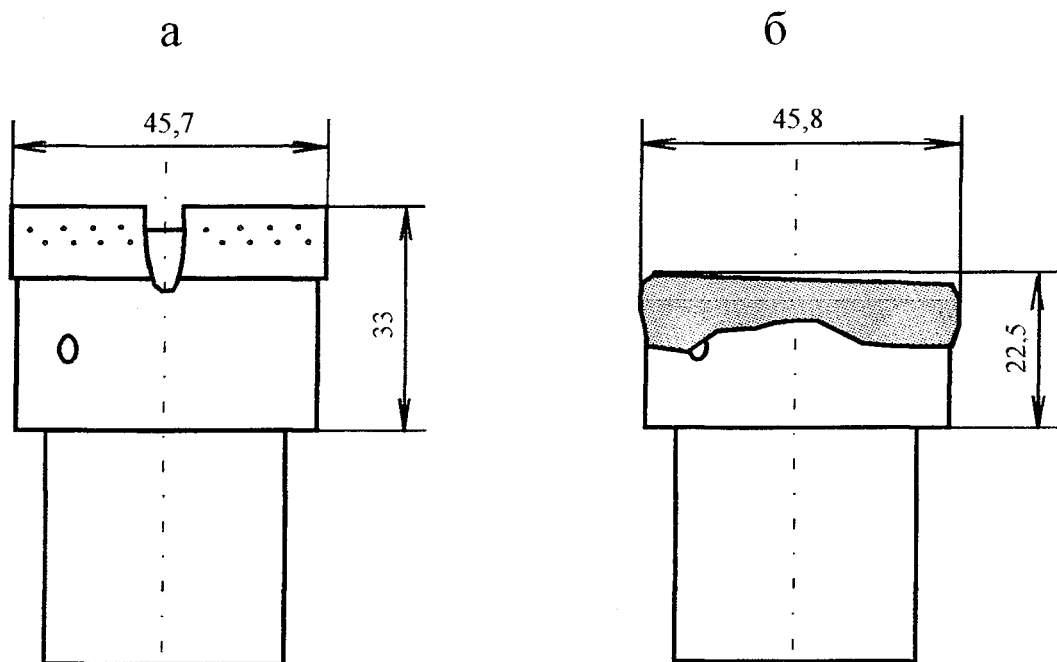


Рис. IV.4. Алмазная коронка ИМВ-3-46 перед началом бурения (а) и после прижога (б)

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, находящемуся 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 при развитии прижога коронки показывают высокую чувствительность метода при диагностике прижоговой ситуации. В настоящее время прижог коронки определяется с помощью самопишущего киловаттметра по резкому увеличению амплитуды колебаний мощности относительно текущего значения [48]. Однако по диаграммам затрат мощности, потребляемой электроприводом бурового станка, невозможно определить предприжог коронки из-за инерционности и низкой чувствительности киловаттметра. Вследствие чего в значительном числе случаев не удается избежать развития аварийной ситуации в скважине.

Заполирование можно определить как процесс ухудшения режущих свойств коронки, связанный с состоянием и выступом алмазов. Выделим два основных типа заполирования коронки: заполирование алмазов при наличии их выступа из тела матрицы и износ алмазов заподлицо с матрицей. Большинство исследователей [48] причиной заполирования выступающих алмазов считают недостаточную осевую нагрузку. Для моделирования условий заполирования бурение производили с пониженной осевой нагрузкой до 500 даН.

Обработка данных стендовых и производственных исследований при заполировании 15 алмазных коронок типа А4ДП, 01А3, 01А4 и А6ДХ выявила характерные особенности изменения информативных параметров механизма бурения. Анализ состояния плавких вставок, установленных в торце коронки, показал, что в начале заполирования происходит изменение свинцовой вставки, а в конце оловянной вставки. Это свидетельствует, что заполирование начинается при температуре матрицы порядка 300°C, а в конце бурения температура уже не превышает

232 °С. Спектр звукового давления в призабойной зоне характеризуется низкими значениями амплитуд акустического шума разрушения в начале бурения и постепенным их снижением при развитии заполирования алмазов. Таким образом, заполирование алмазов развивается в условиях низких температур торца коронки (200-300 °С) и динамических нагрузок, воспринимаемых алмазами. Указанные условия способствуют специфической обработке (полировке) поверхности алмазов с устранением микронеровностей. Заполирование диагностируется по одновременному плавному уменьшению звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения и средней частоты f_A , а также увеличению коэффициента K_p . При этом наблюдается рост удельной энергоемкости бурения. Уже известными признаками заполирования коронки являются постепенное уменьшение при бурении реализуемой мощности и механической скорости.

Рассмотрим результаты бурения однослойной алмазной коронкой А4ДП-59 гематитового кварцита при $P=500$ даН, $n=600$ мин⁻¹ и $Q=19$ дм³/мин с измерениями акустических колебаний в инструменте (рис. IV.5). Осевая нагрузка в 500 даН была недостаточной для эффективного разрушения гематитового кварцита и на забое создались условия для заполирования алмазов. Анализ состояния коронки по окончании бурения показал, что у порядка 70% объемных алмазов образовались столообразные поверхности со стеклянным блеском. Изменения акустического спектра в инструменте при развитии заполирования коронки связаны с уменьшением амплитуд колебаний акустического шума разрушения и ростом амплитуд низкочастотных колебаний (рис. IV.6). СКЗ звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения уменьшается, а в низкочастотном диапазоне спектра - увеличивается. Суммарное звуковое давление не претерпевает значительных изменений. Установлена сильная отрицательная корреляция между изменением амплитуд колебаний на частотах 7 - 20 кГц, механической скорости бурения и мощностью, реализуемой на забое. Коэффициент корреляции отрицателен и находится в пределах 0,87 – 0,95.

Физически факт перераспределения энергии в акустическом спектре в инструменте можно объяснить следующим образом. После возникновения механизма бурения, способствующего развитию заполирования коронки, начинается изменение поверхностного слоя алмазов, что приводит к увеличению площади контакта пары алмаз-порода. В результате снижается давление алмаза на забой и уменьшаются динамические нагрузки на контакте алмаза с горной породой. Как следствие, уменьшается мощность акустического шума разрушения. Рост амплитуд

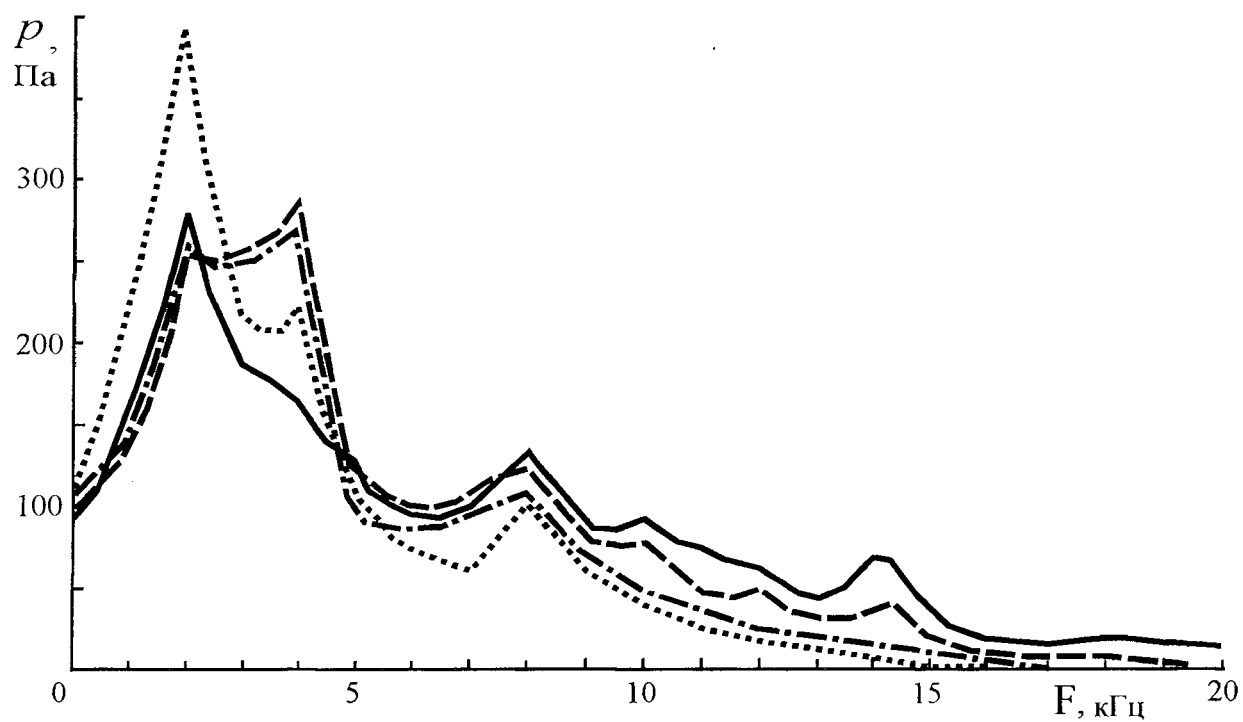


Рис. IV.5. Спектры звукового давления, зафиксированные в инструменте на расстоянии 1 м от торца коронки в процессе заполирования коронки А4ДП-59 при бурении гематитового кварцита на различных глубинах бурения H_6 .

— - $H_6 = 5$ см; --- - $H_6 = 10$ см; - · - $H_6 = 15$ см; ··· - $H_6 = 20$ см.

низкочастотных колебаний в акустическом спектре связан с увеличением вибрации снаряда вследствие снижения прочности сцепления коронки с забоем.

Заполирование, в виде износа алмазов заподлицо с матрицей, в большей степени, характерно для импрегнированной коронки и определяется несоответствием свойств матрицы и качества алмазов. При пониженном качестве алмазов и слишком твердой матрице скорость износа алмазов превышает скорость износа матрицы. Основным диагностическим признаком развития заполирования у импрегнированной коронки является постепенное уменьшение звукового давления в диапазоне акустического шума разрушения. В однослойной коронке срабатывание алмазов заподлицо с матрицей происходит вследствие их скола при повышенных динамических нагрузках и будет рассмотрено ниже.

Таблица IV.2

СКЗ звукового давления в призабойной зоне и состояние рабочей поверхности коронки при бурении гранита

Тип коронки	СКЗ звукового давления на расстоянии 0,3 м от забоя, Па		Характер изменения рабочей поверхности коронки
	При отсутствии изменений рабочей поверхности коронки	При сколе алмазов и возникновении канавок на торце	
А4ДП-59	37	241	Скол 20 % алмазов (26 из 130 штук)
А6ДХ-59	30	170	Скол 40 % алмазов (38 из 96 штук). На всех секторах развиты борозды.
К-01-1-59	25	195	Скол 25 % алмазов на пилоте (20 из 80 штук). На двух секторах пилота развиты борозды.
БС-59	18	285	Кольцевая канавка на расстоянии 2,7 мм от наружной поверхности коронки глубиной 1,5 мм и шириной 5,8 мм
И6ДХ-59	28	250	Кольцевая канавка на расстоянии 1,4 мм от наружной поверхности коронки глубиной 1,5 мм и шириной 2,3 мм

Образование канавок и фасок на торце коронки, а также скол выступающих алмазов происходит при бурении трещиноватых горных пород и при возбуждении вибраций бурового снаряда [103, 119]. В стендовых условиях исследован износ пяти коронок типа А4ДП, А6ДХ, К-01-1, И6ДХ и БС диаметром 59 мм при бурении гранита на режимах, сопровождающихся вибрациями бурового снаряда (табл. IV.2). Вибрации снаряда вызывались изменением режимных параметров и контролировались по появлению в акустическом спектре максимумов амплитуды (рис. IV.6). У однослойных коронок А4ДП, А6ДХ и К-01-1 после окончания бурения отмечен скол 20 – 40 % объемных алмазов, у импрегнированных коронок И6ДХ и БС – образование кольцевых канавок. СКЗ звукового давления в призабойной зоне при возбуждении вибрационного режима увеличивается 6 – 16 раз, что показывает резкое увеличение динамических нагрузок, воспринимаемых короной при бурении.

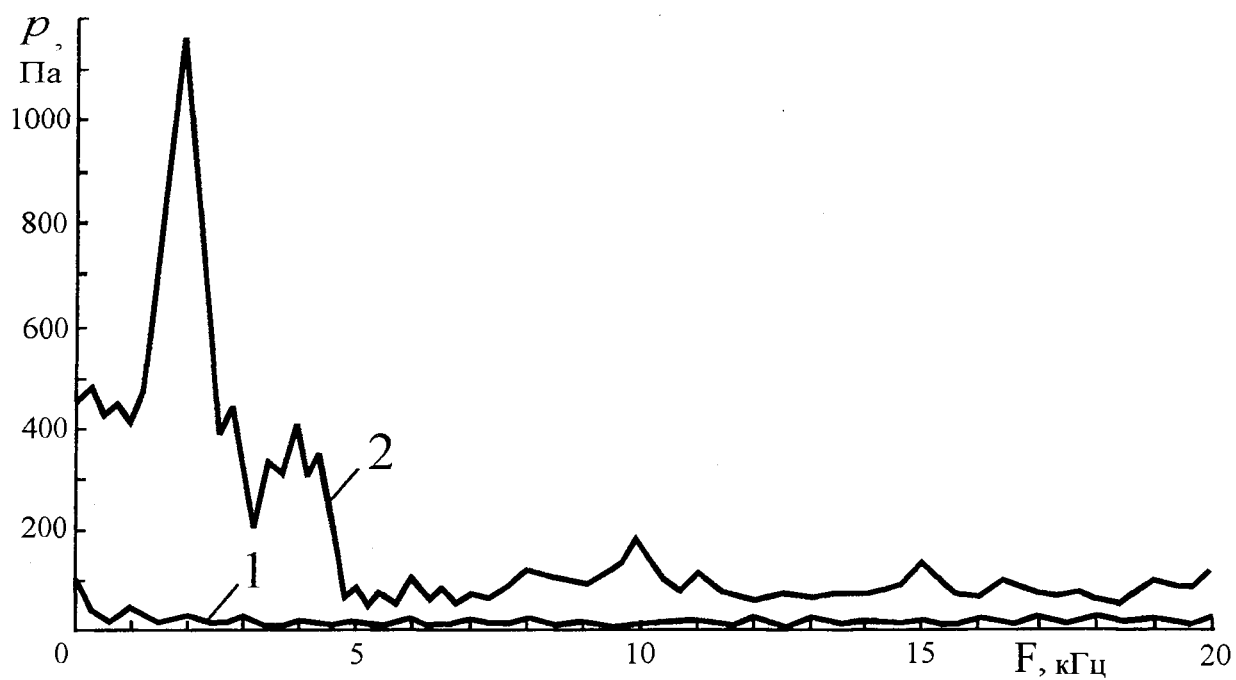
Результаты исследований позволяют утверждать, что для каждого типа коронки существует определенный уровень динамических нагрузок, превышение которого вызывает износ коронки, делающий невозможным ее дальнейшую эксплуатацию. Во избежание этого для каждого типа коронки необходимо установить предельный уровень звукового давления в призабойной зоне и контролировать его при бурении с целью предотвращения преждевременного снятия коронки с работы.

§ 3. Прогноз ресурса и кривая износостойкости алмазной коронки

Специфика бурения как технологического процесса заключается в недоступности непосредственного измерения нагрузок на контакте пары коронка – горная порода. При достаточном охлаждении коронки, что по данным П.Н. Курочкина и ряда других исследователей достигается уже при минимальном расходе промысловой 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 звуковым давлением в диапазоне 7-20 кГц и ресурсом N_k алмазных коронок. С ростом звукового давления в призабойной зоне ресурс коронки уменьшается.

а



б

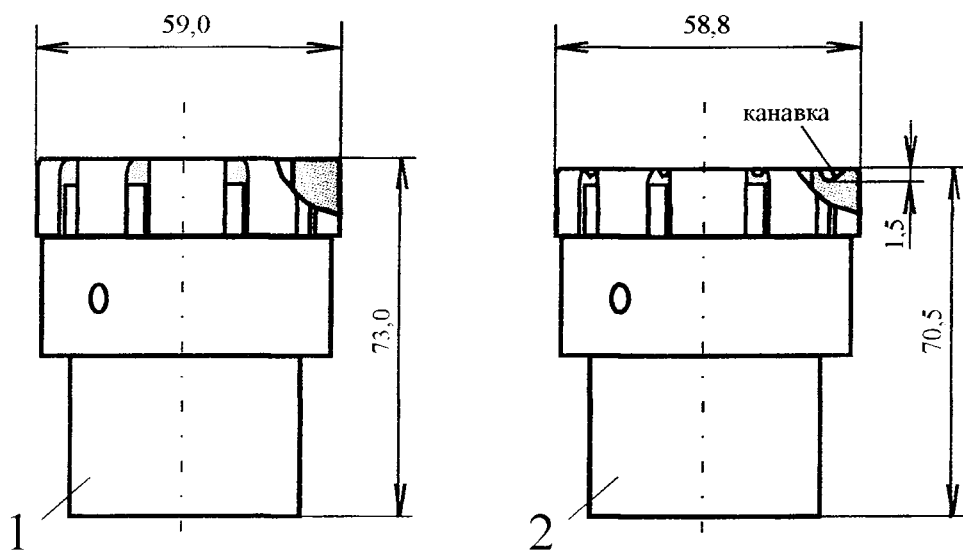


Рис. IV.6. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении гранита коронкой БС-59 (а) и состояние коронки (б) после проходки 0,2 м в режимах равномерного вращения (1) и качения (2)

Для большинства коронок зависимость между ресурсом и СКЗ звукового давления представляет экспоненциальную функцию вида: $y = a \cdot e^{-bx}$.

Бурение на участке шахты Центральная – Новая (Донбасс) осуществлялось алмазными коронками Q1A2-112. Для бурения использовали буровой станок ЗИФ-650М и колонну бурильных труб диаметром 50 мм с муфто - замковым соединением. Частота вращения снаряда изменялась в пределах $136 - 435 \text{ мин}^{-1}$; 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, песчанистых сланцев, песчаников, известняков и кварцитов (табл. IV.3). Ресурс алмазных коронок по различным горным породам определен на основе ведомостей отработки коронок. Зависимость между СКЗ звукового давления p и ресурсом коронки Q1A2-112 (рис. IV.7) представляет экспоненциальную функцию вида:

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

Таблица IV.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
Песчанистый сланец	0,00069	38
Песчаник	0,00152	17
Известняк	0,00175	20
Кварцит	0,0035	4

Установленная между звуковым давлением и ресурсом коронки зависимость позволяет прогнозировать ресурс коронки при бурении на основе акустических измерений в призабойной зоне.

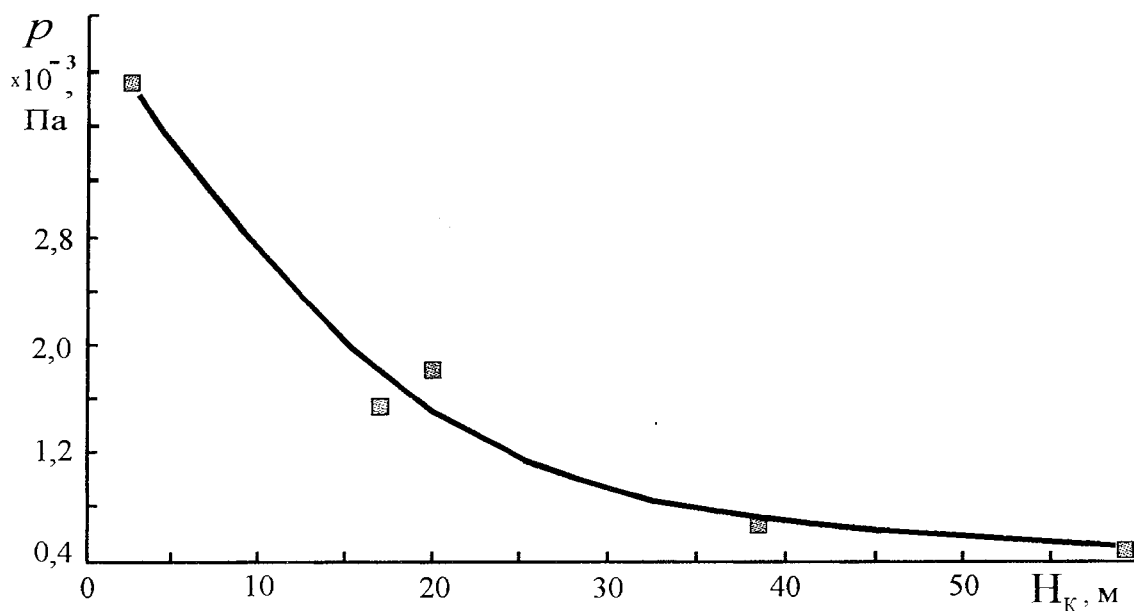


Рис. IV.7. Зависимость между СКЗ звукового давления p в призабойной зоне и ресурсом H_K алмазной коронки 01A4-112 при бурении на участке шахты Центральная - Новая (Донбасс).

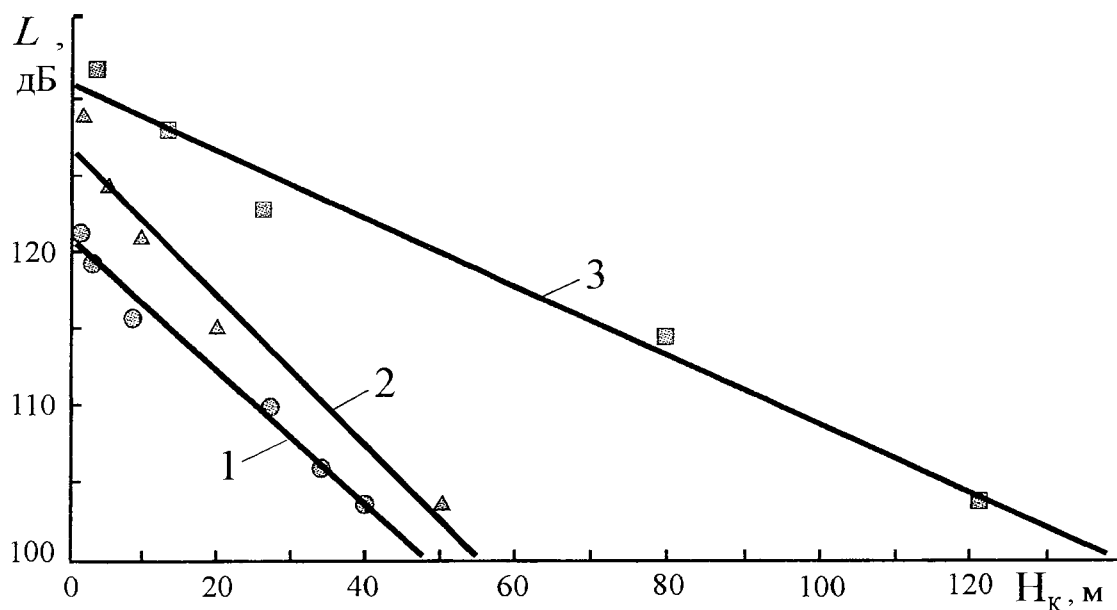


Рис. IV.8. Зависимости между уровнем звукового давления L в призабойной зоне и прогнозным ресурсом H_K алмазных коронок ИЖ (1), И6ДХ (2) и И4ДП (3) при бурении гранита в стендовых условиях

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 полулогарифмическом масштабе является линейной функцией вида: $L = b + k \cdot H_k$ (рис. IV.8). 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 звукового давления при котором ресурс коронки равен нулю. Коэффициент k , названный автором коэффициентом износостойкости алмазной коронки, характеризует интенсивность износа коронки и равен:

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

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 исследования сопротивляемости материалов переменным напряжениям производят лабораторные испытания, в результате которых строится кривая усталости [50, 138, 146]. По оси ординат на кривой усталости откладывается наибольшее напряжение цикла, при котором испытывался данный образец, по оси абсцисс – число циклов перемен напряжений, который образец выдержал до разрушения. Кривая усталости является базой для расчета предельных нагрузок, при которых может эксплуатироваться определенная деталь или конструкция. Для алмазной коронки, испытывающей при бурении циклические нагрузки, также 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 звукового давления. По оси ординат на кривой износостойкости 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. IV.8).

Для построения кривой износостойкости 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, набегающей и сбегаящей частях сектора. В профиле обмеряются точки, расположенные на пяти диаметрах. Для коронки диаметром 59 мм измерения рекомендуется 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:

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

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 износостойкости 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 износостойкости также можно определить прогнозный ресурс коронки на различных режимах, измеряя при бурении уровень СКЗ звукового давления. Использование кривой износостойкости за счет возможности прогноза ресурса коронки на различных режимах позволяет избегать длительных ресурсных испытаний.

Кривая износостойкости является одним из показателей коронки в методике МИ 41-13-31-01-94 “Инструмент алмазный породоразрушающий. Экспериментальная методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля”.

Выводы по главе IV

В результате исследования видов и причин износа алмазных коронок при бурении сделаны следующие основные выводы:

- Вид износа алмазной коронки связан с установившимся механизмом бурения и может диагностироваться на основе акустического спектра, измеренного в призабойной зоне, и коэффициента распределения энергии при разрушении.

- Условием равномерного износа коронки при бурении является нахождение температуры и динамических нагрузок на забое пределах допустимых значений. Температура торца коронки при бурении не должна превышать 600 °С, а в акустическом спектре должны отсутствовать признаки вибраций бурового снаряда. При равномерном износе импрегнированной коронки при бурении горной породы на постоянном режиме акустический спектр и коэффициент K_p не изменяются.

- Скол алмазов, образование канавок и фасок на торце коронки являются следствием аномально высоких динамических нагрузок, возникающих преимущественно при возбуждении вибраций бурового снаряда. Вибрационные режимы диагностируются по появлению в акустическом спектре максимумов амплитуды на частоте колебаний, распространению гармоник основной частоты в область высоких частот и резким увеличением мощности в спектре.

- Заполирование алмазов развивается в условиях низких температур торца коронки (200 -300 °С) и динамических нагрузок в результате специфической обработки (полировке) поверхности алмазов. Развитие заполирования алмазов при бу-

рении диагностируется по плавному уменьшению СКЗ звукового давления и средней частоты f_A акустического шума разрушения и увеличению коэффициента K_p .

- Прижог коронки возникает в результате увеличения температуры торца коронки выше критических значений (свыше 1000 - 1100 °С) и развивается в два этапа: предприжог и собственно прижог. Предприжог коронки диагностируется по увеличению звукового давления в диапазоне 7-20 кГц (в 2-3 раза) и характеризуется кратковременным повышением эффективности разрушения породы, за счет привлечения к разрушению тепла, которое ранее уносилось промывочной жидкостью, и резким увеличением интенсивности износа коронки (в десятки раз). Прижог коронки диагностируется по резкому уменьшению звукового давления акустического шума разрушения и коэффициента K_p (в 10-100 раз).

