А.Г.АРХИПОВ
Всероссийский НИИ методики и техники разведки, Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И АБРАЗИВНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО СПЕКТРУ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ БУРЕНИИ И РЕЗАНИИ

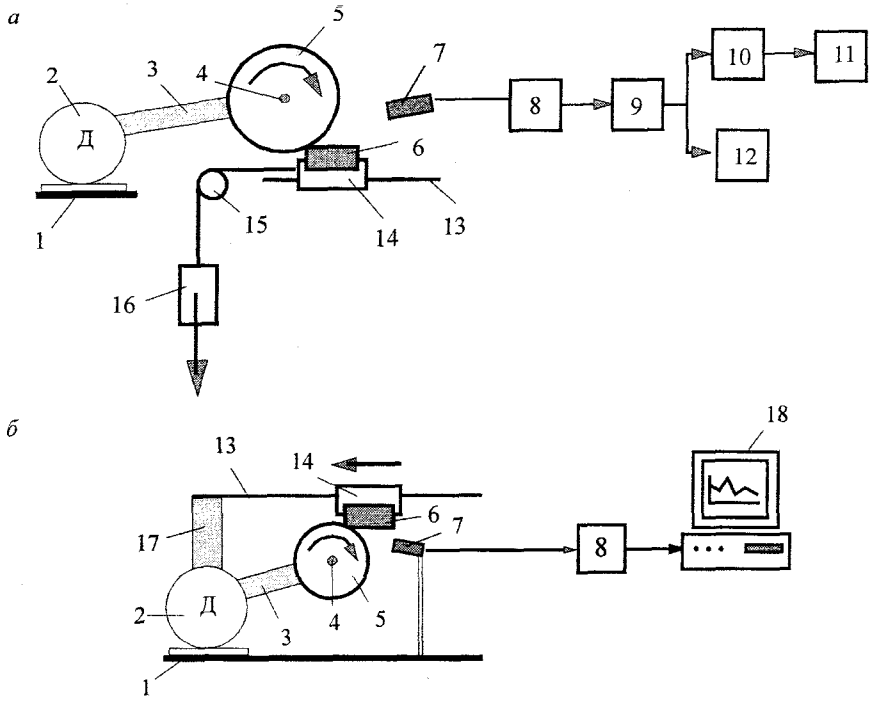
Для инструментального определения прочности, категории по буримости и абразивности горных пород в лабораторных условиях предложено несколько методов [4-6]. Для определения прочности и буримости горной породы широко применялся метод Л.А.Шрейнера, а в геологоразведочном бурении наибольшее распространение получил метод ЦНИГРИ, разработанный Н.И.Любимовым. Абразивность горных пород определяется, в основном, по степени износа эталонного материала (стержней, колец и др.) при взаимодействии (трении, сверлении, резании) с образцом горной породы. Наибольшее распространение в бурении получили методы оценки абразивности, предложенные Н.И.Любимовым и Л.И.Бароном и А.В.Кузнецовым. Применение указанных методов, несомненно, сыграло положительную роль в изучении и типизации механических свойств горных пород. Однако, как следует из опубликованных материалов [5], 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 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.

В ВИТРе разработан метод акустико-спектральной диагностики буримости горной породы (метод ВИТР-А) [1]. Суть метода заключается в воздействии на образец горной породы вращающимся алмазным инструментом и измерении при разрушении в призабойной зоне спектра акустического шума разрушения в диапазоне частот 7-20 кГц, скорости разрушения и реализуемой мощности. Акустический шум разрушения возникает в призабойной зоне в связи с упругой деформацией горной породы резцами инструмента и развитием трещин [2]. Отличительной особенностью метода ВИТР-А является использование показателей, характеризующих не свойство, а механизм разрушения горной породы в целом. Нагружение горной породы вращающимся инструментом позволяет использовать в качестве показателей буримости следующие информативные параметры механизма разрушения:

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 среднеквадратичное значение (СКЗ) звукового давления и средняя частота спектра f_A.

2. Удельная акустическая энергия W_{AV}, выделившаяся в диапазоне 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы, определяемая как отношение СКЗ звукового давления p^2 к объемной скорости разрушения горной породы υ: $W_{AV} = p^2 / \upsilon$.



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

3. Коэффициент распределения энергии при разрушении $K_р$, определяемый как отношение СКЗ звукового давления p^2 к мощности $N_р$, реализуемой при разрушении: $K_р = p^2 / N_р$.

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 возможность типизации формаций и групп горных пород, сходных по механизму разрушения.

С точки зрения технологии бурения скважин формацию горных пород можно определить как совокупность горных пород, характеризующихся близким влиянием на технические показатели бурения, в том числе на износ породоразрушающего инструмента.

Для испытаний образцов горных пород методом акустико-спектральной диагностики механизма разрушения в ВИТРе разработаны лабораторные технические средства (см. рисунок). 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 того, резание керна вдоль образующей позволяет избежать предварительной подготовки образца горной породы. Отбор образцов производится из керна горных пород, полученного при бурение вращательным способом. Длина образца (керна) 5-6 см при бурении коронками диаметром 46-93 мм.

Установка УОБ-1 (см. рисунок, *а*) состоит из модернизированного камнерезного станка СКР-1 (нагружающего блока) и измерительной системы (ИС). Механизм подачи станка состоит из подвижной каретки 14 с захватом образца горной породы, направляющей, ролика 15 и груза 16. Усилие подачи регулируется массой груза. При включении электродвигателя станка 2 враще-

ние посредством ременного передаточного механизма 3 передается на шпиндель 4 с алмазным кругом 5. После освобождения от фиксации подвижная каретка под действием груза перемещается 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. Параметры нагрузочного режима: частота вращения круга 500 мин$^{-1}$; усилие подачи 5 даН, расход охлаждающей жидкости 2 дм^3/мин. В состав ИС 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 (рисунок, *б*) состоит из нагружающего блока и компьютеризированной измерительной системы. При включении электродвигателя нагружающего блока вращение посредством ременных передаточных механизмов передается на шпиндель 4 с алмазным кругом 5 и подвижную каретку 14 с захватом образца горной породы. В результате подвижная каретка 14 и захват с образцом горной породы перемещаются с постоянной скоростью в направлении вращающегося алмазного круга 5. Резание производится кругом сегментной формы диаметром 100 мм. Глубина реза постоянна (6 мм), но может регулироваться при установке образца горной породы. Параметры нагрузочного режима: скорость относительного перемещения круга и образца горной породы 0,02 м/с; частота вращения круга 1400 мин$^{-1}$. Охлаждение круга осуществляется окунанием в емкость с технической водой. ИС включает персональный компьютер, комплекс программно-аппаратных средств, датчики и комплект соединительных кабелей. Для измерения воздушного шума использован микрофон М101, входящий в комплект измерителя шума и вибрации ВШВ-003, для измерения реализуемой мощности – измерительный преобразователь Е848/6-М1. Измерительная система осуществляет ввод сигналов с датчиков в ЭВМ, расчет параметров сигналов и показателей буримости, сравнение показателей буримости с заданными спектр-масками категорий горных пород, выведение результатов расчетов на экран монитора, формирование и печать протокола испытаний.

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} может рассматриваться как качественно новое свойство горной породы – *прочность при воздействии 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 всех типов коронок зависимости между $\upsilon_{мех}$ и W_{AV} при бурении на постоянном режиме аппроксимированы экспоненциальными функциями вида $\upsilon_{мех} = a\,e^{-W_{AV}/b}$. Зависимость между механической скоростью бурения коронкой 01А3-59 и W_{AV} представляет экспоненциальную функцию $\upsilon_{мех} = 8{,}43\,e^{-W_{AV}/3{,}6\cdot10^6}$.

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 $H_K = a\,e^{-W_{AV}/b}$. Зависимость между расходом q алмазов на бурение и W_{AV} представляет степенную функцию вида $q = aW_{AV}{}^{b}$, $b > 1$.