- Тепло, выделяющееся на забое, является резервом повышения эффективности разрушения горной породы при бурении. Разрешение противоречия между необходимостью повышать температуру на забое для увеличения механической скорости бурения и ограничивать ее, для обеспечения требуемого ресурса коронок, заложено в области синтеза новых материалов со специальными теплофизическими свойствами для армирования породоразрушающего инструмента. Новые материалы должны обладать упругостью и твердостью близкой к алмазу, но в то же время выдерживать без потери прочности температуры свыше 1200°С.

- Зависимость между среднеквадратичным значением звукового давления p , измеренным в призабойной зоне в диапазоне 7-20 кГц, и ресурсом N_k коронки и представляет экспоненциальную функцию вида: $p = a \cdot e^{-bN_k}$.

- Зависимость уровня L звукового давления (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па) от ресурса N_k коронки в полулогарифмическом масштабе является линейной функцией вида: $L = b + k \cdot N_k$. Коэффициенты b и k характеризуют износостойкость алмазной коронки, которая определяется конструктивными параметрами коронки и, прежде всего, качеством алмазов. Измеряя при бурении уровень звукового давления в призабойной зоне, можно прогнозировать ресурс коронки на различных режимах и в горных породах, предварительно проведя тарировочное бурение и установив коэффициент износостойкости k для конкретной коронки.

- Зависимость уровня L звукового давления от ресурса N_k коронки является *“кривой износостойкости”* коронки, характеризующей стойкость коронки к переменным напряжениям. Кривая износостойкости является базой для определения предельных нагрузок, при которых может эксплуатироваться алмазная коронка.

Глава V. ДИАГНОСТИКА ЗАБОЙНЫХ ПРОЦЕССОВ 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 [28, 156, 157, 177]. Теоретическое обоснование возникновения отдельных видов движения бурового снаряда содержится в работах В.Н.Алексеева и Н.Н.Михеева. Вибрации коронки при бурении непосредственно связаны с вибрациями бурового снаряда и, в значительной степени, определяют вид ее износа. Поэтому диагностика в процессе бурения характера вибраций коронки и, связанного с ним вида движения коронки, имеет важное практическое значение. В результате исследований, проведенных в МГРИ и ВИТРе при бурении оптического стекла с использованием скоростной киносъемки забоя, выделены несколько видов движения коронки: качение, равномерное вращение и крутильные автоколебания [5, 118].

Назовем устойчивое существование определенного вида движения коронки во времени - режимом работы коронки. С целью выработки диагностических признаков различных режимов работы коронки выполнен комплекс экспериментальных исследований. 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 [19]. Методика исследований, а также применяемые технические средства рассмотрены в главе III, поэтому ниже приведены только результаты работ. Различные режимы работы алмазной коронки создавались изменением осевой нагрузки и частоты вращения, а также использованием изношенных алмазных коронок. Возникновение режима контролировалось по изменению крутящего момента, реализуемой мощности и акустического спектра.

Колебания физических тел сопровождаются излучением в окружающее пространство акустических волн. По аналогии с физическими принципами выделения дефектов, используемыми при виброакустической диагностике машин и механизмов [49, 55], сформулируем следующие признаки выделения различных режимов алмазной коронки:

- Наличие максимума амплитуды в акустическом спектре показывает существование колебательного процесса на частоте расположения максимума. Величина максимума связана с амплитудой (мощностью) колебательного процесса.

- Распространение гармоник основной частоты максимума в область высоких частот и одновременное повышение мощности в спектре показывает на ударный характер взаимодействия коронки со стенками и забоем скважины.

Диагностические признаки основных режимов работы коронки (табл.V.1) сформированы в результате типизации спектров звукового давления, зафиксированных в призабойной зоне. Выделено 3 основных типа спектра, соответствующих режимам равномерного вращения, качения и крутильных автоколебаний (рис. V.1).

Таблица V.1

Диагностические признаки основных режимов работы алмазной коронки

Режим работы 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).

В режиме крутильных автоколебаний сигнал следует в виде пакетов с высокочастотным заполнением. Это свидетельствует, что коронка испытывает колебания двух видов: низкочастотные (с частотой следования пакетов) и высокочастотные (с частотой заполнения пакетов). Ранее при бурении фиксировались только

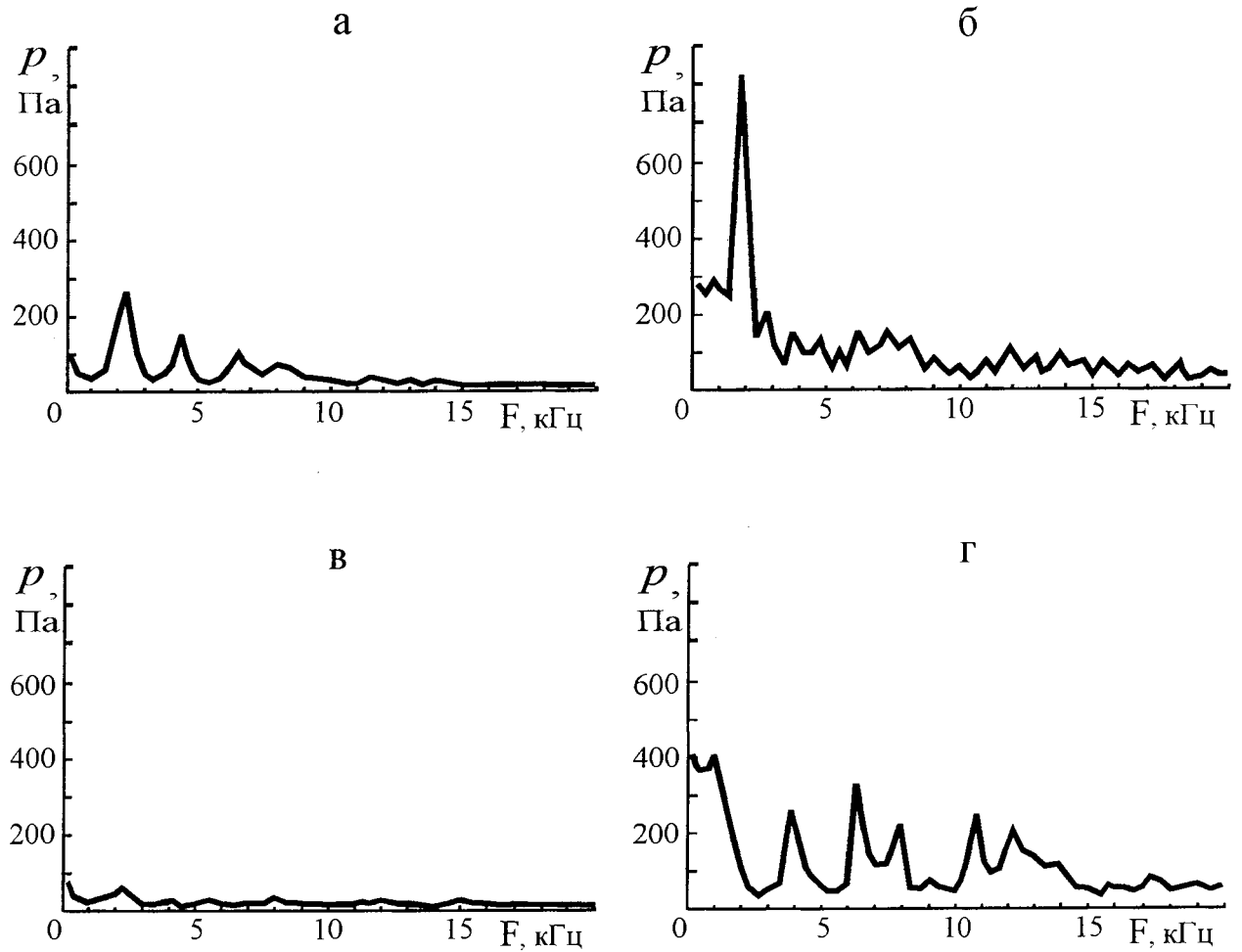


Рис. V.1. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении алмазной коронкой И4ДП-59 в режимах равномерного вращения (а и в), качения (б) и крутильных автоколебаний (г)

низкочастотные крутильные колебания коронки [118], что объясняется недостаточно широким (ограниченным первыми десятками герц) частотным диапазоном используемых измерительных средств. Частота f_{k1} низкочастотных крутильных колебаний определяется частотой вращения снаряда и находится в пределах 0 - 100 Гц. Сопоставление частоты колебаний коронки, определенной по спектру, с частотой колебаний крутящего момента, измеренной с помощью автоматизированной системы АСУ-ПБ, показало их полное совпадение. Частота высокочастотных (ВЧ) крутильных колебаний f_{k2} , определенная по спектру звукового давления, находится в диапазоне 2000 - 5000 Гц. Возбуждение высокочастотных крутильных автоколебаний коронки сопровождается распространением гармоник основной частоты в область высоких частот и резким увеличением мощности (в десятки раз) во всем диапазоне спектра. В стендовых условиях бурение в режиме ВЧ автоколебаний сопровождается хорошо слышимым свистом.

Предложим физическое объяснение механизма возникновения крутильных автоколебаний коронки. При бурении коронка вращается с установленной угловой скоростью ω . Между торцом коронки и забоем возникает сила сопротивления F_c и нижняя часть бурового снаряда закручивается в противоположную вращению сторону. Возникает момент торможения нижнего сечения снаряда. При определенном сочетании режимных параметров между коронкой и забоем начинается проскальзывание. Если сила сопротивления имеет падающую характеристику, т.е. с увеличением угловой скорости вращения ω сила сопротивления падает, то при проскальзывании F_c уменьшится и коронка начнет раскручиваться в направлении вращения к исходному состоянию. При этом угловая скорость коронки увеличится, а сила сопротивления еще уменьшится и коронка, стремительно раскручиваясь по направлению вращения, проскочит через исходное состояние и начнет закручиваться по направлению вращения. В крайнем положении, когда угловая скорость снизится до угловой скорости вращения, коронка снова начнет закручиваться в обратном направлении. В другом крайнем положении коронка некоторое время будет находиться неподвижно, т.е. угловая скорость вращения нижнего сечения снаряда будет равна нулю. Далее последует новый срыв, и установятся низкочастотные крутильные автоколебания коронки. Возбуждение высокочастотных крутильных автоколебаний происходит во время раскрутки коронки. Механизм их возникновения аналогичен механизму возбуждения низкочастотных колебаний и также связан с падающей характеристикой силы трения между торцом коронки и забоем.

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.
- 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 энергоемкости 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 технических показателей бурения. На основе изменения акустического спектра (рис.V.1) и диагностических признаков (табл. V.1.) составлена диаграмма существования режимов работы коронки И4ДП-59 (рис.V.2). При осевой нагрузке до 1250 даН и частоте вращения до 1000 мин⁻¹ существует режим равномерного вращения (рис. V.2). 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.

Механическая скорость бурения при увеличении осевой нагрузки и частоты вращения возрастает практически линейно. Поэтому поверхность $v_{\text{мех}} = f(P, n)$ представляет собой плоскость, расположенную под некоторым углом к плоскости $P - n$ (рис.V.3а). Мощность N_3 , реализуемая на забое, возрастает линейно с ростом частоты вращения только до осевой нагрузки в 1000 даН, при дальнейшем повышении осевой нагрузки зависимость $N_3 = f(n)$ приобретает признаки степенной функции (рис.V. 3б). Удельная энергоемкость разрушения W_v возрастает с ростом осевой нагрузки при всех частотах вращения. С ростом частоты вращения в

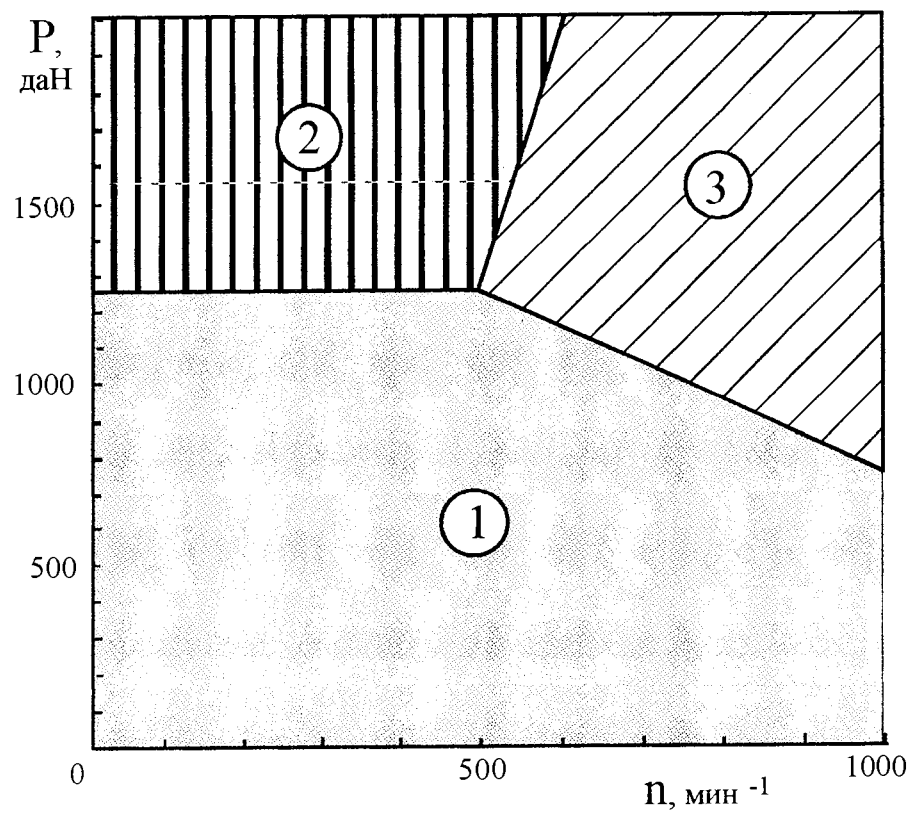


Рис. V.2. Диаграмма режимов работы алмазной коронки И4ДП-59 при бурении биотитового гранита
1 - равномерное вращение; 2 - крутильные автоколебания;
3 - качение.

диапазоне осевых нагрузок 0 -1000 даН удельная энергоемкость разрушения уменьшается. При нагрузке свыше 1000 даН зависимость $W_v = f(n)$ становится сложной: сначала с ростом n энергоемкость разрушения несколько уменьшается, а при дальнейшем повышении частоты вращения W_v резко возрастает (рис.V.3в). Звуковое давление в диапазоне 0 - 20 кГц при нагрузках до 900 даН с ростом частоты вращения возрастает по зависимости близкой линейной. При более высоких осевых нагрузках зависимость $p = f(n)$ становится нелинейной и приближается к обратной параболе (рис.V.3г).

Рассматривая СКЗ звукового давления в призабойной зоне как показатель, отражающий колебательную энергию коронки, становится очевидно, что различное сочетание режимных параметров приводит к изменению виброактивности коронки. При этом режимы, характеризующиеся повышенной энергоемкостью, имеют и повышенные значения звукового давления в призабойной зоне (рис V.3в и г).

Линейный характер зависимости механической скорости бурения от частоты вращения и осевой нагрузки (рис. V.3а) 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 характеризуются высокой забойной мощностью, энергоемкостью и излучаемой акустической энергией, связанной, в основном, с вибрациями коронки (рис. V.3б, в, г). В режиме равномерного вращения дополнительные затраты энергии на колебания снаряда минимальны и этот режим характеризуются наименьшей энергоемкостью, а высокочастотный диапазон спектра занимает только акустический шум разрушения. В режиме равномерного вращения с ростом n происходит стабилизация бурового снаряда и снижение удельной энергоемкости бурения (рис V.3в). 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 коронки по показаниям наземных приборов в настоящее время крайне сложны. Поэтому акустико-спектральная диагностика является перспективным средством точного определения режима работы алмазной коронки с целью предотвращения бурения на неэффективных режимах.

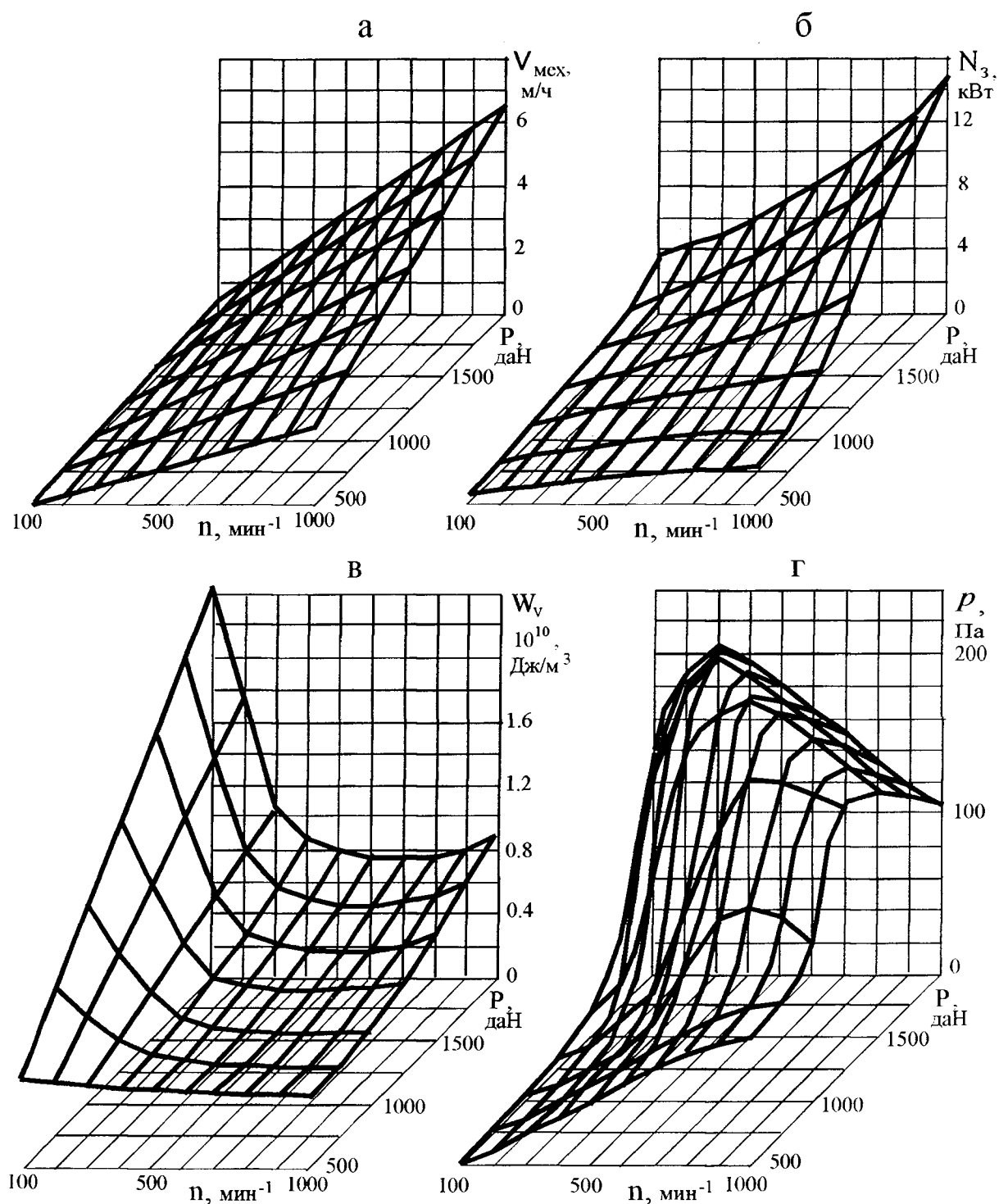


Рис. V.3. Общий вид функции механической скорости бурения $V_{\text{мех}}$ (а), забойной мощности N_3 (б), удельной энергоемкости W_v (в) и СКЗ звукового давления p в призабойной зоне (г) от осевой нагрузки P и частоты вращения n при бурении алмазной коронкой И4ДП-59 биотитового гранита.

§ 2. Механизм бурения, реализуемый алмазной коронкой

С целью выяснения влияния типа и отдельных конструктивных параметров коронки на механизм бурения выполнен комплекс экспериментальных стендовых исследований на режимах, не сопровождающихся вибрациями снаряда. 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 бурения, 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. V.2, а результаты бурения - в табл. V.3. 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 при осевой нагрузке 1000 даН, частоте вращения снаряда 400 мин⁻¹ и расходе промывочной жидкости 12 дм³/мин. 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

Таблица V.2

Конструктивные параметры алмазных коронок

Тип корон- ки	Качество алмазов		Размер алмазов, мкм		Средний диаметр объем алма- зов, мкм	Макси- мальный выступ алмазов, мкм	Число алмазов на 1 см ² торца, штук
	объем- ных	подрез- ных	объемных	подрезных			
БС	АС-80	Твесал	250/200	-	230	20	139
ИС	АС-125	АРС-3	250/200	1600/1250	230	20	134
ИЖ	ХХХУгр.	ХХХ1У гр."б"	630/500	1600/1250	570	50	87
И4ДП	А-80	ХХХ1У гр."б"	800/630	1600/1250	700	80	34
И6ДХ	ХХХУгр.	ХХХ1У гр."б"	630/500	1600/1250	570	90	38
02ИЗ	ХУгр."а"	ХУ гр."а"	800/700	1600/1500	750	160	21
И4ГС	АСПК	ХХХ1У	800/630	1600/1250	700	170	10
А4ДП	ХХХУ1 гр."б"	ХХХУ1 гр."б"	2000/1600	2000/1600	1700	250	11

Таблица V.3

Результаты бурения биотитового гранита коронками БС, ИС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП диаметром 59 мм

Тип корон- ки	Показатели бурения			Характеристики шлама		Параметры механизма бурения			
	$V_{\text{мех}}$ $\times 10^{-7}$ м ³ /с	N_z , кВт	W_y $\times 10^9$, Дж/м ³	$d_{\text{ш}}$, мкм	F_s на 1 м ³ объема, $\times 10^4$, м ²	p , Па	f_A , кГц	W_{AV} $\times 10^7$, Па·с м ³	K_P $\times 10^{-3}$, 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
02ИЗ	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

см по глубине скважины. По окончании бурения с поверхности блока горной породы отбирали пробу шлама объемом 3 см^3 . 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.V.4).

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/м^3 ; 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. Пробу 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 - 200М. Очистка сит производилась с помощью пылесоса. Содержание С фракции рассчитывалось, как отношение массы фракции m к массе M навески шлама, взятой для анализа:

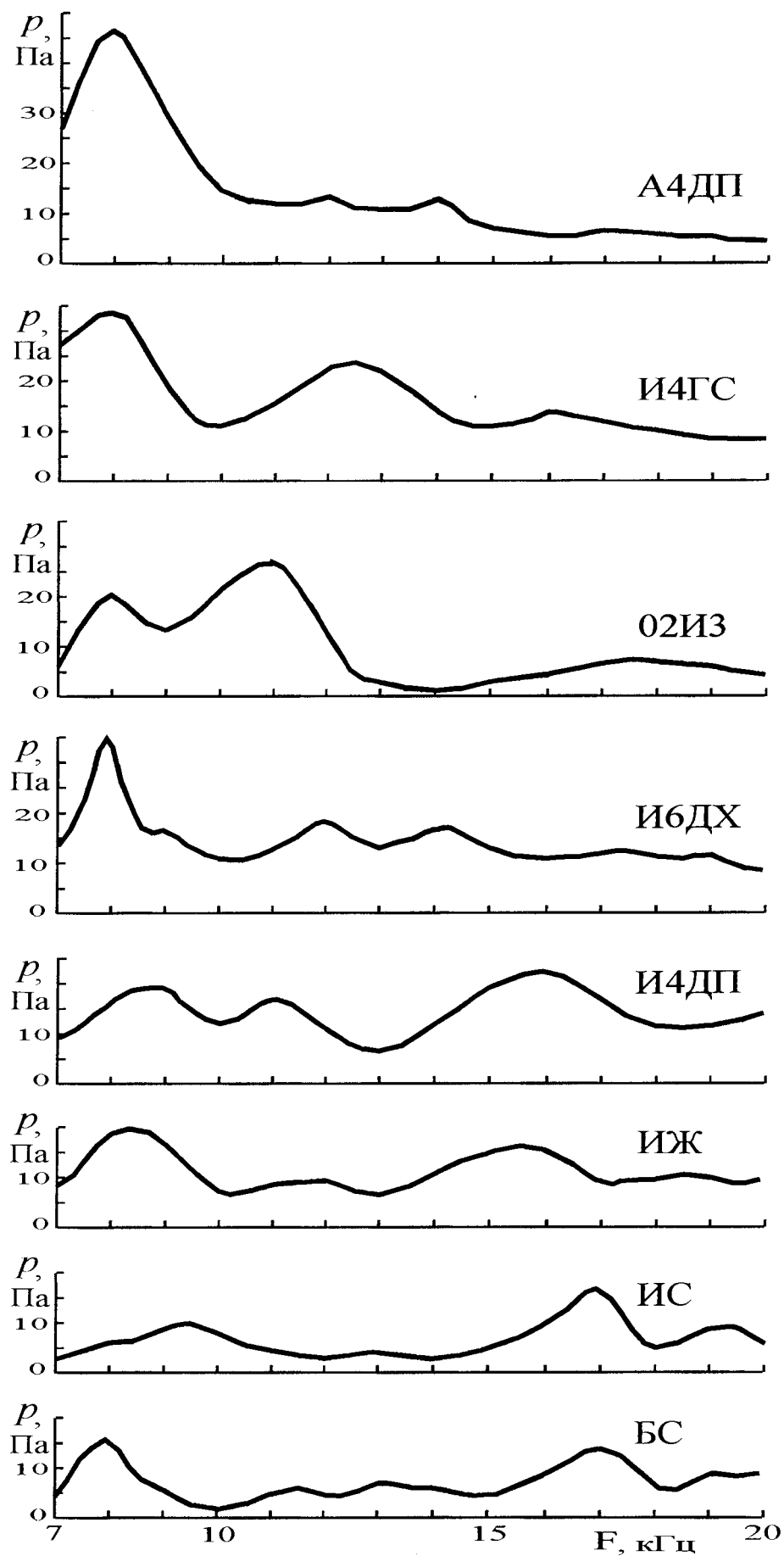


Рис. V.4. Спектры звукового давления при бурении биотитового гранита коронками типа БС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП

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

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 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_q определялся по формуле.

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

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

$$m_q = \rho \cdot V_q \quad \text{кг}.$$

Число частиц N_q в каждой фракции рассчитывалось путем деления массы фракции m на массу средней частицы m_q .

$$N_q = \frac{m}{m_q} \quad \text{штук}.$$

Площадь F_ϕ вновь образованной поверхности в каждой фракции определялась перемножением площади поверхности средней частицы F_q на число частиц N_q в фракции.

$$F_\phi = F_q \cdot N_q \quad \text{м}^2.$$

Суммарная площадь вновь образованной поверхности F_s рассчитывалась суммированием площадей вновь образованной поверхности в каждой фракции.

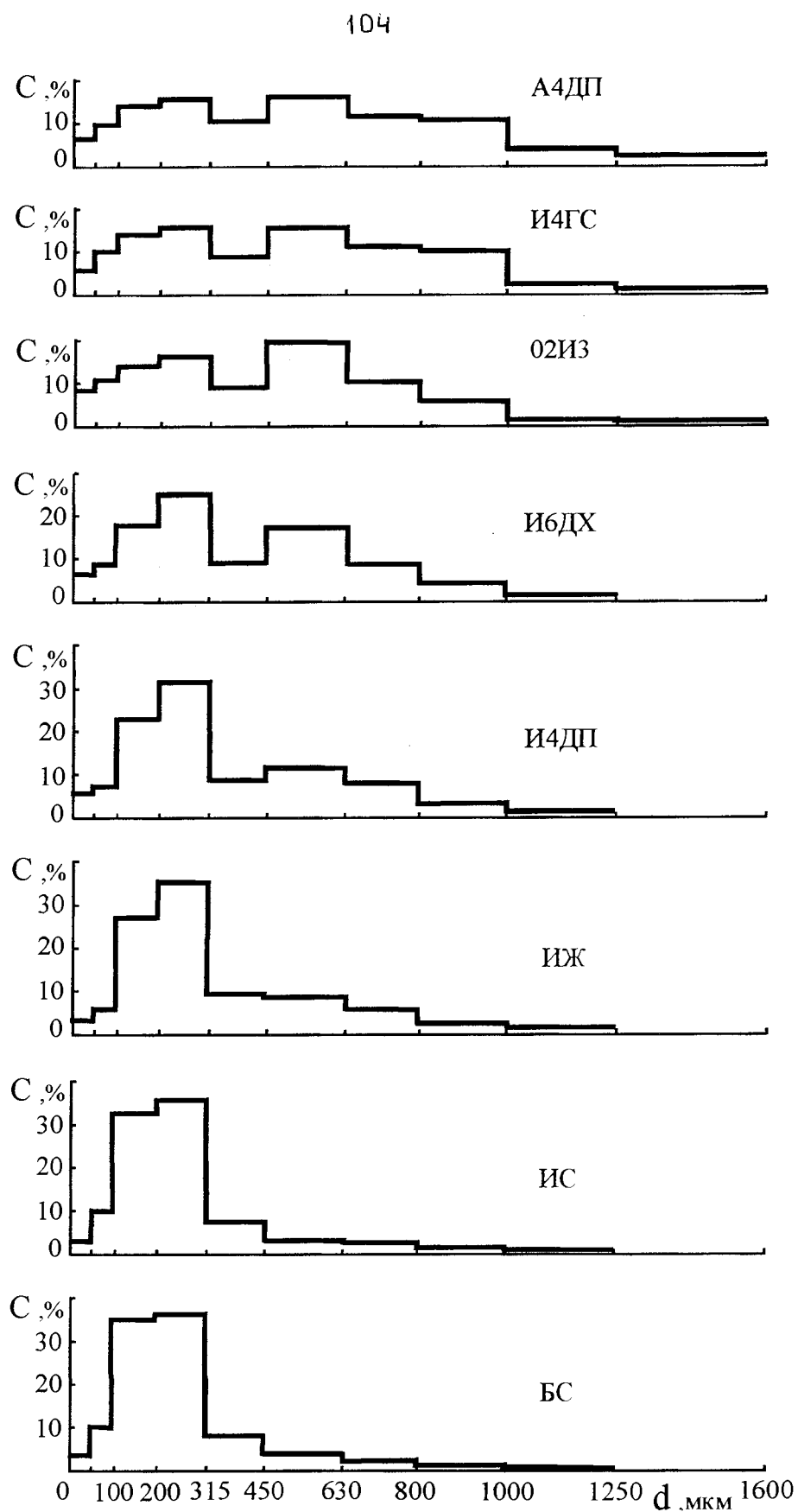


Рис. V.5. Гранулометрический состав проб шлама, отобранных при бурении коронками БС, ИС, ИЖ, И4ДП, И6ДХ, 02ИЗ, И4ГС и А4ДП биотитового гранита

Исследования подтвердили известный характер зависимости между площадью вновь образованной поверхности F_s и удельной энергоемкостью W_v - рост удельной энергоемкости разрушения сопровождается увеличением площади вновь образованной поверхности [73]. Зависимость $F_s=f(W_v)$ аппроксимирована степенной функцией с коэффициентом корреляции $r = 0,98$:

$$F_s = 3.61 \cdot 10^2 W_v^{0,223}.$$

Предложим физическое объяснение зависимости $F_s=f(W_v)$ 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. Изменяется характер распределения энергии при разрушении: излучаемая акустическая энергия увеличивается, а энергия, расходуемая на трение и переходящая в тепло, – уменьшается. Механизм бурения становится более эффективным. Оптимизация распределения энергии при разрушении сопровождается увеличением механической скорости бурения, уменьшением забойной мощности и удельной энергоемкости (табл. V.3).

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 [123]. 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. V.5) путем

нахождения условного значения размера ячейки сита, слева и справа от которого располагались по 50% веса пробы.

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

$$\begin{aligned} f_A &= 20,46 - 0,0284 d_с & r &= -0,89; \\ p &= -3,15 + 0,0604 d_с & r &= 0,86. \end{aligned}$$

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 бурения, 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 и параметры матрицы. Бурение биотитового гранита производили двумя коронками ИБКС-59 при осевой нагрузке 750 даН, частоте вращения 700 мин⁻¹ и расходе промывочной жидкости 20 дм³/мин. Геометрические размеры, значения торцевого и радиального биения, 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 ИБКС, имеют характерный вид (рис. V.6). 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 незначительны и составляют: по СКЗ звукового давления - 9 %, по средней частоте f_A - 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.

Сравнительная оценка диапазона изменения средней частоты f_A при бурении коронками одного типа в различных горных породах показала, что характер распределения энергии в спектре сохраняется в определенных пределах. Это

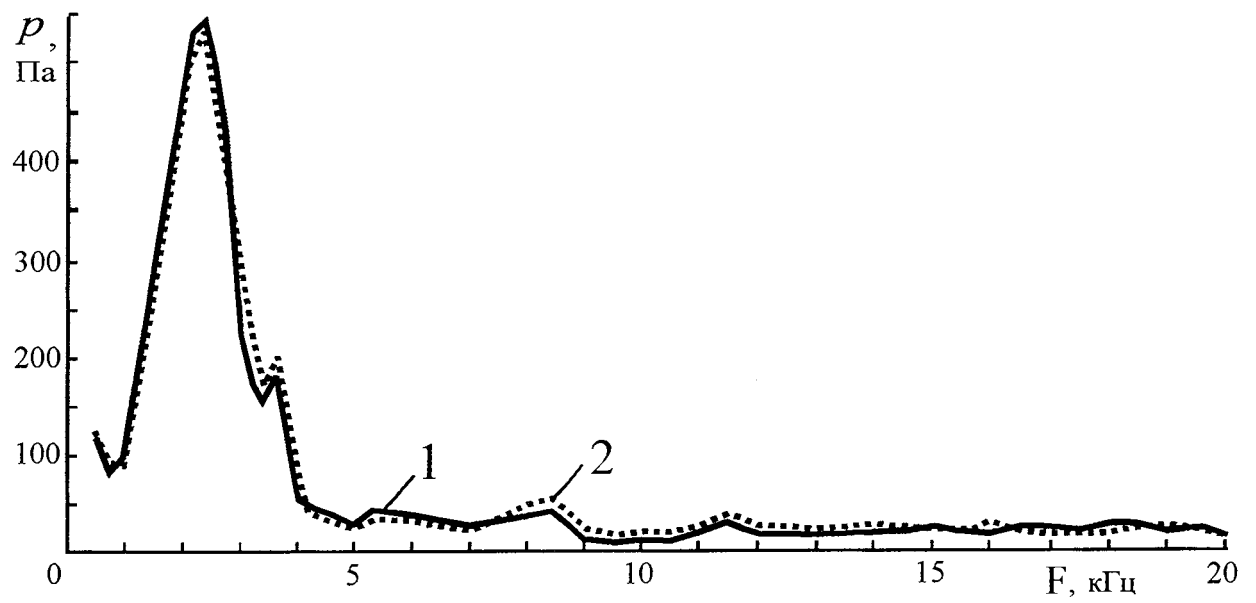


Рис. V.6. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении биотитового гранита алмазными коронками типа И6КС №2 (1) и №251 (2)

позволило классифицировать механизмы бурения, реализуемые алмазными коронками, по параметрам акустического шума разрушения. По величине частоты f_A , зафиксированной при бурении гранита Каменогорского месторождения, механизмы разрушения разделены на три типа: низкочастотный (НЧ) с f_A меньше 10,5 кГц, среднечастотный (СЧ) с f_A в пределах 10 -12 кГц и высокочастотный (ВЧ) с f_A более 12 кГц. Физически это означает, что с ростом средней частоты f_A коронка реализует механизм с более высокой частотой взаимодействия алмазов с забоем.

Механизм бурения также зависит от степени приработки алмазной коронки. Неприработанная коронка реализует механизм бурения отличный от механизма разрушения приработанной коронки. Рассмотрим результаты бурения гранита семью коронками типа 02ИЗ-59, армированными объемными алмазами XV гр"а" 2Т1 размером 800/700 мкм и подрезными алмазами XV гр"а" 4Т4 размером 1600/1500 мкм (табл.V.4). Масса алмазов в объемном слое составляла у всех коронок 8,8 кар. Бурение производили на постоянном режиме при $P=1000$ даН, $n=400$ мин⁻¹ и $Q=20$ дм³/мин.

Таблица V.4

Конструктивные параметры алмазных коронок 02ИЗ-59 и результаты бурения биотитового гранита

Номер коронки	Число алмазов на 1см ² торца, штук	Максимальный выступ алмазов, мкм	$V_{\text{мех}}$, м/ч	N_3 , кВт	W_V x 10 ⁹ , Дж/м ³	Параметры акустического спектра		W_{AV} x 10 ⁶ , Па с/м ³	K_P x 10 ⁻⁴ , Па/Вт
						ρ , Па	f_A , кГц		
17891	38	160	4,1	2,0	1,3	1,4	13,6	0,91	7,0
17897	20	90	3,0	2,1	1,9	1,3	12,7	1,16	6,2
17896	21	80	2,8	2,1	2,0	1,2	11,5	1,14	5,7
17898	19	70	2,8	2,3	2,2	1,1	11,2	1,04	4,8
17892	18	70	2,6	2,3	2,4	0,9	11,3	0,93	3,9
17895	17	60	2,6	2,5	2,6	1,0	10,5	1,03	4,0
17890	15	60	2,4	2,5	2,8	0,9	10,4	1,00	3,6

По мере приработки на рабочей поверхности коронки зафиксировано увеличение числа алмазов и их выступа из тела матрицы, что сопровождалось увели-

чением СКЗ звукового давления и средней частоты f_d акустического шума разрушения, а также ростом коэффициента K_p (табл.V.4). Спектры звукового давления в призабойной зоне претерпевают закономерные изменения (рис V.7). Начиная с коронки №17898 в акустическом спектре начинают проявляться максимумы амплитуды на частотах 8-8,3, 10,4-10,7 и 18,4-19,2 кГц. Акустический спектр полностью приработанной коронки №17891 имеет максимумы амплитуды на частотах 8-8,3, 10,4-10,7, 14,2-14,7 и 18,4-19,2 кГц. Удельная акустическая энергия на всех стадиях отработки коронок примерно одинакова, что указывает на большую зависимость W_{AV} от свойств горной породы, чем от типа коронки.

Изменение механизма бурения по мере приработки коронки можно объяснить следующим образом. В начальный период на рабочей поверхности коронки находится небольшое число алмазов с незначительным выступом из тела матрицы и матрица коронки имеет значительную площадь контакта с забоем. За счет этого распределение энергии при разрушении характеризуется повышенными затратами на трение и тепловыделение и низкими на динамическое взаимодействие алмазов с забоем. На это указывает низкий коэффициент распределения энергии при разрушении. По мере приработки коронка постепенно выходит на механизм разрушения горной породы, который характерен для полностью приработанной коронки. При обнажении новых алмазов характер распределения энергии на забое изменяется. Все больше энергии тратится на динамическое взаимодействие алмазов с забоем и разрушение горной породы, а доля энергии, расходуемой на трение матрицы о забой уменьшается. Перераспределение энергии прекращается только по окончании приработки коронки.

Характерные особенности бурения, 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. Экспериментальная методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля".

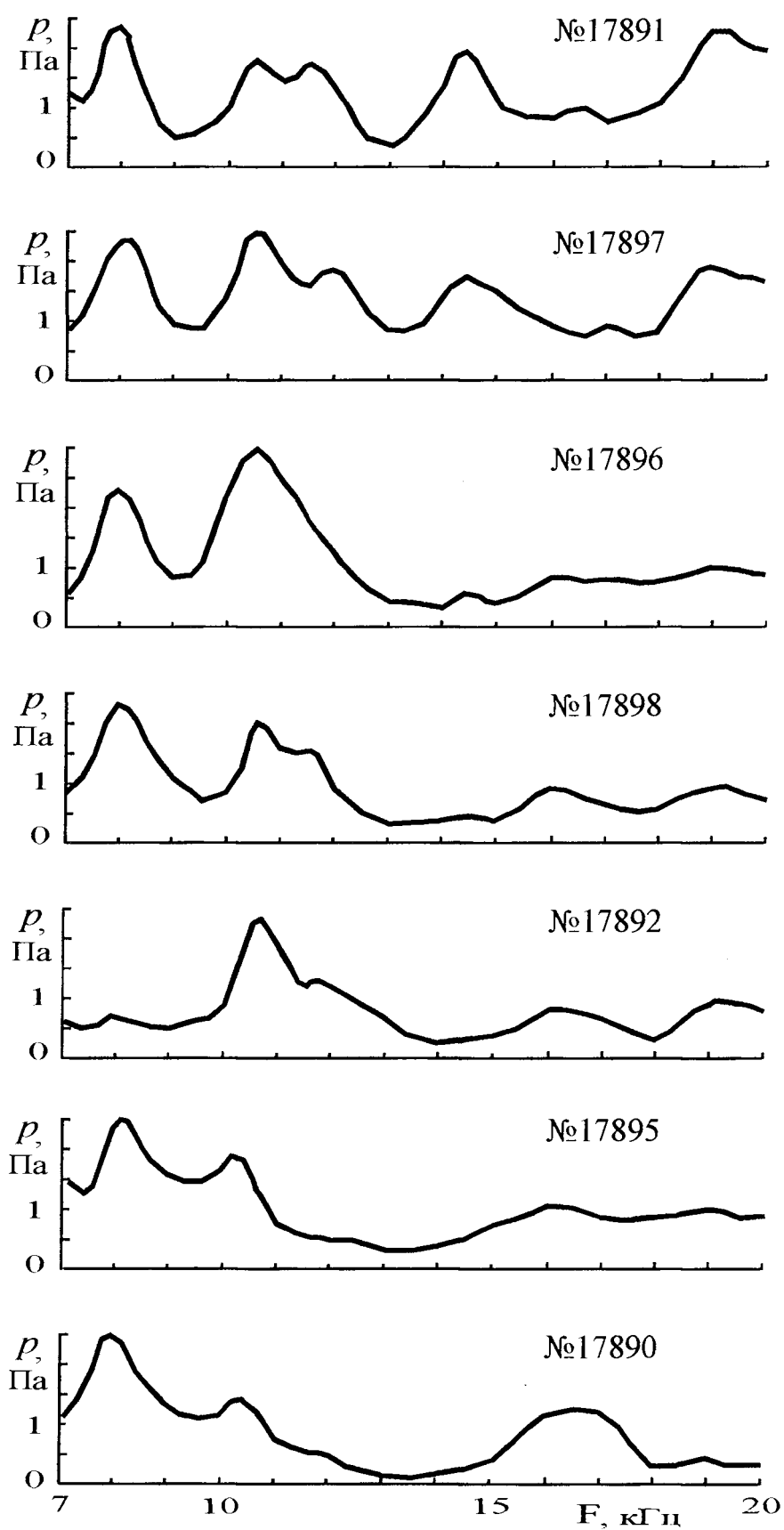


Рис. V.7. Спектры звукового давления в призабойной зоне при бурении гранита импрегнированными коронками 02ИЗ-59 с номерами 17891, 17897, 17896, 17898, 17892, 17895 и 17890

Система АИАС разработана исходя из следующих допущений:

- механизм бурения, 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 стандов и предназначена для решения следующих задач:

- выявление конструктивных дефектов коронки, обусловленных качеством и технологией изготовления;
- оценка механизма бурения, 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. "Опорный" спектр регистрируется при бурении базовой, качественно изготовленной, коронкой. Диагностические признаки наличия конструктивных дефектов (табл. V.5) 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 бурения, 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_A и низкое p), рекомендуется применять в более прочных породах, чем инструмент, при работе которого в спектре фиксируются низкая частота f_A и высокое звуковое давление.

Таблица V.5

Основные диагностические признаки дефектов алмазной коронки

Наименование дефекта	Причины возникновения	Основные диагностические признаки
Биения 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 IV. 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 приниматься 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.

$$f_A \text{ ----> min}$$

$$P \text{ ----> max}$$

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. Экспериментальная методика ускоренных стендовых испытаний на основе спектрального анализа акустического поля”. В 1994 г. система АИАС-1 и методика прошли испытания, аттестованы и ис-

пользуются 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

Исследования геологического разреза при бурении производственных скважин проводили в период 1983 – 91 г. г. на месторождениях Карело-Кольского региона (Енское, Риколатва, Неблогора, Лопатовая губа и Малиновая Варакка), Хибин (Коашва, Кальок и Олений Ручей) и Донбасса (участок шахты Центральная-Новая). В работах принимали участие Б.Б.Шатров, А.Г.Архипов, О.С.Андреев, С.А.Авдеев, Н.П.Рудакова и др. Основные результаты исследований освещены в серии работ [16, 17, 150, 151, 153].

Анализ нескольких тысяч спектров звукового давления, зафиксированных в призабойной зоне бурящихся скважин, показал, что различным горным породам присущи свои индивидуальные частотные спектры, наиболее отличающиеся в диапазоне частот от 5-7 до 20 кГц. Спектры, как правило, имеют один - два четко выраженных максимума на частотах, являющихся постоянным для данной породы и названными “характеристическими”. 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.

Спектры звукового давления, зафиксированные в призабойной зоне, при бурении горных пород щелочного комплекса на месторождении Коашва (Хибины), представлены на рис. IV.8. Бурение производили однослойными алмазными коронками 01А4 диаметром 76 мм на постоянном режиме $P=500$ даН, $n=407$ мин⁻¹, $Q=20$ дм³/мин. Ювиты имеют максимум на частоте 11,0 – 11,7 кГц, мельтейгиты – 10,5 кГц, йолиты – 13,5 кГц и уртиты - 14,0 кГц. Участки смены “характеристической” частоты хорошо согласуются с контактами этих пород, установленными по

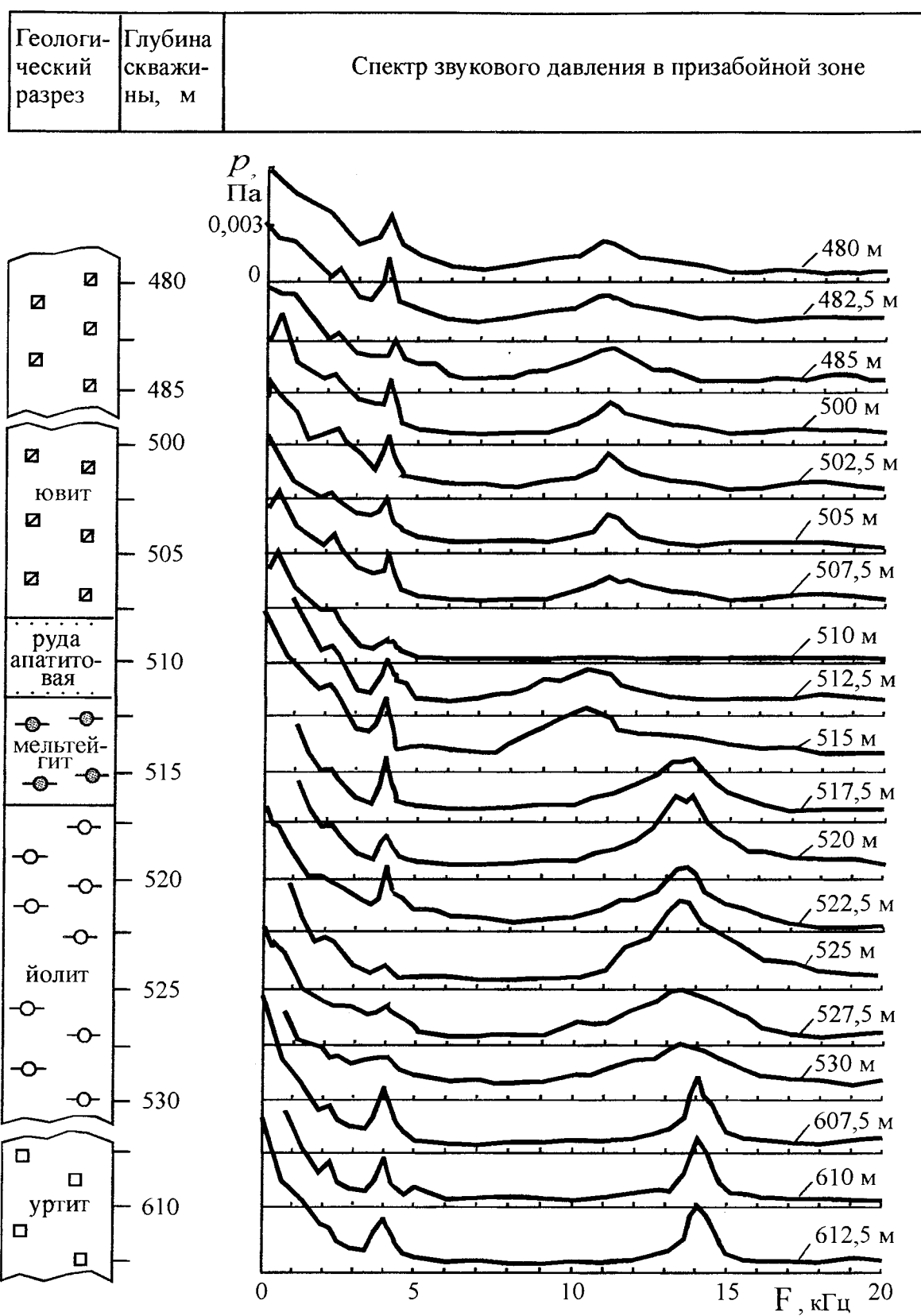


Рис. V.8. Спектры звукового давления, зафиксированные на расстоянии 40 м от забоя при бурении алмазными коронками 01А4 скважины №1584 на месторождении Коашва

документации керна.

Исследования механизма бурения горных пород осадочного комплекса проводили в Донбассе на участке шахты Центральная Новая. Горные породы на участке представлены глинистыми, песчано-глинистыми и песчанистыми сланцами, песчаниками, известняками, кварцитами и углями. При бурении использовались станок ЗИФ-650М, колонна бурильных труб диаметром 50 мм и алмазные коронки типа 01А3 и 01А4. Диаметр бурения – 76 - 112 мм. Частота вращения изменялась в пределах 136 - 435 мин⁻¹, осевая нагрузка 200 - 1000 даН. Расстояние между бурящейся (№4788) и наблюдательной (№4790) скважинами равнялось 6 м. В верхней части разреза, где залегали выветрелые горные породы и использовались низкие частота вращения и осевая нагрузка, акустическое поле не фиксировалось. После проходки выветрелых горных пород СКЗ и диапазон спектра звукового давления в призабойной зоне увеличивались в последовательности: глинистый сланец - песчанистый сланец - песчаник – известняк – кварцит (табл. V.6). Относительно низкие значения звукового давления, по-видимому, связаны с высоким затуханием акустических колебаний при распространении в осадочных горных породах.

Таблица V.6

СКЗ и диапазон спектра звукового давления в призабойной зоне при бурении на участке шахты Центральная – Новая (Донбасс)

Горная порода	СКЗ звукового давления в призабойной зоне, Па	Диапазон спектра, кГц
Глинистый сланец	0,00041	0 - 3
Песчанистый сланец	0,00069	0 - 5
Песчаник	0,00152	0 - 8
Известняк	0,00175	0 - 9
Кварцит	0,0035	0 - 17

Анализ акустических спектров позволяет более полно характеризовать геологические особенности разреза по сравнению с разрезом, построенным только на основании визуальной документации керна. По изменению акустического спектра оказалось возможным выделять зоны трещиноватости и околожильных

изменений, рудные зоны и интервалы плавного изменения в горной породе содержания одного из пороодообразующих минералов.

Для исследования зависимостей между физико-механическими свойствами и параметрами механизма бурения отбирали спектры звукового давления, зафиксированные на одинаковом расстоянии от забоя, и систематизировали данные о свойствах разбуриваемых пород с интервалов проведения измерений. Использование удельной акустической энергии W_{AV} в качестве параметра механизма разрушения горной породы объясняется необходимостью учесть рост мощности акустического сигнала при увеличении механической скорости бурения.

На месторождении Кальйок (Хибины) и участке шахты Центральная-Новая (Донбасс) бурение производили однослойными алмазными коронками типа 01А4 диаметром 76 мм при сопоставимых значениях осевой нагрузки и частоты вращения. Установлена высокая корреляция между удельной акустической энергией W_{AV} , средней частотой f_A и пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и скоростью распространения продольных упругих волн c_p (табл. V.7 и 8). Коэффициент корреляции положителен и колеблется в пределах 0,85 - 0,95.

Не установлено корреляционной зависимости между W_{AV} и f_A с плотностью σ горных пород. Плотность ряда горных пород осадочного комплекса, сравнима или превышает плотность кристаллических горных пород, но при бурении осадочных горных пород в призабойной зоне фиксируется низкое звуковое давление, а диапазон спектра ограничен 9 кГц (табл. V. 6 и 7).