Соотношение W_{AV} и категорий горных пород по буримости ЕНВ установлено эмпирическим способом путем разделения диапазона изменения W_{AV} на 12 поддиапазонов. Классификация некоторых типичных представителей горных пород по категориям буримости ЕНВ и по показателю W_{AV} приведена в таблице.

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* в результате силового воздействия на горную породу вращающимся алмазным инструментом.

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

Категория пород по буримости ЕНВ	W_{AV}, x10^6, Па·с /м^3	Типичные представители горных пород (значение W_{AV})
I	< 0,01	Ил влажный (< 0,0037), песок мелкозернистый (< 0,0042), торф (< 0,0047), растительный слой (< 0,0045), супесь (< 0,0057)
II	0,01-0,1	Глина песчанистая (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 алевритистая (0,53), аргиллит тонкозернистый (0,61), алевролит тонкослоистый (0,99)
IV	1-4	Песчаник (1,05), уголь (1,9), сланец песчанистый (2,0), известняк доломитизированный (2,7), мел (3,1), алевролит кварцсодержащий (3,4), гипс (3,5), аргиллит (3,9)
V	4-8	Сланец глинистый (5,3), песчаник (5,6), мергель (5,6), песчаник (5,8), змеевик (7,7)
VI	8-12	Сланец углистый (8,5), перидотит (8,7), туфопесчаник ожелезненный (9,2), известняк (9,4), сланец песчано-глинистый (9,7), мрамор (11,0), доломит (11,7)
VII	12-16	Известняк мраморизованный (12,1), туф дацитового состава (12,1), скарн гранатовый (12,1), перидотит (13,2), филлит (14,9), песчаник (15,1), мрамор (15,9)
VIII	16-21	Туфопесчаник (17,7), микроклин (18,2), игнимбрит (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), гранито-гнейс (24,4), гранит биотитовый (24,9), диорит кварцевый (25,9), габбро-диабаз (25,9)
X	26-31	Гнейс окварцованный (26,6), 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 мелкозернистый (32,5), кварцит розовый (33,8), кварцит красный мелкозернистый (34,6), роговик гематитомагнетитовый (36,7), джеспилит (37,0)
XII	> 37	Яшма (39,0), джеспилит (40,3), яшма (40,3), роговик гематитомагнетитовый (43,5), кремень (57,0)

Метод акустико-спектральной диагностики может успешно применяться для выделения горных пород с близкими механизмами разрушения. На основе W_{AV} и K_p типизированы формации (механизмы разрушения) горных пород и разработана классификация, предназначенная для выбора алмазного инструмента для бурения [3]. В классификации устанавливается 8 формаций горных пород. Для типизации формаций использованы свойства горных пород, влияние которых на износ инструмента доказано практикой бурения: твердость, абразивность, зернистость, трещиноватость, нарушенность, способность заполировывать алмазный инструмент. 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.

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}, $K_р$ и типа акустического спектра. Формации горных пород с повышенным абразивным воздействием к матрице выделяются по высокому значению коэффициента $K_р$. Наиболее абразивны песчаники, выветрелые граниты и гранатовые гнейсы. Формации горных пород, предрасположенные к заполированию алмазного инструмента, характеризуются высоким значением W_{AV} и низким $K_р$. Отличительной особенностью механизма разрушения «полирующих» горных пород является насыщенность спектра высокочастотными составляющими. Типичными представителями «полирующей» формации являются яшмы, джеспилиты и кремень.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов А.Г.* Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении и его акустико-спектральная диагностика // Методика и техника разведки / ВИТР. СПб, 2000. № 11-12 (149-150).

2. *Архипов А.Г.* Разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1993.

3. *Архипов А.Г.* Классификация горных пород по формациям и типаж породоразрушающего инструмента: Методические рекомендации / А.Г.Архипов, Г.А.Блинов, П.Н.Курочкин. ВИТР. СПб, 1999.

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

5. *Гинзбург И.М.* Методы выбора конструктивных параметров алмазного породоразрушающего инструмента / И.М.Гинзбург, Ю.А.Оношко. ВИЭМС. М., 1983 (Обзор ВИЭМС).

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