В стендовых условиях разбуривали блоки кристаллических горных пород, осадочные горные породы и искусственные материалы, изготовленные из крошки горных пород и вяжущего материала на цементной основе. При бурении одновременно измеряли звуковое давление в призабойной зоне и реализуемую мощность, что позволило рассчитать коэффициент K_p распределения энергии при разрушении. Разбуривание более пятидесяти горных пород показало, что при бурении каждой горной породы устанавливается определенное соотношение между p и N_z (рис. V.9) и механизм разрушения горной породы характеризуется индивидуальным коэффициентом распределения энергии (табл. V.8). Коэффициент K_p изменяется в широких пределах и может являться дополнительным диагностическим признаком при определении смены геологического разреза. Минимальные значения коэффициента K_p зафиксированы у глины (табл. V.7). При бурении глинистых пород практически вся энергия, подведенная к забою, расходуется на пластические деформации и трение и не переходит в акустические волны. У кристаллических пород

Таблица V.7

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры механизма бурения на расстоянии 6 м от забоя при бурении коронкой 01А4 на месторождении Кальюк (Хибины) и участке шахты Центральная-Новая (Донбасс)

Горная порода	Свойства горных пород			Параметры механизма бурения		
	σ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	C_p , $\times 10^3$, м/с	ρ , $\times 10^{-3}$, Па	f_A , кГц	$W_{AV} \times 10^2$, Па с/м ³
Глинистый сланец	2870	19	2,2	0,41	7,1	2,35
Песчанистый сланец	2810	56	2,8	0,69	8,0	3,97
Песчаник	2750	83	3,9	1,52	8,4	8,73
Известняк	2760	120	4,4	1,75	8,7	10,06
Ловчоррит	2810	195	6,4	2,10	9,3	12,07
Кварцит	2790	215	5,8	3,50	13,2	20,11

Таблица V.8

Физико-механические свойства горных пород и информативные параметры механизма бурения на расстоянии 0,3 м от забоя при бурении коронкой И4ДП-59 в стендовых условиях

Горная порода	Свойства горных пород		Показатели бурения			Параметры механизма бурения			
	$\sigma_{сж}$, МПа	C_p , $\times 10^3$, м/с	$v_{мех}$, м/ч	N_3 , кВт	W_V , $\times 10^9$, Дж/м ³	ρ , Па	f_A , кГц	W_{AV} , $\times 10^6$, Па с/м ³	K_P , $\times 10^{-2}$, Па/Вт
Глина	12	1,90	25,6	0,5	0,45	0,1	7,1	0,01	0,02
Бетон	35	3,70	12,1	1,0	0,22	6,6	8,0	1,62	0,66
Мрамор	75	4,80	5,3	2,5	1,27	7,6	8,8	3,82	0,30
Гранодиорит	139	4,99	3,6	3,7	2,77	12,7	11,4	9,41	0,34
Гранит	110	4,69	2,1	2,5	3,21	13,9	13,3	17,64	0,56
Гранито-гнейс	136	5,65	1,8	2,5	3,75	24,0	11,6	35,55	0,96
Железистый кварцит	361	6,00	1,8	3,5	5,25	54,8	15,2	104,38	1,57

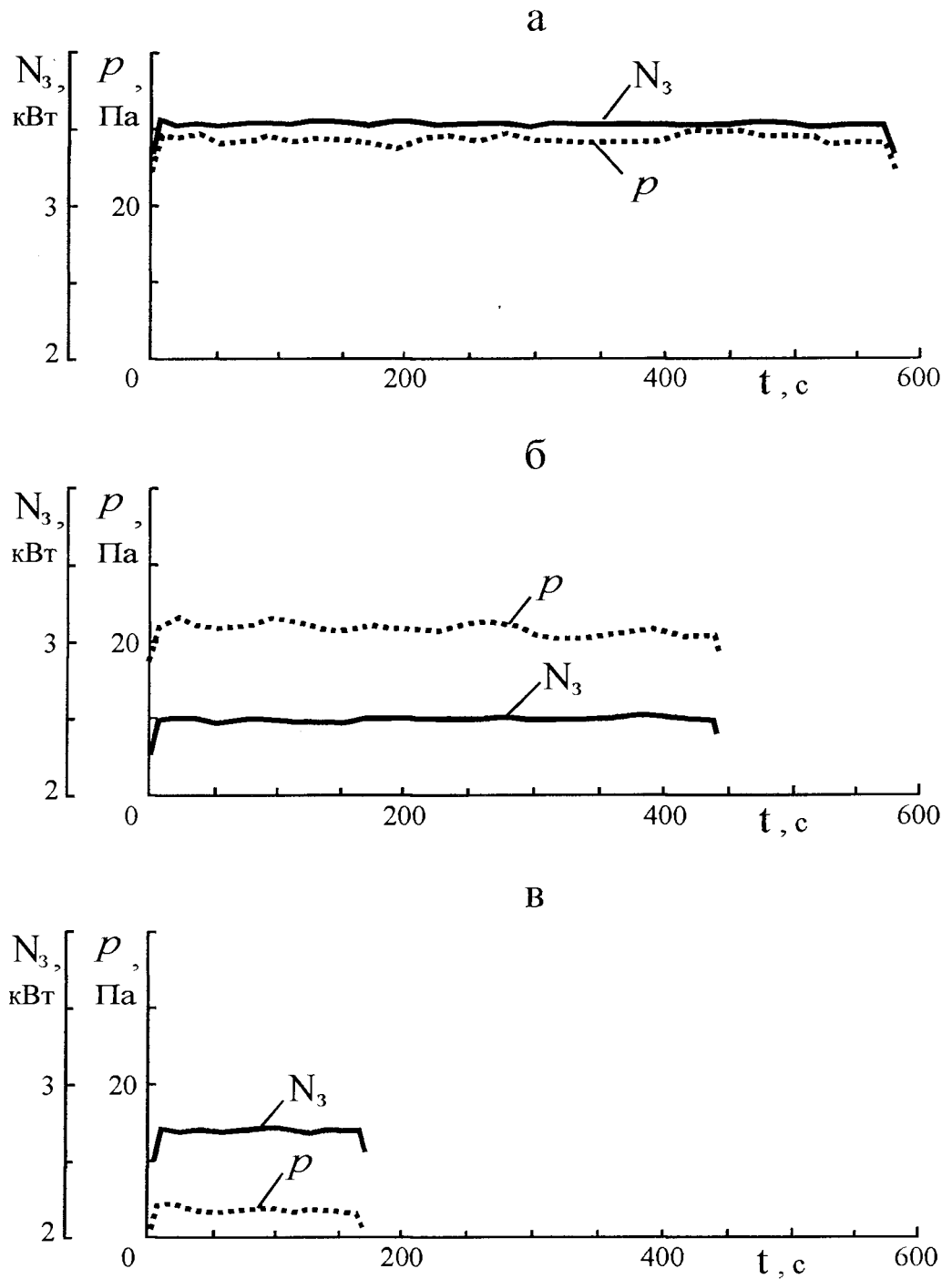


Рис. V.9. Зависимости СКЗ звукового давления p в призабойной зоне и забойной мощности N_3 от времени t бурения коронкой И4ДП-59 скважины глубиной 0,3 м в гематитовом кварците (а), гранито-гнейсе (б) и мраморе (в) при $P=1000$ даН; $n = 400$ мин⁻¹ и $Q=20$ дм³/мин

коэффициент K_p колеблется в достаточно широких пределах, что отражает влияние свойств горной породы на распределение энергии при разрушении. При возрастании у горной породы предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и скорости распространения продольных упругих волн v_p при бурении увеличивается удельная акустическая энергия W_{AV} и частота f_A , а также уменьшается механическая скорость и увеличивается удельная энергоемкость бурения (табл.V.8).

Результаты производственных и стендовых исследований позволили установить, что диагностическими признаками увеличения прочности и упругости разбуриваемой горной породы является увеличение удельной акустической энергии W_{AV} и расширение акустического спектра в сторону высоких частот.

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

Забойная акустическая аппаратура 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 (рис. V.10). 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 пульту (приемнику). Передача информации основана на явлении распространения электромагнитных волн вдоль колонны бурильных 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 и усиливает электрические сигналы, возникающие между верхней частью колонны и заземлителем; демодулирует и декодирует информацию и выдает ее на цифровое табло.

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

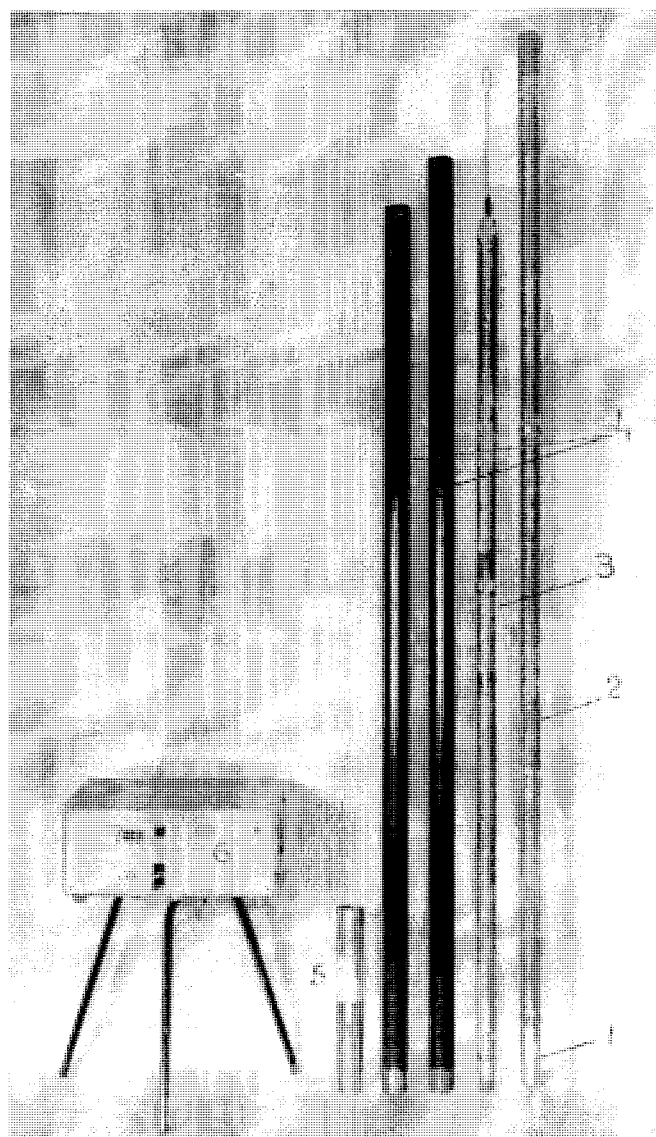


Рис. 4.6. Общий вид аппаратуры СИГР-2.
 1 – акустоэлектрический преобразователь; 2 – блок электроники; 3 – блок батарей питания; 4 – защитные кожуха; 5 – изолятор; 6 – наземный измерительный пульт.

§5. Влияние и критерий оптимальности режима бурения

Влияние режима бурения на механизм бурения горных пород исследовали при равномерном вращении коронки. В режимах качения и крутильных автоколебаний коронки диапазон акустического шума разрушения перекрывается шумами от вибраций снаряда, что не позволяет достоверно судить об особенностях механизма разрушения горной породы. Регулирование режимных параметров при бурении производили в следующих пределах: осевая нагрузка - от 0 до 2000 даН; частота вращения - от 100 до 2000 мин⁻¹. Расход промывочной жидкости не изменялся и был равен 19 дм³/мин. Существование режима равномерно вращения коронки контролировали по спектру звукового давления в призабойной зоне и киловаттметру.

Рассмотрим характер изменения спектра звукового давления в призабойной зоне при регулировании режимных параметров при бурении гранито-гнейса однослойной коронкой А4ДП-59 и импрегнированной коронкой И4ДП-59 (табл.V.9).

Таблица V.9

СКЗ звукового давления p^2 и средняя частота f_A акустического шума разрушения при регулировании осевой нагрузки P и частоты вращения n

Частота вращения, мин ⁻¹	СКЗ звукового давления, Па при осевой нагрузке, даН				Средняя частота f_A , кГц при осевой нагрузке, даН			
	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000
Импрегнированная коронка И4ДП-59								
100	6,0	5,5	7,0	5,5	11,2	11,3	12,3	12,4
200	8,5	7,0	9,0	15,0	10,5	11,4	11,8	10,0
300	10,5	11,5	14,5	17,0	10,4	11,6	11,9	11,1
400	16,5	22,5	25,5	25,5	10,3	10,4	11,6	11,3
500	21,0	36,0	39,5	30,5	10,4	10,3	11,1	10,8
Однослойная коронка А4ДП-59								
100	4,0	7,5	10,5	8,0	12,6	11,7	11,3	11,8
200	4,5	9,0	14,0	11,0	12,9	10,9	10,8	11,2
300	4,5	14,0	19,5	13,5	12,1	10,5	10,7	10,8
400	5,0	24,5	24,0	36,0	11,8	10,4	10,6	10,5
500	9,0	67,5	46,5	49,0	10,0	10,4	10,7	10,4

Характер изменения СКЗ звукового давления p и средней частоты f_A спектра от частоты вращения бурового снаряда одинаков для обеих коронок: при увеличении n происходит рост p и уменьшение f_A . Особенно тесная связь наблюдается

между n и p . Зависимости $p = f(n)$ для коронок И4ДП и А4ДП представляют линейные функции:

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

$$\text{А4ДП} \quad p = 8,5 \cdot 10^{-2} n - 6,4$$

Влияние осевой нагрузки на спектр звукового давления является сложной. Зависимости $p = f(P)$ для коронок А4ДП и И4ДП являются нелинейными. Для коронки А4ДП на частотах вращения $100 - 300 \text{ мин}^{-1}$ максимумы p наблюдаются при осевой нагрузке 1500 даН , а при $n = 400 - 500 \text{ мин}^{-1}$ - при 1000 даН (табл. V.9). Как можно заметить, максимум p с ростом частоты вращения перемещается в область более низких осевых нагрузок. Для коронки И4ДП на частотах вращения 100 и 200 мин^{-1} максимумы p наблюдаются при 500 и 1500 даН , на частоте вращения 500 мин^{-1} - при 1500 даН , а на 300 и 400 мин^{-1} - максимумы p отсутствуют. Тенденции изменения средней частоты f_A при регулировании осевой нагрузки неодинаковы для импрегнированной и однослойной коронок: для коронки И4ДП с ростом P частота f_A увеличивается, а для коронки А4ДП - f_A уменьшается (табл. V.10).

Таблица V.10

Коэффициенты корреляции зависимостей СКЗ звукового давления p и средней частоты f_A от осевой нагрузки и частоты вращения.

Параметр режима бурения	Коэффициент корреляции	
	Звуковое давление p	Средняя частота f_A
Импрегнированная коронка И4ДП-59		
Осевая нагрузка	0,24	0,53
Частота вращения	0,89	- 0,53
Однослойная коронка А4ДП-59		
Осевая нагрузка	0,34	- 0,40
Частота вращения	0,70	- 0,65

При бурении коронкой А4ДП-59 биотитового гранита осевая нагрузка изменялась от 500 до 2000 даН с шагом 250 даН ; частота вращения - от 100 до 1000 мин^{-1} с шагом 100 мин^{-1} . Всего использовано 70 режимов. При увеличении частоты вращения бурового снаряда в спектре происходит рост p и уменьшение f_A (рис. V.11a). Зависимости $p = f(n)$ и $f_A = f(n)$ аппроксимированы линейными функциями с коэффициентами корреляции r :

$$p = 0,11 \cdot n + 3,3 \quad r = 0,96;$$

$$f_A = -1,4 \cdot 10^{-3} \cdot n + 6,6 \quad r = 0,89.$$

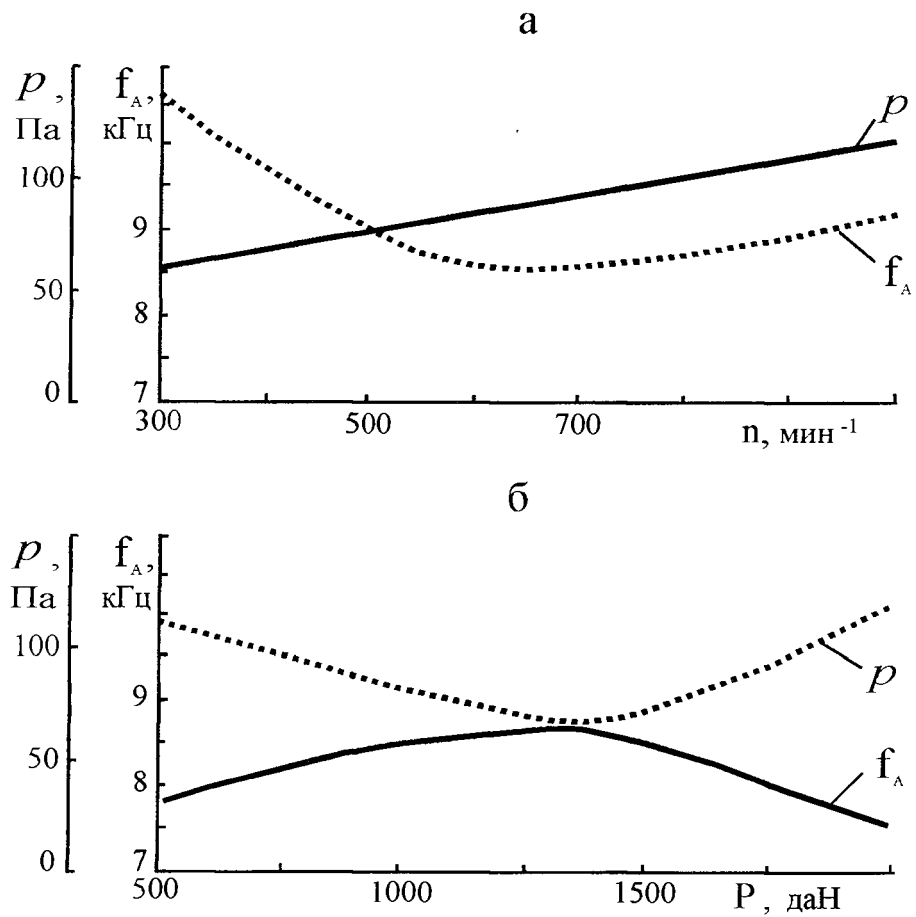


Рис. V.11. Зависимости СКЗ звукового давления p и средней частоты f_A спектра от частоты вращения бурового снаряда n при $P=1500$ даН (а) и осевой нагрузки P при $n=600$ мин (б) при бурении биотитового гранита коронкой А4ДП-59

С ростом осевой нагрузки частота f_A увеличивается, что показывает на смещение энергии в спектре в сторону высоких частот. Коэффициент корреляции частоты f_A с осевой нагрузкой достаточно высокий – 0,78, но в целом зависимости $f_A = f(P)$ и $p = f(P)$ и являются нелинейными и имеют экстремумы внутри диапазона регулирования осевой нагрузки (рис. V.11б).

Для нахождения зависимостей между удельной энергоемкостью разрушения W_v , СКЗ и средней частотой f_A спектра акустического шума разрушения использовали их средние значения, полученные на каждой ступени регулирования. Увеличение частоты f_A сопровождается ростом удельной энергоемкости разрушения, как при увеличении частоты вращения, так и осевой нагрузки (табл.V.11).

Таблица V.11.

Средние значения удельной энергоемкости разрушения, СКЗ звукового давления p и средней частоты f_A акустического шума разрушения при бурении коронкой А4ДП-59

Частота вращения, мин ⁻¹	Осевая нагрузка, даН	Энергоемкость разрушения, $\times 10^9$, Дж/м ³	Параметры акустического шума разрушения	
			p , Па	f_A , кГц
200	500 - 2000	0,15	14	10,5
300	"-	0,19	21	10,3
400	"-	0,13	59	9,9
500	"-	0,14	74	9,8
600	"-	0,10	50	9,5
700	"-	0,07	65	9,1
800	"-	0,12	92	9,4
900	"-	0,14	118	9,5
1000	"-	0,14	108	9,5
200 - 1000	750	0,08	53	9,3
"-	1000	0,09	73	9,4
"-	1250	0,11	67	9,6
"-	1500	0,11	75	9,3
"-	1750	0,13	66	10,2
"-	2000	0,16	59	10,0

Зависимость $W_v = f(f_A)$ для коронки А4ДП-59 аппроксимирована линейной функцией вида с коэффициентом корреляции r :

$$W_v = 6 \cdot 10^{-2} \cdot f_A - 4,6 \quad r = 0,78.$$

В данных по W_v и p имеется высокая диффузность. Увеличение p сопровождается снижением энергоемкости разрушения только если в спектре не изменяется частота f_A .

Сходные результаты получены при бурении импрегнированными коронками. По совокупности режимов бурения коронкой И4ДП-59 гранита при которых в спектре зафиксирована постоянная средняя частота f_A получена линейная зависимость удельной энергоемкости разрушения от p . Зависимость $W_v = f(p)$ аппроксимирована функцией вида $W_v = -1.9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 0,5$ с отрицательным коэффициентом корреляции 0,88. Поэтому нельзя рассматривать связь между p и W_v без учета распределения энергии в спектре. Необходим комплексный подход к параметрам акустического шума разрушения, учитывающий изменения как в амплитудной, так и частотной областях. Но при постоянной частоте f_A увеличение звукового давления сопровождается снижением энергоемкости разрушения горной породы.

При регулировании режима бурения алмазными коронками выявлены следующие закономерности в изменении акустического шума разрушения:

- При увеличении частоты вращения бурового снаряда звуковое давление увеличивается, а средняя частота f_A спектра звукового давления уменьшается.

- Зависимости СКЗ и средней частоты f_A спектра звукового давления от осевой нагрузки являются нелинейными и имеют экстремумы внутри диапазона регулирования осевой нагрузки.

- Увеличение частоты f_A сопровождается ростом энергоемкости разрушения, как при увеличении частоты вращения, так и осевой нагрузки. Увеличение звукового давления сопровождается снижением энергоемкости разрушения если в спектре не изменяется частота f_A .

На основе установленных закономерностей можно предложить следующее объяснение изменению механизма разрушения горной породы при регулировании режима бурения.

При увеличении частоты вращения бурового снаряда увеличивается скорость взаимодействия алмазов с забоем, уменьшается углубка за оборот и глубина распространения трещин от забоя в горную породу. Эти изменения сопровождаются увеличением звукового давления в призабойной зоне и смещением энергии в спектре акустического шума разрушения в сторону низких частот. Снижение энергоемкости бурения при увеличении частоты вращения бурового снаряда вызвано уменьшением энергоемкости скола частиц горной породы.

Различия в изменении спектра акустического шума разрушения при регулировании осевой нагрузки для однослойных и импрегнированных коронок связано не только с размером алмазов, но и контактом матрицы с забоем. Увеличение P при бурении однослойной коронкой приводит к возрастанию давления алмазов на забой, но и не влияет на площадь контакта матрицы с забоем. Глубина распространения трещин в горной породе и размер скалываемых частиц увеличиваются, что приводит к уменьшению частоты взаимодействия алмазов с забоем, а в спектре звукового давления в призабойной зоне увеличивается СКЗ и уменьшается средняя частота f_A . Для импрегнированных коронок вследствие небольшого выступа алмазов из тела матрицы увеличение осевой нагрузки приводит к росту площади контакта матрицы с забоем. В результате увеличивается сила трения и тепловыделение в зоне контакта матрицы с забоем. Именно повышением роли термозффекта в разупрочнении горных пород можно объяснить увеличение средней частоты f_A спектра при увеличении осевой нагрузки. Наличие экстремумов в зависимостях p , f_A и W_v от P показывает, что при определенной осевой нагрузке реализуется рациональный механизм разрушения, в результате которого трещины скола в горной породе развиваются по направлениям с наименее прочными межмолекулярными связями.

При изменении типа коронки, свойств горной породы или режимных параметров, удельная энергоемкость разрушения увеличивается вместе средней частотой f_A спектра (глава V, параграфы 1, 2 и 4). Как было показано выше режимы качения и крутильных автоколебаний сопровождаются непроизводительными затратами энергии на поддержание вибраций бурового снаряда, приводят к быстрому износу коронки и не являются рациональными. Учитывая это, критерий оптимальности механизма бурения горной породы с точки зрения обеспечения минимальных затрат энергии при разрушении можно сформулировать в следующем виде.

Критерием оптимальности механизма разрушения для пары коронка-порода, является установление путем регулирования режимных параметров режима равномерного вращения коронки и достижение в нем спектра звукового давления в высокочастотном диапазоне которого фиксируются минимальные значения средней частоты f_A в области максимально возможных значений СКЗ.

$$f_A \text{ ----> } \min$$

$$p \text{ ----> } \max$$

Предложенный критерий оптимальности механизма разрушения горной породы не входит в противоречие с известными формулами П.Ритингера, Ф.Кика, Ф.Бонда, и П.А.Ребиндера в той или иной степени устанавливающими зависимость расхода энергии с размерами частиц, образующихся при разрушении горной породы [7, 122]. Во всех известных формулах затраты энергии на разрушение возрастают с увеличением площади вновь образованной поверхности или с уменьшением размеров частиц горной породы. Учитывая, что уменьшение средней частоты спектра f_d и увеличение звукового давления в призабойной зоне является диагностическим признаком увеличения размеров образующегося шлама (глава V, параграф 2), то достижение критерия физически означает реализацию механизма разрушения горной породы, обеспечивающего минимальную энергоемкость разрушения.

Выводы по главе V

В результате исследований забойных процессов при изменении типа коронки, свойств горных пород и режима бурения сделаны следующие основные выводы:

- На основе спектра звукового давления в призабойной зоне возможна точная диагностика режима работы (вида движения) алмазной коронки. Основными видами движения коронки являются: качение, равномерное вращение и крутильные автоколебания. Диагностическими признаками режима работы коронки является основная частота колебаний, распространение гармоник в область высоких частот и СКЗ спектра.

- Качение коронки диагностируется по появлению в диапазоне 0 - 2000 Гц максимумов амплитуды, более чем на 20 дБ превышающих уровень спектра, распространению гармоник в область высоких частот, увеличению СКЗ спектра более чем на 20 дБ.

- Коронка при бурении может испытывать крутильные колебания двух видов низкочастотные и высокочастотные. Частота низкочастотных крутильных колебаний $f_{к1}$ связана с частотой вращения бурового снаряда и находится в диапазоне 0 - 100 Гц. При возникновении НЧ крутильных колебаний частота $n/60$ увеличивается более чем на 8 дБ. Частота высокочастотных крутильных колебаний находится в пределах 2000 - 5000 Гц и более чем на 20 дБ превышает уровень спектра.

- Алмазная коронка при бурении реализует оригинальный механизм бурения горной породы, зависящий от конструктивных параметров коронки и характери-

зующийся спектром акустического шума разрушения и коэффициентом K_p распределения энергии при разрушении. Увеличение размера алмазов и выступа их из тела матрицы приводит к увеличению звукового давления и уменьшению средней частоты f_d спектра и росту коэффициента K_p .

- На основе сравнения акустических спектров, зафиксированных при бурении испытываемой коронкой и базовой коронкой можно определить состояние и наличие конструктивных дефектов в объекте испытаний (биения, уменьшение насыщенности алмазами и др.).

- Уменьшение звукового давления и насыщение спектра акустического шума разрушения высокочастотными составляющими является диагностическим признаком уменьшения размера частиц шлама. Это открывает возможность контроля размера образующегося шлама и селективности разрушения горной породы непосредственно при бурении

- При бурении горной породы реализуется оригинальный механизм бурения, характеризующийся спектром акустического шума разрушения, удельной акустической энергией W_{AV} , и коэффициентом распределения энергии при разрушении. Изменение акустического спектра при бурении на постоянном режиме, выражающееся в смещении максимумов амплитуды по оси частот и изменении звукового давления, является диагностическим признаком смены геологического разреза.

- Увеличение при бурении удельной акустической энергии W_{AV} и расширение спектра акустического шума разрушения в сторону высоких частот является диагностическим признаками возрастания прочностных и упругих свойств разбуриваемых горных пород.

- Критерием оптимальности механизма бурения горной породы с точки зрения обеспечения минимальных затрат энергии при разрушении является установление путем регулирования режимных параметров режима равномерного вращения коронки и достижение в нем спектра звукового давления в высокочастотном диапазоне которого фиксируются минимальные значения средней частоты f_d в области максимально возможных значений звукового давления.

Глава VI. 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 термодинамическим 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 (ЕНВ, 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 [56].

Для инструментального определения категории по буримости и абразивности горных пород в лабораторных условиях предложено несколько методов [31, 56, 99]. 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 ОСТ 41-89-74 "Породы горные. Метод контрольного определения категорий по буримости для вращательного бурения": Категория горной породы по буримости устанавлива-

ется 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 [31, 56, 99]. Наибольшее распространение в бурении получили лабораторные методы оценки абразивности, предложенные Н.И.Любимовым [99] и Л.И.Бароном и А.В.Кузнецовым [31].

Применение указанных методов, несомненно, сыграло положительную роль в изучении и типизации механических свойств горных пород. Однако, как следует из опубликованных материалов [56], 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. Нагружение горной породы вращающимся породоразрушающим инст-

рументом 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 используется СКЗ и средняя частота f_d . 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 к объемной скорости разрушения горной породы v :

$$W_{AV} = \frac{p}{v} \quad \text{Па с/м}^3.$$

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

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

При стандартизованном нагружении горной породы спектр акустического шума разрушения и характер распределения энергии при разрушении зависят только от свойств горной породы. На основе измеряемых показателей появляется воз-

возможность типизации 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 невосполнимого кернового материала, высокой производительности и низкой стоимости испытаний.

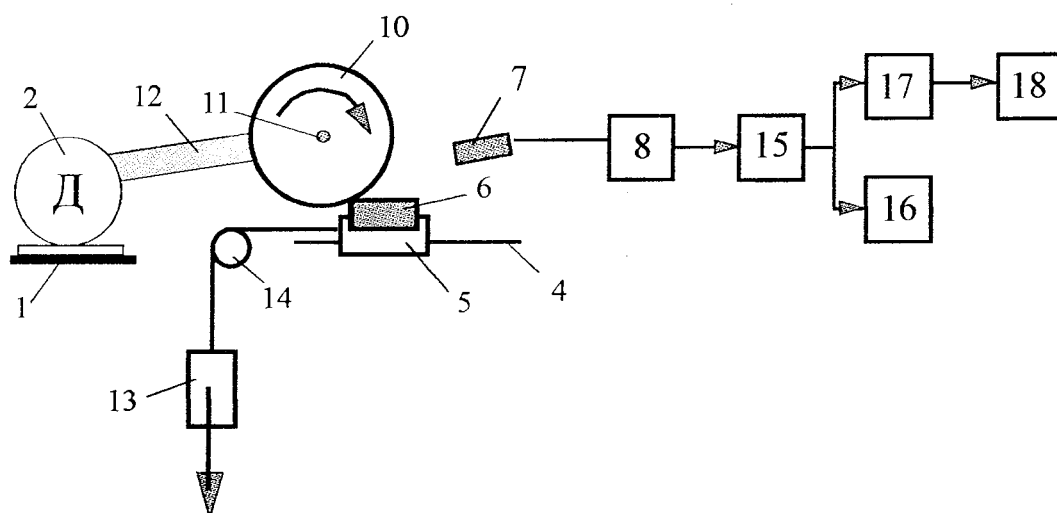
Вопросы использования информативных параметров механизма разрушения при определении буримости горной породы рассмотрены в серии работ [13, 20, 22, 23, 24, 25].

§ 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. VI.1). 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. VI.1 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

а



б

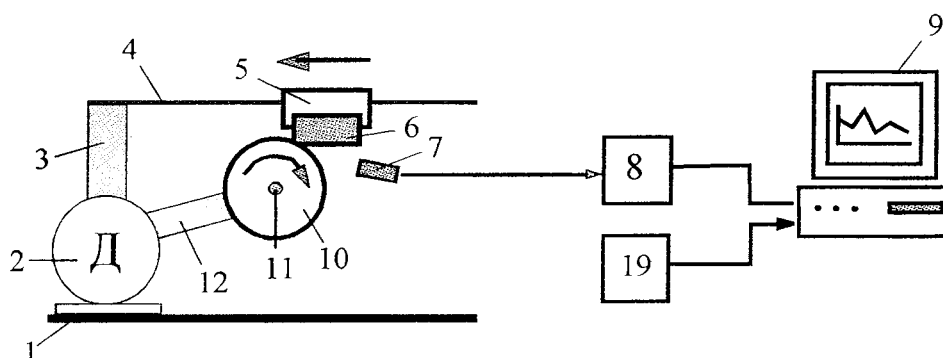


Рис. VI.1. Схемы работы установки УОБ-1(а) и прибора ПОБ-1 (б)

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; 19 - преобразователь активной мощности

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 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 Н395. Микрофон располагается на расстоянии 0,5 м от зоны резания. Время резания определяется по секундомеру.

Прибор ПОБ-1 (рис. VI.16 и VI.2) 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 $0,002 \text{ м/с}$. 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 граничными значениями и 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 в составе платы АЦП типа L-1250 АО L-Card, пакета обработки сигналов ПОС НПП "Мера" и программы командного режима испытаний, датчики и комплект соединительных кабелей. При разработке программы командного режима испытаний использован Turbo Pascal 7.0 фирмы Borland International Inc.

Обработка сигналов осуществляется с двух измерительных каналов (акустического №1 и активной мощности №2).

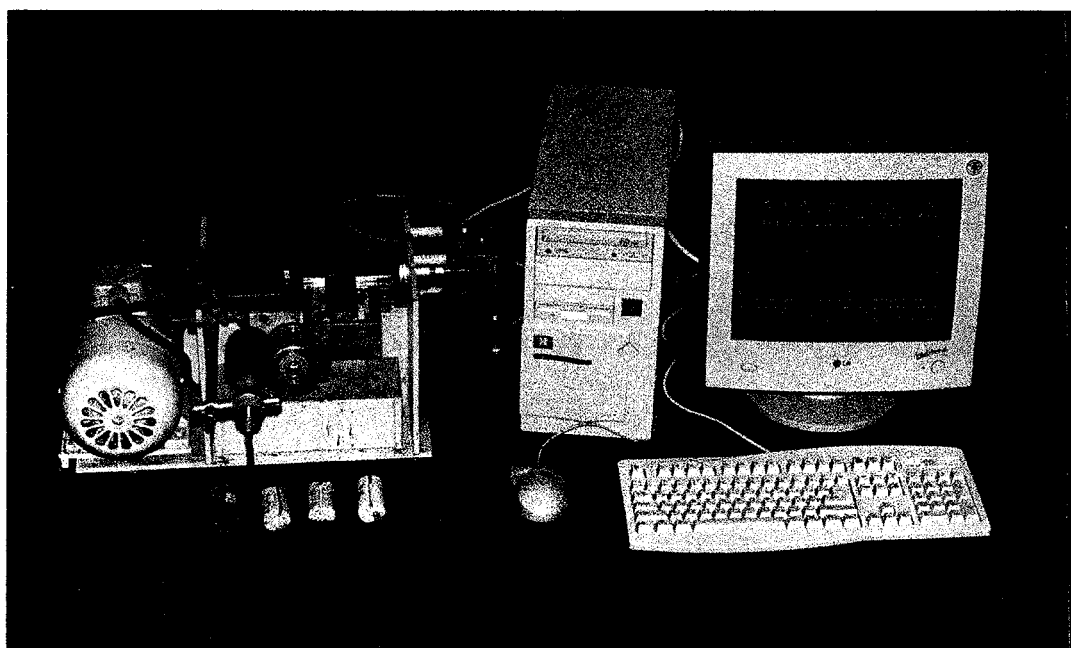


Рис. VI.2. Прибор определения буримости горных пород ПОБ-1

1 – нагружающий блок, 2 – компьютеризированная измерительная система

Измерительный акустического канал включает: микрофон М101 – измеритель шума вибрации ВШВ-003 - комплекс программно-аппаратных средств (плата АЦП L-1250 – программное обеспечение “Мера-ПОБ”). Прибор ВШВ-003 предназначен для питания микрофона ($U_{пит}=200$ В) и его предварительного усилителя ($U_{пит}=60$ В). Выходной сигнал с ВШВ-003 – переменное напряжение до 5 В. Электрический сигнал пропорциональный звуковому давлению подается на вход платы АЦП. Акустический датчик (микрофон М101) размещается в цанге, закрепленной на передней крышке экрана, и направляется активной частью на зону контакта круга с образцом горной. Расстояние между микрофоном и алмазным кругом - 0,1 м. Чувствительность микрофона для расчета звукового давления вводится с виртуальной кнопки экрана монитора.

Измерительный канал активной мощности включает: преобразователь измерительный активной мощности трехфазного тока Е848/6-М1 – сопротивление нагрузки R_n - комплекс программно-аппаратных средств (плата АЦП L-1250 – программное обеспечение “Мера-ПОБ”). Выходной сигнал с преобразователя Е848/6-М1: постоянный ток - 0 – 5 мА. Сопротивление нагрузки R_n предназначено для преобразования тока в напряжение с целью подачи на вход платы АЦП и равно 2 кОм. Выходное напряжение с R_n - до 5 В. Коэффициент преобразования для расчета мощности вводится с виртуальной кнопки экрана монитора.

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. Обоснование выбора резания в качестве нагрузочного режима

Теоретически, реализация метода акустико-спектральной диагностики буримости горной породы возможна на любой установке, состоящей из устройства разрушения образца горной породы вращающимся алмазным инструментом и блока спектрального анализа сигналов. Однако при использовании в качестве породоразрушающего инструмента не алмазной коронки возникает вопрос правомочности перенесения результатов испытаний на процесс бурения. Для решения этого вопроса проведены исследования механизма разрушения горных пород резанием.

Спектр воздушного шума при резании является сплошным с отдельными дискретными выбросами. Диапазон спектра составляет от 0 до 20 кГц и выше. При резании горной породы существуют зоны захода круга, стабильного резания и вы-

хода круга из реза. Заход круга в горную породу в целом аналогичен процессу за- бурки скважины и сопровождается ударным нагружением алмазов и повышенными уровнями вибраций круга и звукового давления.

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

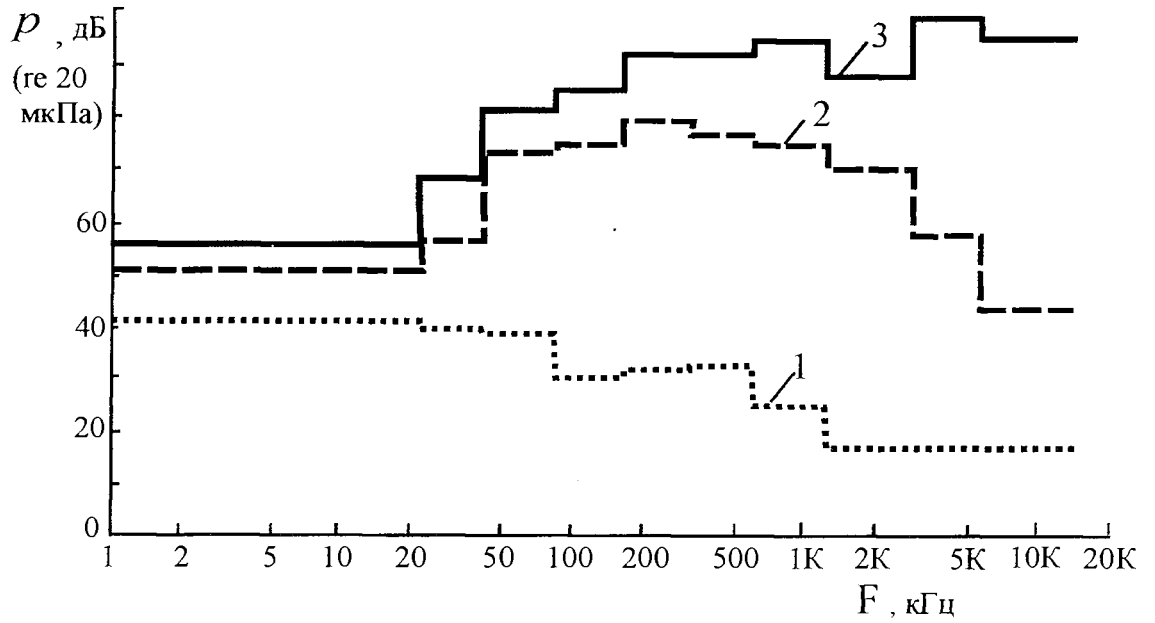
Анализ спектров воздушного шума и виброускорения подвижной каретки, зафиксированных при холостом вращении круга и резании горной породы, показало, что при резании резко увеличиваются амплитуды высокочастотных колебаний в диапазоне 7 - 20 кГц (рис. VI.3). Эта закономерность не зависит от диаметра круга (табл VI.1). Для круга диаметром 304 мм при резании гранита со скоростью 0,2 см/с увеличение уровня звукового давления L воздушного шума в диапазоне 7 - 20 кГц составило 352 раза (51 дБ), а в диапазоне менее 7 кГц – 1,8 - 71 раз (5 - 37 дБ). Для круга диаметром 100 мм при резании гранита с той-же скоростью увеличение L в диапазоне 7 - 20 кГц составило 158 раз (44 дБ), а в диапазоне менее 7 кГц – 1,6 - 40 раз (4 - 32 дБ). Для обоих кругов наибольшее увеличение L в диапазоне менее 7 кГц приходится на диапазон, примыкающий к установленной границе в 7 кГц. При холостом вращении L в диапазоне 7 - 20 кГц для обоих кругов незначительны и равны. Меньший рост L в диапазоне 7 - 20 кГц при резании гранита кругом диаметром 100 мм, по сравнению с кругом 304 мм, объясняется меньшими окружной скоростью и объемом разрушаемой породы (шириной реза).

Таблица VI.1

Уровни звукового давления воздушного шума на расстоянии 0,5 м в частотных диапазонах при резании гранита алмазными кругами диаметром 304 и 100 мм

Частотный диапазон измерений, Гц	Уровень звукового давления, дБ (ре 20 мкПа)			
	круг диаметром 304 мм		круг диаметром 100 мм	
	холостое вращение	резание гранита	холостое вращение	резание гранита
0- 20000	85	102	78,5	90
0-22	50	55	45	49
22-40	55	74	51	59
40-80	76	82	55	60
80-175	77	88	60	68
175-250	83	85	65	67
350-750	74	86	71	81
750-1500	76	91	74	86
1500-3000	68	86	66	82
3000-7000	59	96	56	88
7000-20000	46	97	46	90

а



б

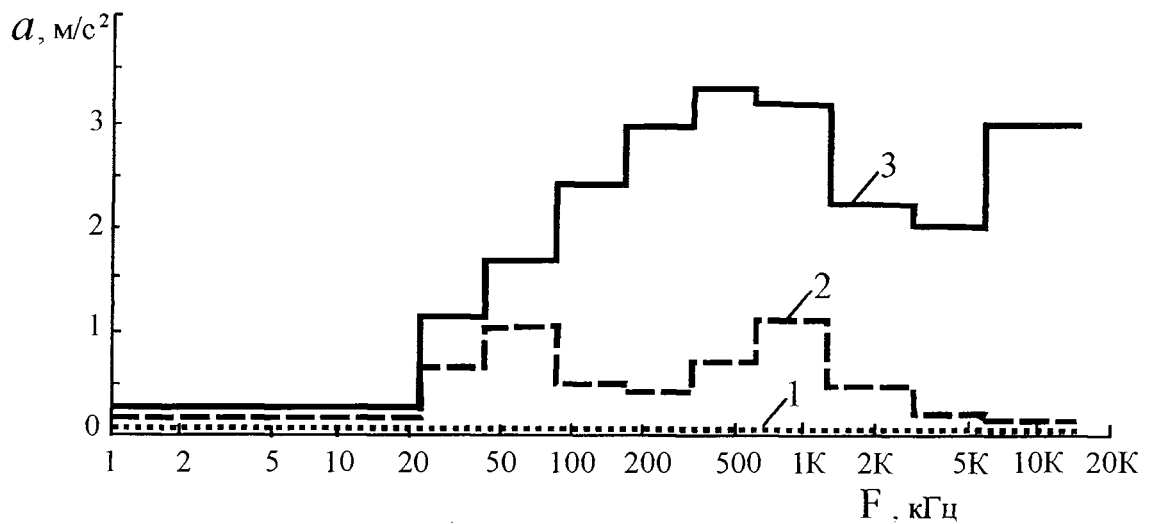


Рис. VI.3. Спектры звукового давления p воздушного шума (а) и виброускорения a подвижной каретки (б) при измерении фона (1), холостом вращении круга (2) и резании кругом диаметром 304 мм гранита со скоростью 0,2 см/с (3)

Спектр воздушного шума условно разделен на три диапазона: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Низкочастотный диапазон 0 - 1 кГц формируется за счет основной частоты $n/60$ и гармоник колебаний радиального и торцевого боя, а также частоты f_c , связанной с числом N_c режущих секторов ($f_c = N_c n/60$). Среднечастотный диапазон 1 - 7 кГц связан с вибрациями, возникающими при ударном взаимодействии круга с поверхностью реза. Высокочастотный диапазон 7 - 20 кГц занимает акустический шум разрушения.

Сравнение спектров звукового давления, зафиксированных при бурении и резании кернов, поднятых из скважины с интервалов измерения, показало четкое разделение горных пород в высокочастотной части спектра (рис.VI.4 а и б). В области высоких частот спектра зафиксирован наибольший диапазон изменения звукового давления при резании различных горных пород. При резании кругом диаметром 304 мм глинистого сланца и кварцита диапазон изменения амплитуд колебаний на частотах 1, 3, 10 и 15 кГц составляет, соответственно, 1,5, 3, 10 и 12 раз.

При резании горных пород фиксируется определенное соотношение (коэффициент K_p) между СКЗ звукового давления в призабойной зоне и мощности, реализуемой при разрушении (рис.VI.5). Наименьший коэффициент K_p наблюдается при резании глинистых пород.

Таблица VI.2.

Конструктивные параметры алмазных кругов

№ круга	Марка алмазов	Размер алмазов, мкм	Концентрация, %	Среднее число алмазов на сегменте, штук	Максимальный выступ алмазов, мкм	Тип связи	Состав связи (%)	Твердость связи по Роквеллу
2188	A5K65	400/315	75	59	150	M602	BK-6 (100)	28 HRC
2982	A5K65	400/315	75	57	150	кобальтовая M201	Co (98)	10 HRC
2983	A5K65	400/315	75	55	50		Cu (80), Sn (20)	50 HRB
2190	AC-80	250/200	75	102	70	M615	Fe (51), Cu (32) Sn (8), Ni (9)	45 HRB

Для исследования влияния конструктивных параметров круга на механизм разрушения горной породы были использованы круги диаметром 304 мм, армированные алмазами марок A5K65 и AC-80 (табл. VI.2.). Алмазы марки A5K65 представляют обломки кристаллов (97%) и агрегатов (до 3%); содержания зерен с

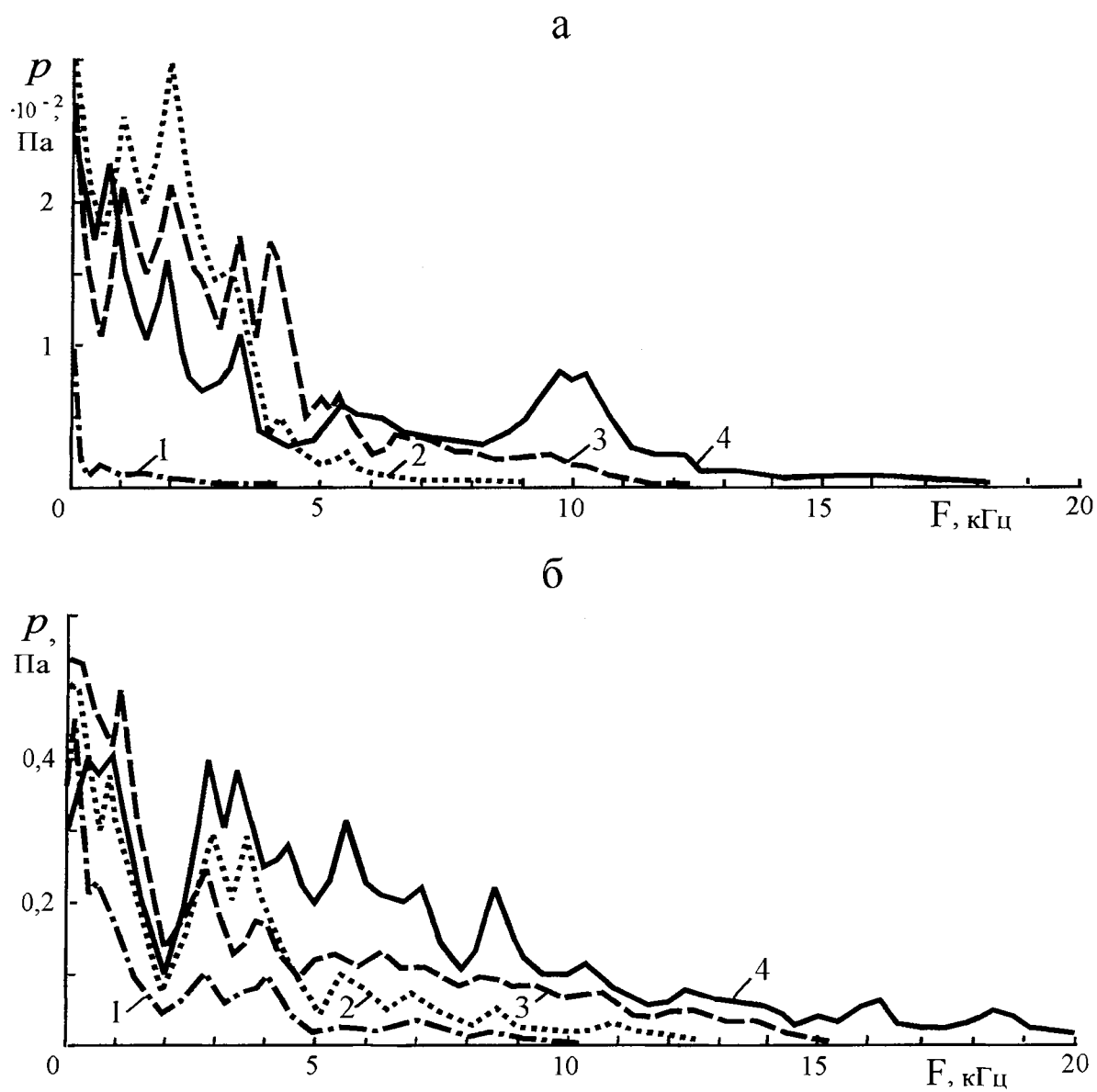


Рис. VI.4. Спектры звукового давления при бурении (а) и резании (б) горных пород участка шахты Центральная-Новая (Донбасс) и месторождения Кальйок (Хибины)

1 - глинистый сланец; 2 - песчанистый сланец; 3 - песчаник;
4 - ловчоррит

искажением до 1,5 и 1,5 - 3 равны (по 50%). Синтетические алмазы марки AC-80 представлены совершенными кристаллами (не менее 45%), обломками кристаллов и сростками с коэффициентом формы не более 1,2 (до 12%). Прочность на сжатие природных алмазов - 65 Н; синтетических - 80 Н. Максимальный выступ алмазов из тела матрицы определяли на центральной линии сегмента с помощью профилометра ПИК-1. Подсчет алмазов на поверхности сегмента производили с помощью микроскопа с 17 кратным увеличением. Максимальный выступ и число алмазов усреднялись по 5 сегментам. Твердость связки по Роквеллу определяли на приборе ТК-2. Резали керны перидотита, филлита, песчаника, мигматита, габбро, гнейса, микрогранита и кварца, полученные из Печенгской КГРЭ. Резание производили на установке УОБ-1 с усилием подачи 5 даН, частотой вращения круга 500 мин⁻¹ и расходом охлаждающей жидкости 2 дм³/мин. По каждому керну было сделано 3 реза.

Алмазный круг при резании реализует оригинальный механизм разрушения горной породы, зависящий от конструктивных параметров круга и характеризующийся спектром акустического шума разрушения и коэффициентом K_p . При резании с постоянным усилием подачи скорость резания СКЗ звукового давления зависит от типа круга и скорости резания (табл. VI.3). Для всех кругов удельная акустическая энергия W_{AV} возрастает в последовательности: перидотит – филлит – песчаник – мигматит – габбро – гнейс – микрогранит - кварц (табл. VI.3). Однако при резании одной горной породы различными кругами W_{AV} имеет близкие значения. Два этих факта позволяет утверждать, что в первом приближении, удельная акустическая энергия W_{AV} , выделяющаяся при разрушении, является константой горной породы. Удельная энергоемкость резания W_v уменьшается, а коэффициент K_p возрастает в последовательности: круг №2190 – круг №2983 - круг №2982 - круг №2188. Это позволяет считать причиной увеличения энергоемкости резания перераспределение энергии на резе. Наиболее энергоемок процесс резания кругом №2190, армированным наиболее мелкими алмазами размером 250/200 мкм. Среди кругов №2983, №2982 и №2188, армированных алмазами A5K65, наилучшие показатели имеют круг №2982 с кобальтовой связкой и круг №2188 со связкой M602. Круг №2983 с мягкой связкой M201 имеет худшие показатели, что можно объяснить ростом потерь энергии на трение вследствие незначительного выступа алмазов из тела матрицы и замазывания алмазов материалом связки.

Исследования зависимости энергоемкости и скорости резания от удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении, производили на установке

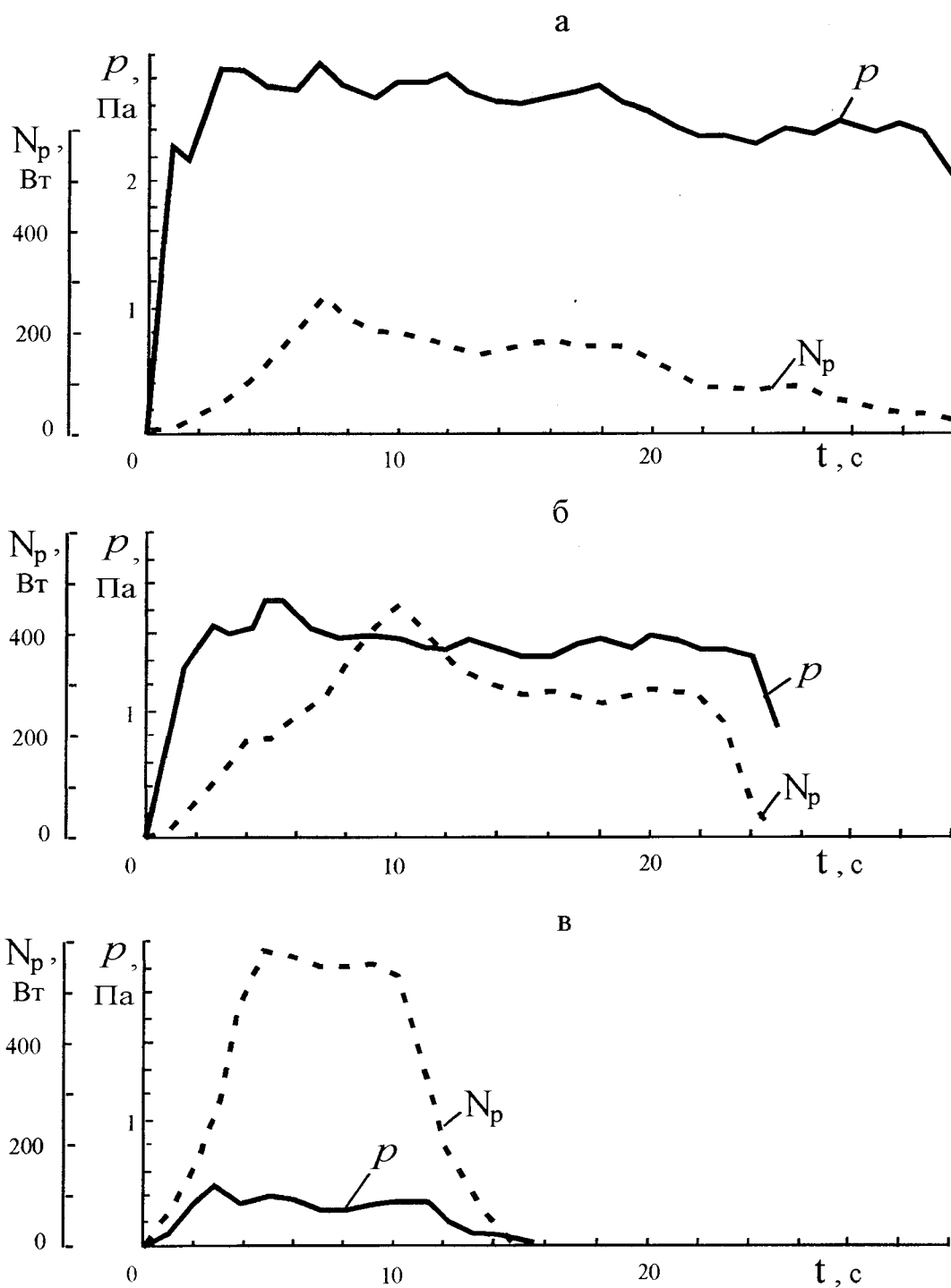


Рис. VI.5. Зависимости СКЗ звукового давления p и реализуемой мощности N_p от времени t при резании гранита (а), мрамора (б) и глины (в)

Таблица VI.3

Результаты резания горных пород кругами №2190 и №2983 с измерениями p на расстоянии 0,5 м от зоны резания

Горная порода	круг №2190					круг №2983				
	p , Па	v , $\times 10^{-9}$, $\frac{м^3}{с}$	W_V , $\times 10^9$, $\frac{Дж}{м^3}$	W_{AV} , $\times 10^6$, $\frac{Па \cdot с}{м^3}$	K_p , $\times 10^{-2}$, $\frac{Па}{Вт}$	p , Па	v , $\times 10^{-9}$, $\frac{м^3}{с}$	W_V , $\times 10^9$, $\frac{Дж}{м^3}$	W_{AV} , $\times 10^6$, $\frac{Па \cdot с}{м^3}$	K_p , $\times 10^{-2}$, $\frac{Па}{Вт}$
Кварц	1,66	55,2	0,76	30,1	4,0	1,83	60,1	0,71	30,5	4,3
Микрогранит	1,88	67,0	0,67	28,2	4,2	2,07	70,3	0,64	29,5	4,6
Гнейс	1,86	72,1	0,27	25,8	7,0	1,88	72,2	0,25	26,1	10,4
Габбро	1,89	74,4	0,42	25,4	5,3	1,97	78,0	0,38	25,2	6,6
Мигматит	1,68	77,6	0,25	21,6	6,2	1,57	77,2	0,26	20,3	7,8
Песчаник	1,11	66,2	0,41	16,8	4,1	1,16	67,1	0,37	17,3	4,7
Филлит	0,94	58,7	0,61	16,0	2,6	1,04	63,5	0,51	16,3	3,2
Перидотит	1,06	75,6	0,26	14,0	3,9	1,36	98,7	0,22	13,8	6,3

Таблица VI.4

Результаты резания горных пород кругами №2982и №2188 с измерениями p на расстоянии 0,5 м от зоны резания

Горная порода	круг №2190					круг №2983				
	p , Па	v , $\times 10^{-9}$, $\frac{м^3}{с}$	W_V , $\times 10^9$, $\frac{Дж}{м^3}$	W_{AV} , $\times 10^6$, $\frac{Па \cdot с}{м^3}$	K_p , $\times 10^{-2}$, $\frac{Па}{Вт}$	p , Па	v , $\times 10^{-9}$, $\frac{м^3}{с}$	W_V , $\times 10^9$, $\frac{Дж}{м^3}$	W_{AV} , $\times 10^6$, $\frac{Па \cdot с}{м^3}$	K_p , $\times 10^{-2}$, $\frac{Па}{Вт}$
Кварц	2,36	73,4	0,56	32,2	5,8	2,37	75,1	0,51	31,5	6,2
Микрогранит	2,35	78,1	0,45	30,1	6,7	2,28	76,4	0,44	29,8	6,8
Гнейс	2,19	80,7	0,23	27,0	11,7	2,18	82,1	0,21	26,6	12,7
Габбро	2,24	89,6	0,29	25,0	8,6	2,32	88,4	0,31	26,3	8,5
Мигматит	1,85	86,1	0,21	21,5	10,2	1,95	87,2	0,19	22,4	11,7
Песчаник	1,57	92,0	0,31	17,1	5,5	1,56	89,7	0,34	17,4	5,1
Филлит	1,41	85,4	0,35	16,5	4,7	1,22	81,3	0,43	15,0	3,5
Перидотит	1,58	115,6	0,15	13,7	9,1	1,41	112,3	0,17	12,6	7,4

УОБ-1 при резании горных пород. При возрастании W_{AV} энергоёмкость W_V увеличивается, а скорость резания уменьшается (рис.VI.6 а и б).

Зависимость $W_V = f(W_{AV})$ аппроксимирована степенной функцией вида

$$W_V = 1,05 \cdot 10^{-3} W_{AV}^{1.6}.$$

На кривой $W_V = f(W_{AV})$ выделяются две зоны локального увеличения энергоёмкости резания (рис.VI.6 а.). Одна зона формируется за счет не слишком прочных горных пород (глинистых сланцев, песчанистых сланцев и др.), обладающих высоким коэффициентом пластичности ($k > 2$) по Л. А. Шрейнеру. Вторая зона увеличения W_V возникает при резании прочных мелко и скрытокристаллических горных пород (кварцитов, железистых кварцитов и др.) с низким коэффициентом пластичности $k = 1$. Общим в механизме разрушения горных пород из этих двух групп является низкий коэффициент K_p менее $3 \cdot 10^{-2}$ Па/Вт, указывающий на снижение доли акустической энергии в суммарных энергозатратах. Близкие значения W_V при резании горных пород с различной пластичностью позволяет утверждать, что увеличение энергоёмкости резания кристаллических пород не связано с пластическими свойствами, а определяется перераспределением энергии при разрушении.

Для объяснения увеличения энергоёмкости резания мелко и скрытокристаллических горных пород представляется необходимым ввести новое понятие *“псевдовязкость горной породы”*. *Псевдовязкость горной породы можно определить как способность горной породы необратимо поглощать энергию при резании и бурении*. Псевдовязкость в большей степени является характеристикой не горной породы, а ее механизма разрушения.

Зависимость скорости разрушения горной породы от удельной акустической энергии W_{AV} (рис.VI.6 б) аппроксимирована дробно-рациональной функцией (гиперболой). Гипербола является равнобокой с асимптотами - осями координат. Аппроксимирующая функция имеет вид: $v_p = 5,65 \cdot 10^{-5} \cdot W_{AV}^{-0.54}$. По гиперболе прослежена зависимость v_p от генетического типа горной породы. В зависимости от темпов уменьшения v_p ось W_{AV} можно разбить на три зоны. Зона 1 (ниспадающая ветвь гиперболы в интервале значений W_{AV} от 0 до $5 \cdot 10^6$ Па·с/м³), где наблюдается наибольший темп уменьшения скорости разрушения, образована рыхлыми породами (песками различной зернистости, супесями, растительным слоем без корней и др.) и песчано-глинистыми породами (глинами неплотными и песчанистыми, алевролитами и др.). Зона 2 (участок гиперболы в интервале значений W_{AV} от 5 до $18 \cdot 10^6$

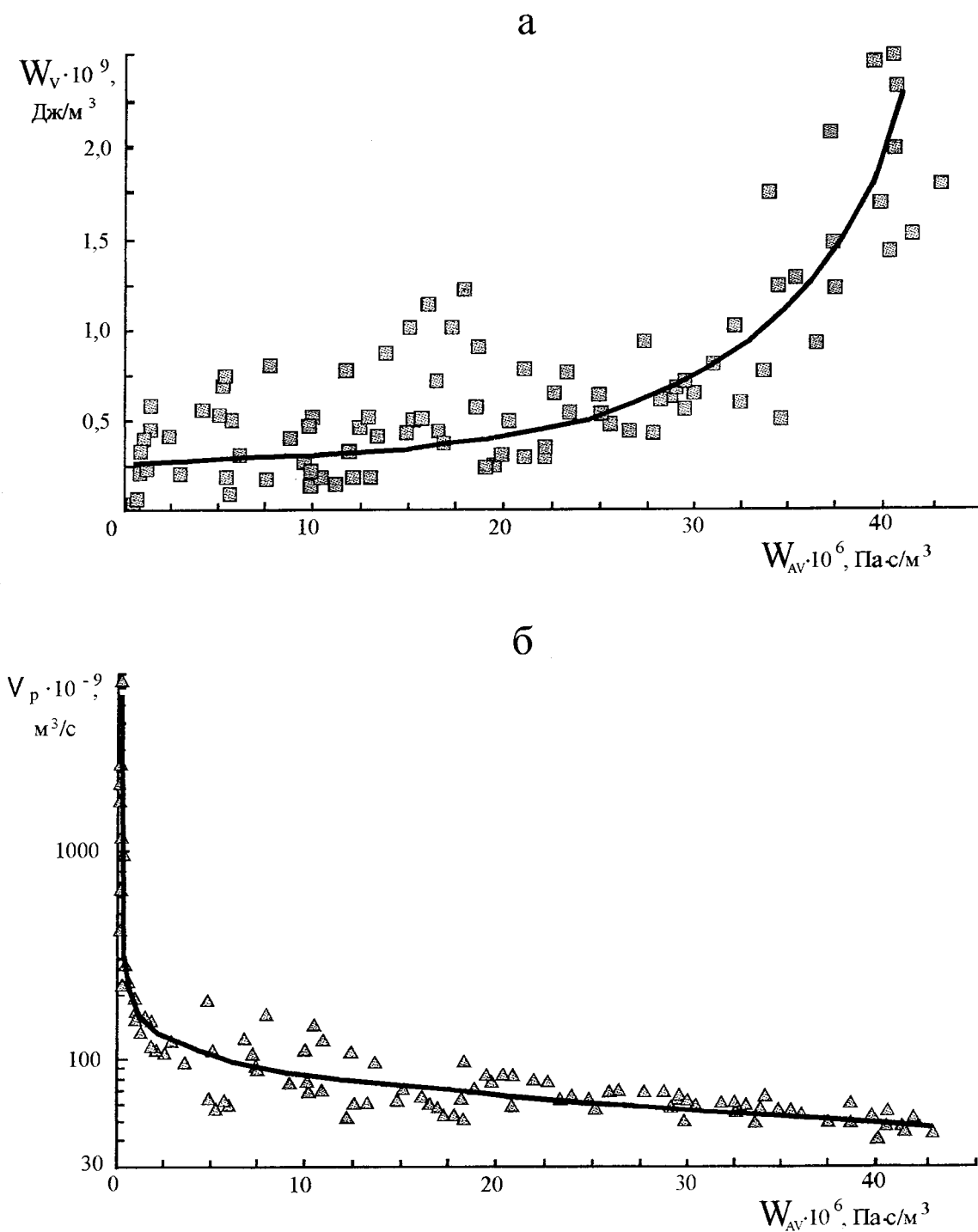


Рис. 1.6 Зависимости удельной энергоемкости W_v (а) и скорости разрушения горной породы V_p (б) от удельной акустической энергии W_{av} , выделившейся при разрушении

Па·с/м³), где темп уменьшения скорости разрушения несколько замедляется, образована неизмененными и слабо метаморфизованными осадочными горными породами (известняками, песчаниками, сланцами, аргиллитами, алевролитами и др.) и метаморфическими породами (мраморами и др.). Зона 3 (участок гиперболы в интервале значений W_{AV} свыше $18 \cdot 10^6$ Па·с/м³), где темпы уменьшения v_p наименьшие, образована осадочными породами с высокой степенью метаморфизма, магматическими породами (гранитами, гнейсами, габбро и др.) и метаморфическими породами (различными кварцитами, яшмоидами и др.). В зоне 3 зависимость $v_p = f(W_{AV})$ является чисто линейной с отрицательным коэффициентом корреляции.

Не установлено корреляционной зависимости между K_p и W_{AV} , а также K_p и W_V . Коэффициенты корреляции зависимостей $W_{AV} = f(K_p)$ и $W_V = f(K_p)$ равны, соответственно, 0,5 и - 0,11 при высоких значениях среднеквадратического отклонения. Различные значения K_p встречаются как при высоких, так и низких W_{AV} . Однако если при резании горных пород фиксируются одинаковые W_{AV} , то более низкая энергоемкость резания фиксируется у горной породы с меньшим K_p .

Результаты исследования процесса резания позволяют сделать вывод об идентичности физической сущности механизмов разрушения горной породы при бурении и резании. Это делает правомерным использование резания в качестве нагрузочного режима при определении буримости горной породы.

§4. Генетический тип, физико-механические свойства и параметры механизма разрушения горной породы

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. VI.7). Диапазон изменения удельной акустической энергии, измеренной с помощью установки УОБ-1 составляет не менее 83 дБ (14250 раз): от 4000 Па·с/м³ (песок мелкозернистый) до 57000000 Па·с/м³ (кремень).

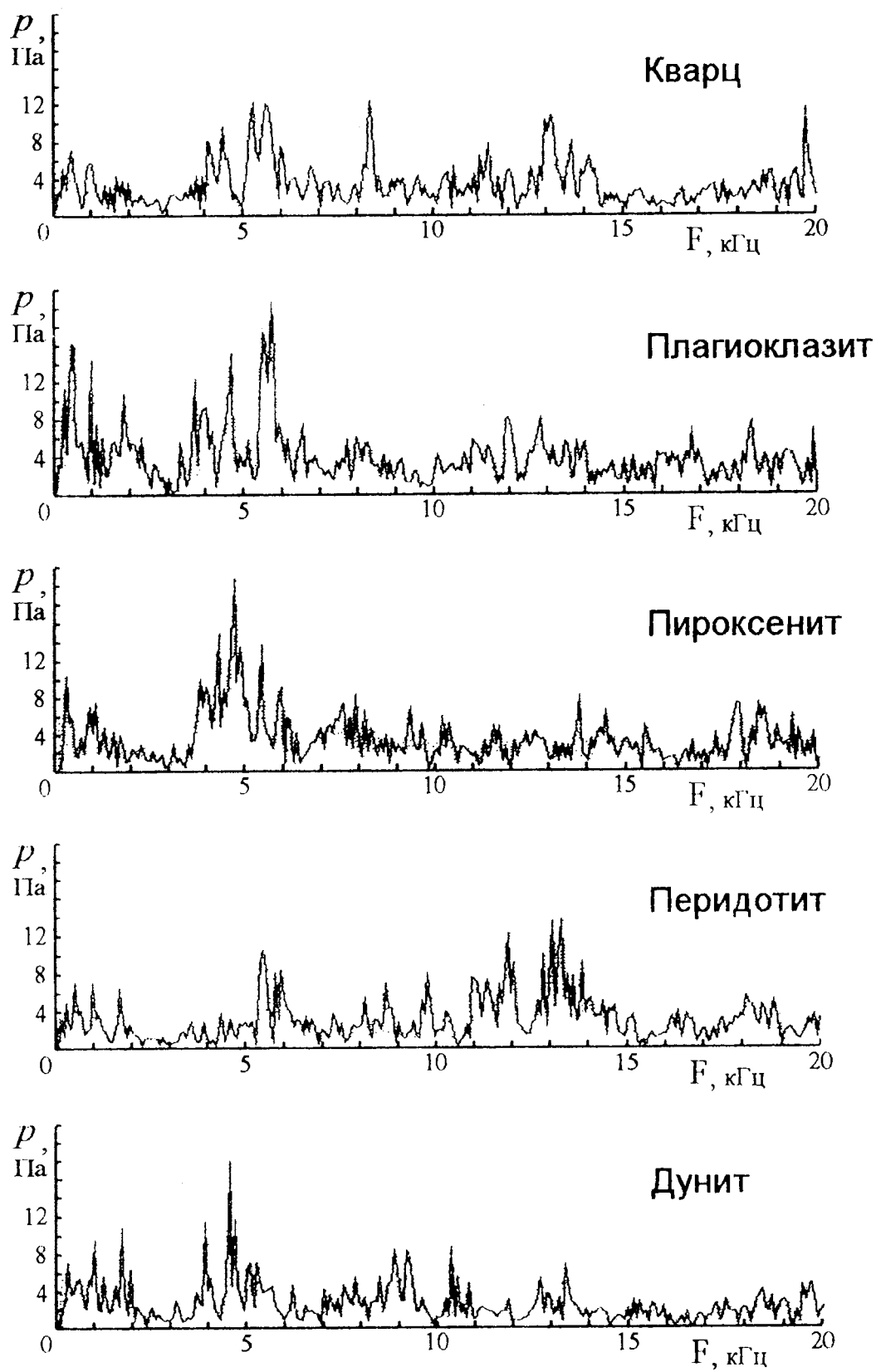


Рис. VI.7. Спектры звукового давления при резании дунита, перидотита, пироксенита, плаггиоклазита и кварца.

Параметры механизма разрушения осадочных горных пород

Генетические группы	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		W_{AV} $\times 10^6$, Па·с/м ³	K_p $\times 10^{-2}$, Па/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
Хемотрогенные 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	7,1 - 57,0	1,9 - 2,4	НЧ, СЧ, ВЧ
	(трепел, опока, яшма)			

Осадочные горные породы, в целом, характеризуются низкочастотным спектром, невысокими значениями удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении, и коэффициента распределения энергии (табл. VI.5). Только грубообломочные нецементированные горные породы (гальки, конгломераты, валуны) и кремнистые горные породы, имеют W_{AV} , 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_{AV} и K_p и средне - высокочастотным спектром (табл. VI.6). Эффузивные горные породы, по сравнению с их глубинными аналогами, имеют более низкие значения W_{AV} , K_p и

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

Таблица VI.6

Параметры механизма разрушения магматических горных пород

Генетические группы	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		W_{AV} $\times 10^6$, 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

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.

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 минералы (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.

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

Таблица VI.7

Параметры механизма разрушения метаморфических горных пород

Вид метаморфизма	Наименование горной породы	Параметры механизма разрушения		
		W_{AV} $\times 10^6$, 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
	Джеспилиты	31,7 - 42,7	1,9 - 2,9	ВЧ
Контактовый	Роговики	25,3 - 37,1	1,7 - 2,5	ВЧ
	Скарны	23,1 - 31,2	2,6 - 5,7	СЧ, ВЧ
Региональный или контактовый	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

Метаморфические породы имеют большой разброс значений W_{AV} , K_p и формы акустического спектра (табл. VI.7). 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.

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 .

Зависимость между информативными параметрами механизма разрушения и физико-механическими свойствами горных пород. Известно, что горные породы характеризуются значительным разбросом физико-механических свойств. Поэтому, чтобы не сделать ложных выводов о характере зависимости между информативными параметрами механизма разрушения и физико-механическими свойствами горных пород вследствие объема и представительности выборки образцов горных пород, были отобраны образцы из всех генетических комплексов горных пород. Исследованы зависимости W_{AV} с плотностью ρ горной породы и скоростью c_p распространения продольных упругих волн в горной породе. Плотность образцов горных пород определена методом гидростатического взвешивания; скорость распространения упругих волн импульсным ультразвуковым методом.

Не установлено четкой корреляционной зависимости между W_{AV} и плотностью горных пород (табл. VI.7). Наиболее высокие W_{AV} зафиксированы при резании магматических и метаморфических кристаллических горных пород с повышенным содержанием кремнезема (гранитов, кварцитов). Однако плотность кристаллических горных пород оказывается ниже или сравнима с плотностью ряда осадочных метаморфизованных горных пород (филлитов, глинистых и песчанистых сланцев и др.). По-видимому, установления такой зависимости не стоит ожидать и в дальнейшем, так как наиболее плотные из известных в природе минералов касситерит, пирротин, пирит и др. не обладают высокой твердостью.

С ростом скорости распространения упругих волн в горной породе при резании происходит увеличение W_{AV} (табл. VI.8). Зависимость $W_{AV} = f(v_p)$ аппроксимирована линейной функцией с коэффициентом корреляции 0,85.

Таблица VI.8

Значения плотности горных пород, скорости распространения продольных упругих волн и удельной акустической энергии W_{AV} некоторых образцов горных пород

Генетический тип	Горная порода	$\rho \times 10^3$, кг/м ³	$c_p \times 10^3$, м/с	$W_{AV} \times 10^6$, Па·с/м ³
Осадочные	Глина	1,50	1,9	0,9
	Аргиллит	1,70	2,1	2,8
	Мергель	2,70	2,7	5,1
	Песчаник	2,75	3,3	15,1
	Известняк	2,88	4,2	15,6
Магматические	Руда апатитовая	2,91	4,8	11,8
	Гранит биотитовый	2,71	5,1	22,7
	Ловчоррит	2,81	6,3	19,7
	Лабрадорит	2,71	6,4	25,1
	Аплит	2,68	6,4	29,7
	Уртит	2,70	5,6	27,4
Метаморфические	Уголь	1,51	3,5	1,9
	Сланец глинистый	2,87	2,2	12,9
	Сланец песчанистый	2,81	2,8	13,3
	Мрамор	2,71	5,1	14,9
	Гранито-гнейс	2,64	5,7	22,4
	Гнейс	2,72	5,7	26,6
	Кварцит железистый	3,42	5,5	28,5
	Кварцит	2,61	5,8	32,1
	Песчаник окварцованный	2,76	6,0	32,9

Сравнительные данные по диапазонам изменения W_{AV} , коэффициента крепости (по М.М.Протоdjяконову), прочности на одноосное сжатие, глубины реза на приборе ВИТР-ОТ (по М.М.Витторфу), твердости по штампу (по Л.А.Шрейнеру) и динамической прочности по толчению (по К.И.Сыскову и М.М.Протоdjяконову) для некоторых групп горных пород приведены в табл.VI.9. При составлении таблицы были обобщены результаты исследований, проведенные автором, а также данные, содержащиеся в фондовых отчетах ВИТР, открытых источниках [2; 44; 70; 100; 104] и отчетах производственно-геологических организаций по объектам, где были отобраны образцы горных пород. Анализ табл.VI.9 показывает, что в целом у всех показателей прочности происходит увеличение нижней и верхней границ диапазонов в последовательности: рыхлые породы - глины - алевролиты, аргиллиты, сланцы глинистые и песчано-глинистые - мраморы - известняки - песчаники - кварциты, гнейсы - граниты, гранито-гнейсы, габбро-нориты и габбро - диабазы - джеспилиты - кремнистые породы.

Таблица VI.9

Сравнительные данные по диапазонам изменения различных показателей прочности горных пород

Горная порода	Удельная акустическая Энергия, выделившаяся при разрушении, $\times 10^6$, Па·с/м ³	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Кoeffициент крепости (по М.М.Протодьяконову)	Твердость по штампу (по Л.А.Шрейнеру), МПа	Динамическая прочность по толчению (по Н.И.Любимову)	Глубина реза на приборе ВИТР-ОТ, мм (по М.В.Витторфу)	
						нагрузка 1 кг	нагрузка 4,1 кг
Рыхлые породы (торф, песок, супесь)	<0,0054	0 - 10	0 - 1,0				
Глины	0,024 - 0,529	10 - 27	1,0 - 2,7	0 - 1000		2,28 - 1,04	
Алевриты	0,07 - 3,37	11 - 103	0,7 - 5,8	50 - 2100	1,2 - 13,6	1,62 - 0,76	
Аргиллиты	0,58 - 5,3	15 - 93	3,6 - 8,0	200 - 1700	2,2 - 15,4	1,62 - 0,76	
Сланцы глинистые и песчано-глинистые)	0,18 - 13,3	8 - 83	0,7 - 7,4	200 - 1700	2,7 - 15,2	1,62 - 1,04	5,3 - 3,11
Известняки	5,5 - 21,4	33 - 168	2,4 - 11,4	850 - 3000	2,3 - 20,0	1,62 - 0,76	5,3 - 2,41
Песчаники	1,05 - 34,0	10 - 220	1,8 - 11,4	200 - 5200	1,0 - 33,3	1,62 - 0,76	5,3 - 1,16
Мраморы	4,5 - 17,4	35 - 180	6,0 - 8,0	950 - 2000	5,1 - 13,8	2,28 - 1,04	
Граниты	20,6 - 34,4	70 - 275	8,6 - 15,3	3000 - 5000	4,0 - 25,0		3,1 - 1,76
Гнейсы	14,0 - 33,7	5 - 177	7,5 - 15,3	2670 - 5310	1,4 - 25,0		4,0 - 2,41
Гранито-гнейсы	24,4 - 36,3	90 - 190	11,9 - 15,3	3360 - 5310	4,8 - 25,0		4,0 - 2,41
Габбро-нориты и габбро-диабазы	22,4 - 36,8	100 - 376	8,2 - 20,4	2100 - 6300	14,3 - 40,0		4,0 - 1,76
Кварциты	5,59 - 35,7	53 - 242	5,4 - 18,3	2000 - 8100	6,6 - 50,0		5,3 - 1,76
Джеспилиты	31,7 - 42,7	240 - 380	11,4 - 20,6	8100	22,2 - 25,0		<1,76
Кремнистые породы (кремни, яшмы, яшмоиды)	33,6 - 57,0	242 - 400	>20,4	3600 - 7000	18,2 - 40,0		<1,76

Одновременно по нескольким методам было испытано 13 горных пород, отобранных на различных месторождениях (табл.VI.10). Обработка экспериментальных данных показала следующее. Наиболее высокая корреляция имеется между удельной акустической энергией W_{AV} и твердостью по штампу ($r=0,90$); несколько меньшая - с пределом прочности на одноосное сжатие ($r=0,82$).

Относительно невысокая корреляция зафиксирована между W_{AV} и скоростью резания ($r=0,70$). Это можно объяснить следующим образом. При резании вязкопластичных горных пород скорость разрушения уменьшается за счет увеличения потерь энергии на трение, и метод резания дает завышенные показатели прочности. Вследствие этого, у сланцев фиксируются меньшие значения скорости резания, чем у песчаника, а у известняка - меньшие, чем у гранита и кварцита. Отсюда следует, что *скорость резания не может служить индикатором прочности горных пород.*

Практически отсутствует корреляция между W_{AV} и динамической прочностью по толчению F_d ($r=0,66$). Это можно объяснить тем, что метод определения динамической прочности горной породы путем сбрасывания груза на кусочки раздробленной породы не имеет ничего общего с нагружением горной породы вращающимся инструментом. Низкая корреляция зафиксирована также между F_d и твердостью по штампу; F_d и пределом прочности на сжатие. Результаты более детальных исследований зависимости между W_{AV} и F_d рассмотрены в §5 главы VI.

В процессе исследований были изучены параметры механизма разрушения некоторых мономинеральных образований, а также их зависимость с твердостью по Моосу и прочностью на одноосное сжатие. С ростом прочностных свойств горной породы, определенным по методам царапания (Мооса), одноосного сжатия и вдавливания штампа (Л. А. Шрейнера) удельная акустическая энергия W_{AV} , выделившаяся при разрушении, увеличивается (табл. VI.11)

Возрастание прочностных и упругих свойств горных пород сопровождается также расширением спектра в сторону высоких частот (рис. VI.4 и VI.5).

Результаты исследований зависимости информативных параметров механизма разрушения от генетического типа и физико-механических свойств горных пород позволили сформулировать гипотезу о связи термодинамических условий образования с суммарной энергией, высвобождаемой при ее разрушении.

Чем выше давление и температура образования горной породы, тем больше энергии высвобождается при ее разрушении.

По-видимому, эта гипотеза позволит в дальнейшем объяснить механизмы

Таблица VI.10

Показатели прочности горных пород

Горная порода	Место отбора образца	$W_{AV} \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$	Предел прочности на сжатие, МПа	Скорость резания $\times 10^{-9}, \text{м}^3/\text{с}$	Твердость по штампу, МПа	Динамическая прочность по толчению
Сланец глинистый	Шахта Центр Новая, Добасс	5,7	8,5	63,0	220	6,4
Сланец песчано глинистый	То же	9,4	19,4	67,0	310	5,6
Сланец песчаный	То же	12,9	50,0	65,0	310	8,9
Песчаник	То же	15,1	120,0	70,2	1100	10,8
Известняк	То же	20,1	105,0	61,0	1590	11,6
Мрамор	м-ние Рускеала	16,9	70,0	52,5	1050	8,3
Гранит серый	м-ние Возрождение	26,5	98,0	61,0	1590	11,6
Гранит серый	м-ние Каменогорское	27,0	110,0	58,3	3200	8,1
Гранит	м-ние Возрождение	27,0	120,0	62,1	3500	6,3
Кварцит	м-ние Шокшинское	29,1	143,0	61,2	6500	7,8
Песчаник окварцованный	Шахта Центр.-Новая, Донбасс	32,9	220,0	57,4	4200	10,8
Кварцит железистый	м-ние Оленегорское	28,7	361,0	55,3	4500	10,9
Джеспилит	Район Кривого Рога	41,4	380,0	43,0	8100	23,6

Таблица VI.11

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

Минерал	Твердость по Моосу	Твердость по штампу, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа	$W_{AV} \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$
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

разрушения различных горных пород.

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

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

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

Для исследования зависимости между W_{AV} и механической скоростью бурения проведены экспериментальные работы на стенде, оснащённом буровым станком 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 01АЗ, 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 песчанистый, 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 раз-

рушении 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_{AV} усреднялось по всем резам.

Для всех типов коронок зависимости между V_{mex} и W_{AV} при бурении на постоянном режиме аппроксимированы экспоненциальными функциями вида:

$$V_{mex} = a \cdot e^{(-W_{AV}/b)}.$$

Зависимость между механической скоростью бурения коронкой 01А3-59 и W_{AV} (рис. VI.8 а) представляет экспоненциальную функцию:

$$V_{mex} = 8,43 \cdot e^{(-W_{AV}/3607592)}.$$

Зависимости между ресурсом коронки, расходом алмазов на бурение и W_{AV} разбуриваемой горной породы устанавливались по результатам отработки коронок в производственных условиях. Керны горных пород, по которым имелись показатели отработки коронок, были доставлены в ВИТР и подверглись испытаниям на установке УОБ-1. Для большинства коронок зависимость между ресурсом и W_{AV} является экспоненциальной функцией вида:

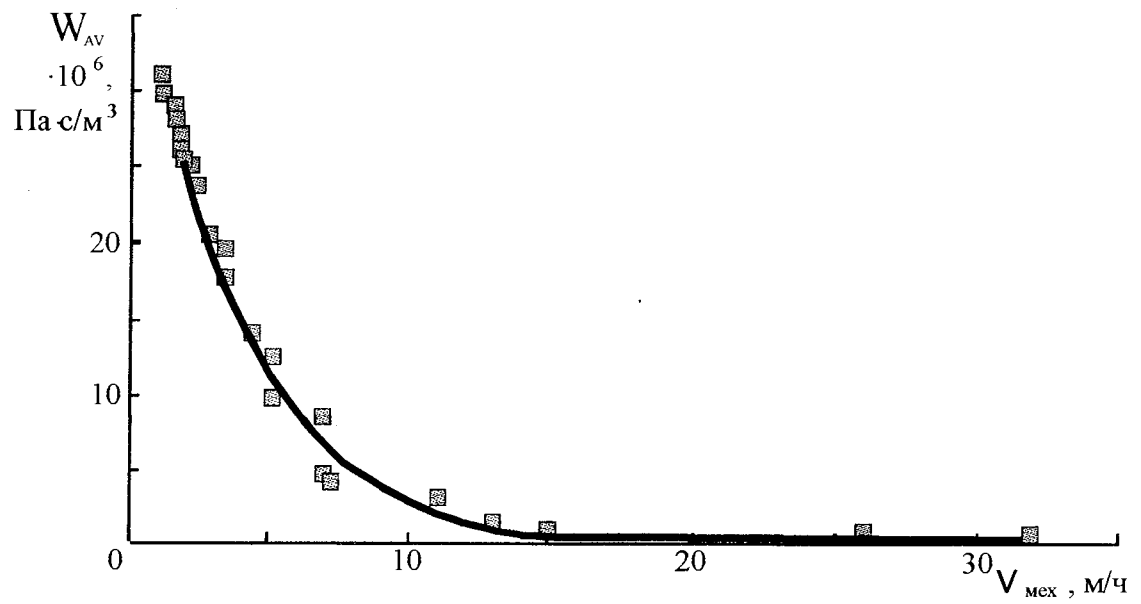
$$H_k = a \cdot e^{(-W_{AV}/b)}.$$

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 01А3-59 (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 краснополосчатому кварцитам. Оработка коронок производилась на объектах ПГО "Севзапгеология", ПГО "Южукргеология", ПГО "Донбассгеология" и ряде других геологических

а



б

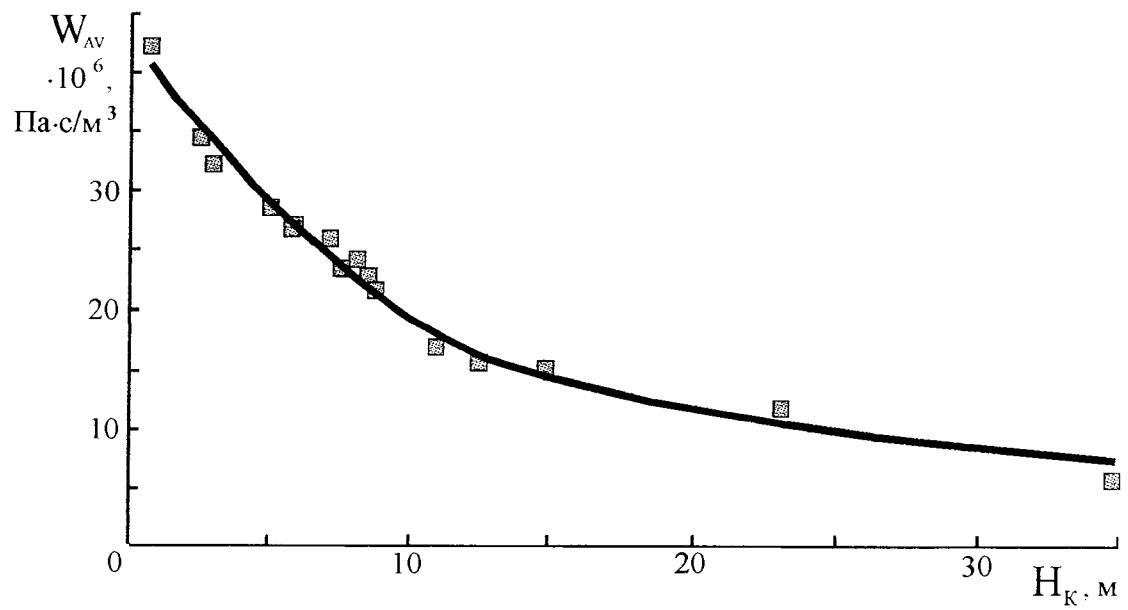


Рис. VI.8. Зависимости удельной акустической энергии W_{AV} от механической скорости бурения $V_{\text{мех}}$ коронкой 01A3-59 (а) и ресурса H_K коронки 01A3-59

организаций Мингео СССР. Зависимость между ресурсом H_k коронки 01А3-59 и W_{AV} аппроксимирована функцией: $H_k = 5,9 \cdot 10^6 + 37,3 \cdot 10^6 \cdot e^{(-W_{AV}/10,2)}$ (рис. VI.8 б). Зависимость расхода алмазов q при бурении коронкой 01А3-59 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 поддиапазонов (табл. VI.12). Группирование горных пород по категориям по W_{AV} качественно совпадает с группированием горных пород в классификации ЕНВ.

Таблица VI.12

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

Категория (группа) горных пород по буримости ЕНВ	Диапазон изменения W_{AV} , $\times 10^6$ $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$
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

Классификация некоторых типичных представителей горных пород по категориям буримости ЕНВ и по показателю W_{AV} приведена в табл. VI.13. Первая категория 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 породы (сланцы глинистые и др.). Шестая - седьмая категории формируются за счет осадочных (известняк), вулканогенно-осадочных (туфопесчаник, туф и др.) и метаморфизованных 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

Таблица VI.13

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

Категория (группа) пород по буримости ЕНВ	$W_{AV},$ $\times 10^6,$ $\text{Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$	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 железный (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	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)

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

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 $K_{абр}$, определяемых с помощью комплекта прибора ПОАП-2М. Показателем буримости является объединенный показатель ρ_m , рассчитываемый по формуле:

$$\rho_m = 3 F_d^{0.8} K_{абр}.$$

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

Генетические комплексы были представлены следующими горными породами.

О с а д о ч н ы е горные породы - пески, глины, супеси, суглинки, известняки, песчаники, доломит, гипс, мергель, аргиллиты, алевролиты и др.

В у л к а н о г е н н о - о с а д о ч н ы е горные породы - туфы различного состава, туфопесчаники, туфогравелиты, игнимбриты и др.

М а г м а т и ч е с к и е горные породы представлены интрузивными и эффузивными горными породами.

И н т р у з и в н ы е горные породы - граниты, гранодиориты, габбро, мигматиты, аплиты, гранито-гнейсы, кварц жильный и др.

Э ф ф у з и в н ы е горные породы - дациты, фельзиты, порфиристы, 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.Стеклянный, 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 образцов: 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, на-

блюдается 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, малопрочная и 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 $W_{AV} = f(p_m)$, рассчитанная по 93 образцам аппроксимирована линейной функцией $W_{AV} = 0,64p_m + 7,06$ с коэффициентом корреляции $r = 0,87$ (рис. VI.9 а). 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, 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_{AV} и ρ_m отклонения в категории пород по буримости, определенной по двум методам для одного образца горной породы, имеют закономерный характер.

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

В целом, с ростом коэффициентов F_d и $K_{абр}$ происходит увеличение показателя W_{AV} (рис. VI.9 б и в).

Зависимость между показателем W_{AV} и коэффициентом динамической прочности F_d (рис. VI.9 б) выражена слабо. При линейной аппроксимации коэффициент корреляции $r = 0,64$. Отклонение зависимости $W_{AV} = f(F_d)$ от линейной возникает

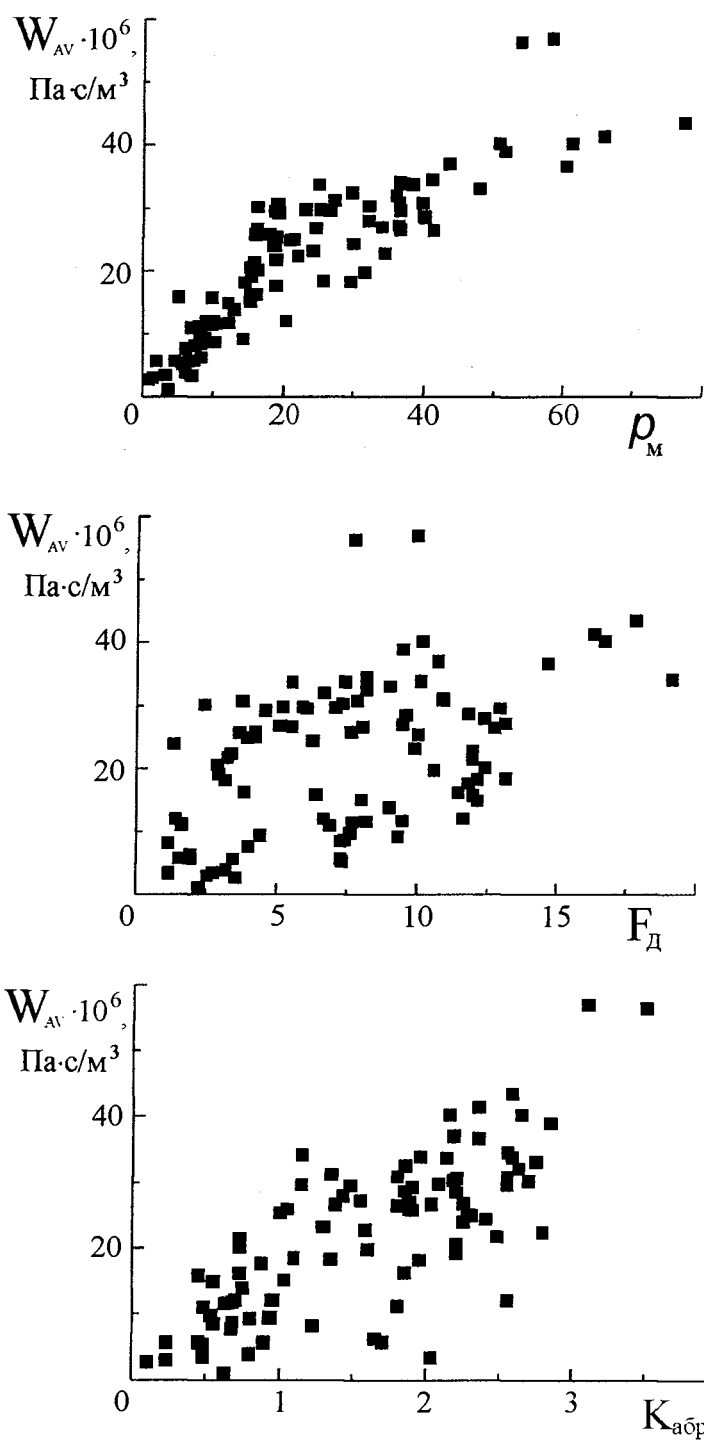


Рис. VI.3 Зависимости удельной акустической энергии W_{av} от показателей, определенных по методу ЦНИГРИ: объединенного показателя ρ_m (а), коэффициента динамической прочности F_d (б) и коэффициента абразивности $K_{абр}$ (в)

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_{AV} . 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_{AV} . В эту группу входят магматические и метаморфизованные магматические породы: различные граниты, гранито-гнейсы, гнейсы и др..

Зависимость между показателем W_{AV} и коэффициентом абразивности (рис. VI.9 в) выражена достаточно сильно. При линейной аппроксимации коэффициент корреляции $r = 0,76$. Отклонение зависимости $W_{AV} = f(K_{абр})$ 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 горной породы по методу ВИТР-А лучше согласуются с практикой 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 ГПП “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 кернового материала: необходимый объем пробы для проведения испытаний по методу ВИТР-А составляет 3-8 см керна 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.

§6. Классификации горных пород по формациям для выбора параметров породоразрушающего инструмента для бурения

В настоящее время продолжается интеграция экономики России в мировое сообщество, что обуславливает необходимость проведения работ по унификации стандартов и методических подходов к использованию технических средств и технологии бурения. Это позволит облегчить проникновение на мировые рынки отечественного инструмента и технологий, которые по качеству и надежности в большинстве не уступают зарубежным аналогам.

Сложившаяся за рубежом система выбора инструмента для бурения базируется на классификациях, типизирующих формации горных пород с близким характером их влияния на износ породоразрушающего инструмента. Ведущие зарубежные фирмы (Diamont Boart, Crealius, Christensen, ets.) имеют подобные классификации, которые в ряде случаев регламентируются и национальными стандартами.

Как уже отмечалось выше, термин “формация горных пород” с точки зрения технологии бурения скважин можно определить как *“совокупность горных пород, характеризующихся близким влиянием на износ породоразрушающего инструмента”*.

В силу ряда исторических причин в Российской Федерации в настоящее время отсутствует классификация, типизирующая формации горных пород. В значительной степени такая ситуация создавалась вследствие стремления в прошлые годы решить в первую очередь проблему классификации горных пород для планирования и нормирования буровых работ за счет создания интегрального показателя буримости.

Не отрицая необходимости продолжения попыток создания классификации на основе интегрального показателя, максимально связанного с техническими показателями бурения, следует отметить актуальность создания классификации для выбора породоразрушающего инструмента на основе типизации формаций горных пород.

Особенно остро отсутствие подобной классификации отражается в алмазном бурении. Затрудненность выбора конструктивных параметров алмазного инструмента на основе одного интегрального показателя, определяется тем, что рабочий слой коронок представляет собой композиционный материал, состоящий из двух разнородных материалов (алмазов и металлокерамического сплава), которые при бурении выполняют различные функциональные задачи. Высокая чувствительность алмазного инструмента к обработке в нерациональных условиях делает создание новой классификации актуальной задачей.

Для исправления существующей ситуации Министерством природных ресурсов РФ была поставлена комплексная задача разработать новую классификацию горных пород, унифицированную с аналогичными классификациями, используемыми ведущими зарубежными буровыми фирмами, и оптимизированный с ней типаж породоразрушающего инструмента.

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 [37]. 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 характере 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 породоразрушающего инструмента для бурения алмазным инструментом для бурения (табл. VI.14).

Для типизации формаций использованы показатели, влияние которых на износ инструмента доказано практикой бурения. Используются следующие показатели: твердость, абразивность, зернистость, трещиноватость, нарушенность, способность заполировывать алмазный инструмент.

Твердость - способность горной породы сопротивляться внедрению в нее другого тела.

Абразивность - способность горной породы изнашивать породоразрушающий инструмент в процессе бурения.

Зернистость - совокупность расположения частиц в горной породе, которые могут различаться по своему внутреннему строению, форме или размеру; по размеру частиц различают породы мелкозернистые (размер частиц до 1 мм), среднезернистые (размер частиц от 1 до 3 мм), и крупнозернистые (размер частиц свыше 3 мм).

Трещиноватость - совокупность трещин различного происхождения и разных размеров. Для определения степени трещиноватости горной породы предложено использовать удельную кусковатость керна K_y – число кусков керна на единицу его длины (шт/м) [119]; различают следующие степени трещиноватости горных пород – монолитные и слаботрещиноватые ($K_y = 1...10$ шт/м), трещиноватые - ($K_y = 11...30$ шт/м), сильнотрещиноватые - ($K_y > 31$ шт/м).

Нарушенность – осложненность массива горной породы геологическими нарушениями. К нарушениям можно отнести разрывы и складки, внедрение магматических тел, пливуны, карсты и др. Влияние нарушенности массива горной породы на проходку скважины связано с появлением осложнений в виде поглощений промывочной жидкости, обрушения стенок скважины, необходимости разбурки завалов и т.д.

Способность заполировывать алмазный инструмент - свойство горной породы (механизма разрушения горной породы) создавать при разрушении условия, способствующие заполированию алмазного инструмента

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 “Южукргеология”, 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 высокой W_{AV} и низким K_p . Отличительной особенностью механизма разрушения “полирующих” горных пород является насыщенность спектра высокочастотными составляющими. Типичными представителями “полирующей” формации являются яшмы, джеспилиты и кремень.

В предлагаемой классификации (табл.VI.14, гр. 1-3) устанавливается 8 формаций горных пород. Графы 4-10 таблицы характеризуют формации горных пород по физико-механическим свойствам и степени трещиноватости. В графе 11 приведены рекомендуемые типы породоразрушающего инструмента, обеспечивающие самозатачиваемость коронки и снижение вероятности развития аномальных видов износа. Коды формаций изменяются от 1 до 8. Код формации является номером ссылки, которую можно использовать для сравнения с кодовой системой каждого производителя технических средств бурения. Изготовитель инструмента выбирает номер кода, который наиболее подходит к его продукции.

Таблица VI.14

Классификация горных пород по формациям и рекомендуемые типы промышленно освоенных коронок

Код	Характеристика горных пород формации	Типичные представители горных пород формации	Физико-механические свойства горных пород					Категория по буримости ЕНВ	Степень трещиноватости (удел. кусковатость керна, шт/м)	Рекомендуемые типы промышленно-освоенных коронок
			Акустические параметры механизма разрушения			Твердость по штампу Р _ш , МПа	Абразивность α, мг (К _{абр})			
			W _{AV} x 10 ⁶ , Па·с/м ³	K _p x 10 ⁻² , Па/Вт	Тип спектра					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Мягкие	Ил, торф, глина, гипс, суглинок, уголь, мягкий, известняк, очень мягкий песчаник, эвапориты, латериты	<1	<1	НЧ	<1000	<5 (-)	I-IV	-	СМ СА 01КТ
2	Мягкие и средней твердости, перемежающиеся	Песок, песчаник слабый, мягкий сланец, соль, алевролит, аргиллит, гипс плотный, доломит, мармитовые железные руды, мерзлая почва, антрацит, апатитовая руда	<4	<3	НЧ	<1000	5-10 (<0,5)	V-VI	-	16А3СВ 15А3СВ КРК 03КС 05КС КСК
3	От средней твердости до твердых, абразивные, средне и крупно зернистые, трещиноватые	Песчаник, пегматит, конгломерат, выветрелые граниты, риолит, сиенит, диорит, кератофир, кварц касситеритовая порода	12-26	>5	СЧ-ВЧ	1000-2000	45-65 (2,0-2,5)	VI-VII	Трещиноватые (11-31)	07А3 16А3СВ 15А3СВ КРК 03КС 05КС 02ИЗГ 02И4Г

Продолжение таблицы VI.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	От средней твердости до твердых, среднеабразивные, средне и крупнозернистые, слаботрециноватые и монолитные	Пегматит, биотитовый гнейс, габбро, монзонит, гранодиорит, сиенит, гранит, пироксенит, миаскит, перидотит, песчаник, кремнистый сланец, мелкогалечный конгломерат, уртит, йолит	12-16	>4	СЧ	2000-3000	30-45 (1,5-2,0)	VII-VIII	Слаботрециноватые (6-10)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г 07А3
5	Твердые, мелко-среднезернистые, монолитные	Микрогранит, андезит, аплит, базальт, липарит, гнейс, диабаз, порфирит, березит, гранодиорит, долерит, оливинит, порфирит, березит, тонкозернистая зеленокаменная порода.	21-26	<5	ВЧ	3000-4500	18-45 (1,0-2,0)	VIII-IX	Монолитные (1-5)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г
6	Очень твердые, монолитные, мелкозернистые, неабразивные, полирующие	Кварцит, железистый кварцит, таконит, роговик, аплит, диорит, ороговикованный тонкозернистый альбитофир, мелкозернистый амфиболит, адамеллит, кремненные песчаники и сланцы	26-31	<3	ВЧ	4500-6000	18-30 (2,0-2,5)	X-XI	Монолитные (1-5)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г
7	Сверхтвердые, монолитные, мелкозернистые, неабразивные, полирующие	Кварц сливной, джеспилит, кремнистый сланец, яшма, кремнь, микрокварцит, роговик кремненный	> 31	<3	ВЧ	6000-8000	10-18 (2,5-3,0)	XI-XII	Монолитные (1-5)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г
8	Сверхаабразивные, средне и крупнозернистые, сильно трещиноватые, нарушенные	Песчаник кварцевый, гранит, кварцит, гранатовый гнейс, эгириновый сиенит, окварцованные и кремненные сланцы, пегматит	16-31	>5	СЧ-ВЧ	2000-6000	65-90 (2,0-3,0)	VII-XI	Сильнотрещиноватые (>31)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г 07А3

Формация с кодом 1 формируется за счет мягких горных пород. Типичными представителями являются: ил, торф, глина, гипс, мел, мягкий известняк, очень мягкий песчаник, эвапориты, латериты, песок.

Формация с кодом 2 формируется за счет мягких и средней твердости, перемежающихся горных пород. Типичными представителями являются: песок, песчаник слабый, мягкий сланец, соль, алевролит, аргиллит, гипс плотный, доломит, маритовые железные руды, мерзлая почва, антрацит, апатитовая руда. Формации 1 и 3 являются областью применения твердосплавного инструмента. Выделение только двух формаций основано на опыте ВИТР в бурении осадочных горных пород. Как правило, разрезы скважин, проходимых в осадочной толще, характеризуется значительной перемежаемостью горных пород, что делает достаточно сложным использование узкоспециализированного твердосплавного инструмента.

Формация с кодом 3 формируется за счет средней твердости до твердых, абразивных, средне и крупно зернистых, трещиноватых горных пород. Типичными представителями являются: песчаник, пегматит, конгломерат, выветрелые граниты, риолит, сиенит, диорит, кератофир, кварц-касситеритовая порода.

Формация с кодом 4 формируется за счет от средней твердости до твердых, среднеабразивных, среднекрупнозернистых, монолитных или слаботрещиноватых горных пород. Типичными представителями являются: пегматит, габбро, монзонит, гранодиорит, сиенит, гранит, пироксенит, гнейс, миаскит, перидотит, лабрадорит, песчаник, кремнистый сланец, мелкогалечный конгломерат, биотитовый гнейс, йолит, уртит.

Формация с кодом 5 формируется за счет твердых, мелко и среднезернистых, монолитных горных пород. Типичными представителями являются: микрогранит, андезит, базальт, гнейс, диабаз, порфирит, березит, диабаз, гранодиорит, аплит, долерит, оливинит, порфирит, березит, липарит, тонкозернистая зелено-каменная порода.

Формация с кодом 6 формируется за счет очень твердых, монолитных, мелкозернистых, неабразивных, полирующих горных пород. Типичными представителями являются: кварцит, железистый кварцит, таконит, роговик, аплит, диорит, ороговик, ороговикованный тонкозернистый альбитофир, мелкозернистый амфиболит, адамеллит, окремненные песчаники и сланцы.

Формация с кодом 7 формируется за счет сверхтвердых, монолитных, мелкозернистых, неабразивных, полирующих горных пород. Типичными представите-

лями являются: кварц сливной, джеспилит, кремнистый сланец, яшма, кремнь, микрокварцит, роговик окремненный .

Формация с кодом 8 формируется за счет сверхабразивных, средне и крупнозернистых, сильнотрещиноватых, нарушенных горных пород. Типичными представителями являются: песчаник кварцевый, гранит, кварцит, гранатовый гнейс, эгириновый сиенит, окварцованные и окремненные сланцы, пегматит.

Специально выделена формация с кодом 8, в которой из-за нарушенности массива и абразивности горных пород происходит повышенный износ алмазного инструмента. Эта формация по составу и свойствам горных пород является (в отличие от других) комплексной, так в ней отражено несколько равнодоминирующих признаков по их влиянию на процесс бурения.

Формации 3-8 являются областью применения алмазного инструмента. В целом с ростом кода формации происходит увеличение твердости, уменьшение зернистости, снижение нарушенности и трещиноватости, увеличение способности к заполированию алмазного инструмента.

Отнесение горной породы к определенной формации производится после определения показателей трещиноватости, парметров механизма разрушения (или) твердости, абразивности и зернистости в соответствии с табл VI.14..

Для широкой апробации классификации в адрес производственно-геологических организаций в 1999 г. были направлены методические рекомендации "Классификация горных пород по формациям и типаж породоразрушающего инструмента" (авторы: Архипов А.Г., Блинов Г.А, Курочкин П.Н.). Классификация получила одобрение в ведущих производственно-геологических организациях, в числе которых ГГП "Невскеология", Печенгской КГРЭ ГМК "Печенганикель" и др. В настоящее время классификация горных пород по формациям является основой для постановки работ для разработки новых матричных композиций.

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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате исследований сделаны следующие основные выводы и рекомендации по направлению дальнейших работ.

1. В диссертационной работе решена научная проблема формирования нового уровня представлений о физике процессов, протекающих на забое при алмазном бурении, на основе использования нетрадиционного информационного канала – акустических спектров, регистрируемых в призабойной зоне бурящейся скважины.

2. Акустико-спектральная диагностика забойных процессов является самостоятельным научно-прикладным направлением в области техники и технологии бурения скважин, предназначенным для получения объективных данных о механизме бурения для решения практических задач бурения.

3. Наиболее значимым результатом исследований, открывшим новые возможности для контроля и понимания физической сущности феномена разрушения, стало выделение в акустическом спектре в диапазоне частот 7-20 кГц “акустического шума разрушения” горной породы, параметры которого связаны с циклическим характером взаимодействия алмазов с забоем.

4. В качестве необходимых информативных параметров механизма бурения должны использоваться акустический спектр и коэффициент распределения энергии при разрушении, представляющий отношение мощности акустического шума разрушения к реализуемой мощности.

5. В результате исследований экспериментально доказана связь информативных параметров с конструктивными параметрами, состоянием и интенсивностью износа алмазного инструмента, прочностными свойствами горных пород, режимом и техническими показателями бурения. На основе акустико-спектральных измерений в призабойной зоне разработаны принципиально новые технические средства и технологии ускоренных стендовых испытаний и оценки качества алмазного инструмента, дифференциации геологического разреза в процессе бурения, определения прочности и буримости горных пород.

6. Разработанный метод испытаний горных пород, включающий воздействие на образец горной породы вращающимся алмазным инструментом и измерение при разрушении в призабойной зоне акустического спектра в диапазоне частот 7-20 кГц и коэффициента распределения энергии открывает новые возможности в об-

ласти классификации горных пород по сопротивляемости механическому разрушению.

7. Удельная акустическая энергии W_{AV} , выделившаяся в диапазоне частот 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы представляет качественно новое свойство горной породы - "прочность на воздействие вращающимся инструментом" и может использоваться в качестве показателя буримости горных пород

8. Дальнейшими задачами развития АСДЗП следует считать:

- более глубокое проникновение в феномен разрушения горных пород алмазным бурением, за счет внедрения информационных технологий на базе мощных компьютеров; компьютерное моделирование механизма разрушения и процесса испытаний породоразрушающего инструмента;

- создание нового поколения технических средств и технологий, реализующих возможности АСДЗП в областях управления процессом бурения, дифференциации геологического разреза в процессе бурения, проектировании и испытаниях алмазного инструмента, испытании образцов горных пород на базе технологии "виртуальных приборов", использующей возможности современных компьютеров;

- продолжение исследований разрушения горных пород бурением, в том числе твердосплавными коронками и шарошечными долотами для развития представлений о физической природе феномена разрушения;

- исследование возможности применения АСДЗП в других областях, связанных с использованием горных пород и руд, в частности для прогноза рудоносности, обогатимости и механической обрабатываемости горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуладзе А.М., Аббасов И.К. Тепловые явления, возникающие при бурении алмазными долотами. - Нефт.хоз-во, 1968, №3, с 3-5.
2. Абрамсон М.Г., Байдюк Б.В., Зарецкий В.С. и др. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. М., Недра, 1984.
3. Авдеев С.А., Ивашев В.К., Рудакова Н. П. Исследование свойств разбуриваемых горных пород с помощью акустических датчиков. - В сб.: Повышение эффективности и информативности технологии алмазного бурения скважин малого диаметра на твердые полезные ископаемые. Л., ВИТР, 1989, с. 68-75.
4. Айрапетов В.Л., Андрианов В.Р., Веремейкин В.Г. и др. Контроль параметров процесса бурения. М., Недра, 1973.
5. Алексеев В.Н. Резервы совершенствования систем "буровой снаряд - скважина" - В сб. Высокопрочные бурильные трубы для прогрессивных способов бурения. Л., ВИТР, 1988, с.5-14.
6. Алиев М.Б., Гасанова Т.Н, Рукавицын В.Н. О сейсмоакустических исследованиях скважин в процессе бурения. - " Азерб. нефт. хозяйство", 1985, №1, с. 7-9.
7. Андреев С.Е. Законы дробления. - Горный журнал, 1952, №7, с.36-38.
8. Архипов А.Г., Андреев О.С. Исследование распространения импульса упругих колебаний по колонне бурильных труб.- В сб.: Повышение эффективности и информативности технологии алмазного бурения скважин малого диаметра на твердые полезные ископаемые. Л., ВИТР, 1989, с.60-67.
9. Архипов А.Г., Андреев О.С. Исследование затухания высокочастотных упругих колебаний в колоннах бурильных труб различных конструкций.- В сб.: Методика и техника разведки, №3 (141). СПб., ВИТР, 1994, с. 62-68.
10. 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.
11. Архипов А.Г., Авдеев С.А., Андреев О.С., Шатров Б.Б. Исследование возможности контроля состояния коронки при бурении на основе акустических измерений. - В сб.: Автоматизация процесса бурения на геологоразведочных работах. Л., ВИТР, 1991, с.51-56.

12. *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.

13. *Архипов А.Г.* Оценка механизма разрушения горной породы при бурении алмазными коронками на основе спектрального анализа акустического поля. - В сб.: Тезисы докладов 2-го межд. симп. по бурению разведочных скважин в осложненных условиях. СПб, 1992, с.82.

14. *Архипов А.Г., Шатров Б.Б.* Перспективы использования акустических измерений при испытаниях серийно выпускаемого алмазного породоразрушающего инструмента. - В сб.: Методика и техника разведки, №3 (141). СПб., ВИТР, 1994, с.69-72.

15. *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., СПГГИ, 1993.

16. *Архипов А.Г., Шатров Б.Б.* Новое направление развития технических средств для определения буримости горных пород. - В сб.: Методика и техника разведки, №2 (140). СПб., ВИТР, 1993, с.91-98.

17. *Архипов А.Г., Шатров Б.Б.* Акустический метод исследования геологического разреза в процессе бурения. - В сб.: Методика и техника разведки, №5 (143). СПб., ВИТР, 1995, с.41-46.

18. *Архипов А.Г.* Перспективы использования акустических измерений при испытаниях серийно выпускаемого алмазного породоразрушающего инструмента. В сб.: Методика и техника разведки, №3 (141). СПб., ВИТР, 1994, с.69-72.

19. *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, №4 (142). СПб., ВИТР, 1995, с. 38-41.

20. *Архипов А.Г.* Метод оценки сопротивляемости горных пород разрушению на основе параметров вызванной акустической эмиссии. - В сб.: Тезисы докладов 3-го межд. симпозиума по бурению скважин в осложненных условиях. СПб., СПГГИ, 1995, с.79.

21. *Архипов А.Г.* Диагностика состояния алмазного породоразрушающего инструмента в процессе бурения по акустическому спектру.- В сб.: Тезисы докладов науч.-техн. конференции "Диагностика. Информатика. Метрология -95". СПб., 1995, с.64.

22. *Архипов А.Г.* Контроль качества алмазных кругов и управление процессом резания по акустическому спектру. В сб.: Тезисы докладов науч.-техн.конференции "Диагностика, Информатика. Метрология. Экология. Безопасность. -96". СПб., 1996, с.118.

23. *Архипов А.Г.* Проблемы оценки буримости горных пород. - В сб.: Тезисы докладов V межд. горно-геологического форума. СПб,1997, с.40-41.

24. *Архипов А.Г.* Физическая диагностика механизма разрушения горных пород при бурении. - В сб.: Тезисы докладов 4-го межд. симпозиума по бурению скважин в осложненных условиях. СПб., СПГГИ, 1998, с.89.

25. *Архипов А.Г.* Новый метод определения прочности горных пород. В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1998, №8(146), с.103-114.

26. *Арцимович Г.В., Поладко Е.П., Свешников И.А.* Исследование и разработка породоразрушающего инструмента для бурения. - Новосибирск: Наука, 1978.

27. *Арцимович Г.В.* Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. Новосибирск, Сибирское отд.изд-ва "Наука",1985.

28. *Афанасьев И.С., Горбушин А.П., Лебедев В.Н.* Опыт скоростного геолого-разведочного бурения. Л., Недра,1986. 96с.

29. *Бакуль В.Н. и др.* 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.

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

31. *Барон Л.И., Кузнецов А.В.* Механические и абразивные свойства горных пород. М.,1958.

32. *Башкатов Д.Н., Хромин Е.Д., Вареца С.А.* Нестационарность забойных процессов в алмазном бурении. – В сб.науч.тр. СПб.: ВИТР, 1992, с.46-53.

33. *Беляков В.И., Блинов Г.А., Григоренко П.М. и др.* Изучение электрических явлений, возникающих на забое скважины в процессе бурения, с целью получения информации о буримых породах. Отчет по теме Г.П.5/300 138-2/45-П. № гос.рег. 72018724. Л., ВИТР, инв.№ 184/1, 1973, 291 с..

34. *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, возни-

кающих на забое в процессе бурения скважин. Отчет по теме Г.П.5/300 138-2/45-И. № гос. рег. 72018724 Л., ВИТР, инв. №198/1, 1975, 92 с.

35. *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.

36. *Беляков В.И., Блинов Г.А., Иванов О.В., Комарова З.В.* Способ определения горных пород в процессе бурения скважин. - В сб.: Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1979, с.36-41.

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

38. *Блинов Г.А., Васильев В.И., М.И.Исаев и др.* Справочник по алмазному бурению геологоразведочных скважин. Л., Недра 1975, 296с.

39. *Богданов Р.К., Иванов В.В., Цыпин Н.В., Поладко Е.П.* Износостойкость коронок, импрегнированных алмазами различной зернистости. - Синтетические алмазы, 1977, №1, с.14-15.

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

41. *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.

42. *Бугаев А.А.* Исследование и разработка коронок, импрегнированных синтетическими алмазами, и эффективности их применения при бурении геологоразведочных скважин. Автореф. дис.канд.техн.наук. М., 1970.-29с.

43. *Булатова Ж.М., Волкова Е.А., Дубров Е.Ф.* Акустический каротаж. Л., Недра, 1970, 264с.

44. *Быкова Н.В., Горин В.Н.* Уточненная классификация горных пород по буримости для механического вращательного бурения скважин (проект). Л., ВИТР, 1965.

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

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

47. *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.

48. *Васильев В.И., Блинов Г.А., Пономарев П.П. и др.* Инструктивные указания по алмазному бурению геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые. Л., ВИТР, 1987, 248с.

49. *Васильев Ю.Н., Бесклетный М.Е., Изгуменцов Е.А. и др.* Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. М., недра, 1987, 197.

50. *Вейбулл В.* Усталостные испытания и анализ результатов. М., Машиностроение, 1964, 275 с.

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

52. *Винник Э.М., Свешников И.А., Фадеев В.Ф., Арцимович Г.В.* К вопросу о механизме формирования зоны предразрушения горных пород при алмазном бурении. - В кн.: Процессы разрушения горных пород и пути ускорения бурения скважин. Уфа: БашНИПИНефть, 1979, с.171-178.

53. *Воздвиженский Б.И., Васильев М.Г.* Буровая механика. 3 изд-е. М., Гос. науч.-тех. изд-во литературы по геологии и охране недр, 1954.

54. *Воробьев Г.А., Новожилов Б.А., Вареца С.А.* Режимы работы алмазной коронки и их исследование с помощью скоростной киносъемки. - "Изв. Вузов. Геол. и разведка", 1989, №9, с. 123-128.

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

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

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

58. *Горшков В.К., Гореликов В.Г.* Температурные режимы алмазного бурения. М., Недра, 1992.

59. *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.

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

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

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

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

64. Гуреев И.Л., Копылов В.Е. Прибор- индикатор скорости вращения долота ИВД - 1. - "Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности", 1973, №2, с. 23-27.

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

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

67. 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.И.И/130И, Л, ВИТР, 1970, 70 с.

68. Дортман Н.Б. Петрофизика. Т.1.- М., Недра, 1992.-391с.

69. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). М., Недра, 1984, 455 с.

70. Друкованый М.Ф., Дубнов Л.В., Миндели Э.О. и др. Справочник по буровзрывным работам. М., Недра, 1976.

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

72. 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.

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

74. 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.

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

76. *Исаев М.И., Ширко Г.И., Быченков Е.И.* Заполирование алмазов в буровых коронках и пути его предупреждения (рекомендации). Л., ВИТР, 1972.

77. *Каминг Д.Д.* Руководство по алмазному бурению. М., Гос. науч.-тех.изд. по геологии и охране недр, 1960.

78. *Касаточкин А.В. и др.* Перспективы применения синтетических поликристаллических материалов в железобетонных конструкциях. — В сб.Труды ВНИИ-АЛМАЗА, 1976, №4, с.78-82.

79. *Качество продукции, испытания, сертификация.* Терминология: Справочное пособие.- Вып.4.- М.: Изд-во стандартов, 1989, 144 с.

80. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. - М., Атомиздат, 1976, 1005 с.

81. *Кичигин А.Ф., Игнатов С.Н., Климов Ю.И., Ярема В.Д.* Алмазный инструмент для разрушения твердых горных пород. М., Недра, 1980, 159с.

82. *Козловский Е.А.* Оптимизация процесса разведочного бурения. М., Недра, 1975, 304с.

83. *Копылов В.Е.* О нелинейной зависимости механической скорости алмазного бурения от вращения коронки. - В кн.: Бурение скважин и трубопровод. трансп. нефти и газа. Тюмень, 1969, с.66-68.

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

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

86. *Крагельский И. В., Добычин М.Н., Комбалев В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М., Машиностроение, 1977.

87. *Крагельский И. В.* Трение и износ - М.: Машиностроение, 1977.

88. *Краткий терминологический словарь* по техники и технологии разведочного бурения. Под ред. Волосюка Г.К., Уткина И.А. Л., ВИТР, 1965.

89. *Кувыкин С.И., Латынов Э.К., Кагарманов Н.Ф., Баландин П.С.* Исследование процессов разрушения горных пород и проектирование рациональных режимов алмазного бурения. - Тр. Уф.НИИ, 1965, вып.16, с.133-147.

90. *Кузнецов О.Л., Мигунов Н.И.* К определению местоположения забоя скважины по данным наземных геоакустических наблюдений. - В. кн.: Геоакустиче-

ские исследования в скважинах. Труды ВНИИЯГТ, вып.18. М., ОНТИ ВНИИЯГТ, 1974, с.46-52.

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

92. 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.

93. Курочкин П.Н. Влияние конструктивных элементов алмазного бурового инструмента на его стойкость и механическую скорость. Авт.канд. дисс. Л., 1965.

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

95. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях М., Недра, 1987.

96. Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов в алмазных кругах. М., Машиностроение, 1967.

97. Лоладзе 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.

98. Лукьянов Э.Е. Исследование скважин в процессе бурения. М., Недра, 1979.

99. Любимов Н.И. Классификация горных пород и рациональное применение буровой техники. М., Недра, 1977.

100. Любимов Н.И., Носенко Л.И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М., Недра, 1978.

101. 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.

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

103. Марамзин А.В., Блинов Г.А. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ. Л., Недра, 1977, 248с.

104. Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протодьяконов М.М. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М., Недра, 1975.

105. Мельничук И.П., Сегаль В.А. Бурение алмазными долотами за рубежом. - В кн. Опыт бурения алмазными долотами нефтяных и газовых скважин. М.: ВНИИОЭНТ, 1966, с.113-128.

106. Моисеенко У.И. Теплофизические свойства горных пород и глубинные температуры. Физические процессы горного производства. - 1982, №12, с.30-36.

107. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. - Л., Недра, 1986.

108. Молчанов А.А. Измерение геофизических и технологических параметров в процессе бурения скважин. М., Недра, 1983, с.189.

109. Мухин М.Е. и др. Прочностные свойства алмазов марки различной прочности – Науч. труды рег.совещ. «Алмазы и сверхтвердые материалы», 1974, №8, с.4-6.

110. Мэзон У. Физическая акустика. Пер.с англ. М.1968

111. Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов и изделий с использованием эмиссии волн напряжения.- Тезисы докл. Всес. науч.-техн. семинара. Хабаровск.1972.

112. Неразрушающий контроль материалов изделий и сварных соединений. - Тезисы докл.VII Всес. науч.-техн.конф..Киев,13-15 мая 1974. М.,НТО "Прибор-пром",1974.

113. 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.

114. Отчет о НИР. Исследование физических явлений, возникающих на забое скважины для получения геологической информации в процессе бурения. (заключительный). Тема Х1Х Н.1./0.1 88-2/384. Авторы: Шатров Б.Б., Андреев О.С., Архипов А.Г. и др. № гос.рег. 01830062080, Л., ВИТР, 1986.

115. Отчет о НИР. Разработать акустическую аппаратуру для исследования геологического разреза в процессе бурения скважин (заключительный). Договор №203. Авторы: Шатров Б.Б., Андреев О.С., Архипов А.Г. и др. № гос.рег. 01890018418, Л., ВИТР, 1991.

116. 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, опубл. 07.07.91, Бюл. №25.

117. *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.

118. *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.

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

120. *Пономарев П.П., Притула Э.К.* Влияние трещиноватости горных пород на работоспособность алмазных коронок и выход керна. - В кн.: Методика и техника разведки, Л., ВИТР, 1976, №107, 42-47.

121. *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.

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

123. *Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др.* Селективное разрушение минералов. М., Недра, 1988.

124. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. 4-е изд.. -М., Недра, 1984, 359 с.

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

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

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

128. *Рукавицын В.Н., Кузнецов О.Л.* Способ определения кривизны буровой скважины. Авт. свид. №286890 (СССР). Оpubл. "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1970, №35, с.8.

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

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

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

132. Рукавицын В.Н. Прогнозирование физико-механических характеристик горных пород по результатам акустических измерений в процессе бурения. - Тезисы докл. 4 Всес. науч.-техн. конф. "Разрушение горных пород при бурении скважин", М., 1986.

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

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

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

136. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства элементов.- Киев, Наукова Думка, 1965.

137. Свешников И.А. Исследование режимов ударно-вращательного бурения и разработка породоразрушающего инструмента. Автореф. канд. дисс.- Донецк, 1968.

138. Серенсен С.В., Козлов Л.А., Граф М.Э. Машины для испытания на усталость. М., Машгиз, 1957.

139. Ступкина Л.М. Влияние полирования поверхности алмазов на их прочность при одноосном сжатии. - Методика и техника разведки. Л., ОНТИ ВИТР, 1975, №96, с.5-8.

140. Ступкина Л.М. Исследование прочности алмаза при воздействии ударных нагрузок. - В кн.: Кристаллография. М., Наука, 1970, т.15, №4, с.841-844.

141. Сукманов Г.И., Геворков Г.С. Исследование фракционного состава бурового шлама при бурении в стендовых условиях.- Тр. ВНИИБТ, 1973, №31, с.54-57.

142. Сулакшин С.С. Технология бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1975.

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

144. Толкачев Г.М. О влиянии вида промывки на механическую скорость проходки при алмазном бурении. - Разведка и охрана недр, 1964, №8, с.25-28.

145. 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.

146. Ужик Г.В. Методы испытаний металлов и деталей машин на выносливость. М., Изд-во АН СССР, 1948, 264 с.

147. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов. М., Изд-во стандартов, 1984.

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

149. Цыпин Н.В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев. Наук.думка, 1983. -192с.

150. Шатров Б.Б., Рудакова Н.П., Архипов А.Г. и др. Метод акустических исследований геологического разреза в процессе бурения скважин. - Инф. листок о науч.-техн. достижениях, №89-10, серия Р-29.37.23. ОНТИ ВИЭМС, 1989.

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

152. Шатров Б.Б., Андреев О.С., Рудакова Н.П., Стрыгин Д.М. Исследование геологического разреза по акустическим частотным спектрам горных пород в процессе бурения. - В сб.: разработка и совершенствование методов и средств оптимизации и автоматизации процессов алмазного бурения. Л., ВИТР, 1988, с.72-79.

153. 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.

154. *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.

155. *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.

156. *Bulletin "Longyear" B-3100B* 10 M., 1995

157. *Diamont Boart Craelius* product catalogue. Part2. Printed matter №110 175/2, 1990.

158. *Drill-string vibrations* give instantaneous formation log. Oil and gas J. 1971. v.69, №45 p.62.

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

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

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

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

163. *Hughes M.D.* Efficient penetration in diamond drilling. Mindrill, Bits and Pieces, 1967, vol.19, №6.

164. *IDR.* Okt. 1975, p.363-365.

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

166. *Kocuncu R.M., Mc.Cabe W.M., Lord A.E.* Overview of acostic emission monitoring of rock structures. Rock mechanics. 1981, v.14, №1 249-259.

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

168. *Lutz J., Raynaud M., Gstalder S. and etc.* Instantaneous logging based on dynamic theory of drilling. "J.Petrol Technol" 1972, v.24, p.750-758.

169. *Marx C.* Diamond bits and their use in shallow holes. "Cristensen Diamond Products Co", 1970.

170. *Marcus C.* Investigation of rock driling with diamond bits. Doctorate thesis. Faculty for mining, Metallurgy and Mechanical engineering of Technical University of Claustal. 1973. 165 p.

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

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

173. *Schlossin M.M.* Cutting action wear and fracture of diamond. - Diamond Res., 1969, p.16-28.

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

175. *Seal M.* The abrasion of diamond.- Proc. Roy. Soc. London, 1958, 248, №1254, p.379-393.

176. *Tooling*, 1975, V.29, p. 36-43.

177. *Volume DCDMA*, 1995.

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

179. *Yarnitsky Y.* Mechanical mechanism of diamond wear. - In: Proc. Intern. Ind. diamond conf. Chicago, 1969, p.237-239.