Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXX, вып. 1, 1955 г.

О РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДРОБОВОМ БУРЕНИИ

Доц. Н. Ф. Алексеев

Бурение дробью — механический способ разрушения горных пород. В отличие от других методов колонкового бурения, оно характеризуется тем, что разрушающий горную породу материал — дробь — не прикреплен к коронке, а свободно располагается на забое скважин и его можно непрерывно пополнять в процессе бурения. При одновременном действии вращательного движения коронки и некоторого давления, передаваемого коронкой на забой, дробь, находящаяся в скважине, приводится в движение, в результате чего происходит углубка скважины.

Горная порода, дробь и коронка, между которыми происходит относительное движение, изнашиваются, разрушаются. Продукты разрушения удаляются из забоя струей промывочной жидкости, подаваемой через штанги на забой, чем обеспечивается возможность длительного ведения непрерывного эффективного бурения. Так как дробовое бурение есть механический способ разрушения горных пород, естественно, что эффект разрушения будет определяться, в первую очередь, физико-механическими свойствами горных пород и дроби, а также свойствами коронки и способом воздействия дроби на породу.

Физико-механические свойства горных пород зависят от минералогического состава, структуры и текстуры, степени сохранности, а в осадочных породах — и от состава их цемента, степени уплотнения и метаморфизма.

Так как силы сцепления между отдельными кристаллами горных пород сравнительно невелики, горные породы обладают достаточно высокой прочностью только при сжатии, а сопротивление их другим видам деформаций — растяжению, сдвигу и изгибу — очень мало и составляет только десятые и сотые доли сопротивления сжатию.

Усилие, передаваемое дробью на породу, в местах соприкосновения дроби с породой вызывает напряжения, величина которых для обеспечения разрушения породы должна быть не менее предела ее прочности. При этих напряжениях появляются нарушения цельности монолита в зоне контакта с дробью, в результате чего происходит отделение частиц породы.

В свою очередь, дробь должна обладать достаточно высокими механическими качествами. Минимальный расход дроби должен обеспечивать эффективное разрушение породы.

Эффективность бурения в значительной степени определяется и качеством металла буровой коронки. Необходимо определенное соответствие механических качеств коронки и дроби.

О характере же работы дроби по разрушению породы до настоящего времени нет единого научно обоснованного мнения. Существуют две гипотезы о процессе разрушения горных пород.

По первой гипотезе, получившей наиболее широкое признание, основную работу по разрушению породы при бурении выполняет колотая дробь или частицы остроугранной формы. Целая круглая дробь, находясь в скважине, принимает незначительное участие в самой углубке скважины.

Для выяснения работы дроби по разрушению забоя научно-исследовательской группой Всесоюзного геологического института (ВСЕГЕИ) в 1934 г. была поставлена серия опытов бурения колотой дробью, целой чугунной дробью, смесью колотой дроби с целой и стальными шариками диаметром 3 *мм*. Эксперименты показали, что при всех прочих равных условиях стальные, не колющиеся в процессе бурения шарики дают ничтожную скорость бурения, в 20—30 раз меньшую скорости при бурении чугунной дробью.

В связи с этим Е. В. Боровский писал: «При полном отсутствии в скважине деформированного дробового материала и наличии одних только округлых и цельных дробинок процесс бурения протекает в столь слабых формах, что исключает всякую техническую возможность целесообразного применения дроби для целей колонкового бурения» [1].

Исследователи полагают, что целая дробь, играя второстепенную роль в процессе разрушения, оказывается весьма необходимой в скважине, так как она

1) сохраняет и поддерживает постоянным диаметр скважины и керна в определенных пределах, предупреждая заклинку как керна, так и бурового снаряда в скважине;

2) способствует равномерному истиранию всей дробовой массы;

3) дает возможность осколкам дроби принимать наиболее выгодное положение для работы по разрушению пород.

Считается, что только при совместном присутствии целой и колотой дроби достигаются нормальные условия бурения, так как разрушение породы круглой дробью, по мнению исследователей, менее вероятно, чем остроугранной. Характер работы колотой дроби объясняется легко представляемым и наиболее изученным способом обработки металлов резцами. Грубой аналогией этого процесса является бурение алмазами и твердыми сплавами. Дробовая коронка при этом рассматривается как многорезцовая фреза. Такой характер разрушения пород имеет место при обработке и распиловке камней корундовым песком.

Экспериментальные исследования в этой области и повседневная практика неоспоримо доказывают возможность эффективного бурения колотой и деформированной дробью. Бурение колотой дробью наблюдается в производственных условиях, когда из-за отсутствия дроби рабочие используют дробовой шлам предыдущих рейсов.

При засыпке больших порций дроби в первые 20—30 мин. бурения скорость проходки сравнительно низкая, и только после того, как больше половины дроби расколется, наблюдается максимальная проходка. Это явление также позволяет считать, что основная работа по разрушению породы выполняется колотой дробью, а целая имеет второстепенное значение. Целая дробь создает некоторый зазор между торцами коронки и забоем, в котором располагаются более мелкие остроугранные кусочки рабочей дроби, занимающие выгодное положение для разрушения породы.

Эксперименты, проведенные группой ВСЕГЕИ, Московским геологоразведочным институтом (МГРИ), а также наши исследования подтверждают возможность эффективного бурения пород колотой дробью.

Процесс разрушения породы частицами неправильной формы является сложным процессом с раздавливанием, смятием, скалыванием и истиранием породы.

По второй гипотезе основную работу по разрушению породы производит круглая дробь. Перекатываясь под давлением коронки по забою, она вдавливается в породу, вызывая появление трещин, которые, пересекаясь между собой, приводят к отделению частиц от породы.

Колотые частицы играют вспомогательную роль в процессе разрушения пород. Они своим присутствием уменьшают число целых дробинок, находящихся в контакте с торцем коронки, чем достигается увеличение давления на одну дробинку и, следовательно, увеличение проходки. Кроме того, острые выступы колотой дроби не обладают большой стойкостью, а вероятность их выгодного расположения в забое мала. Роль колотой дроби может выполнять целая дробь меньшего диаметра, чем рабочая.

Эта гипотеза не имеет до настоящего времени достаточно убедительных экспериментальных подтверждений.

С целью выявления возможности эффективного бурения круглой не колющейся в процессе бурения дробью нами была выполнена в 1949—1950 гг. серия экспериментов бурения пород шариками шарикоподшипников. Кроме достижения эффективности бурения шариками, было проведено исследование некоторых отдельных факторов, влияющих на скорость бурения.

Исследования были проведены на трех породах.

1. *Мелкозернистый биотитово-роговообманковый гнейс.* Текстура гнейсовидная, обусловленная параллельным расположением удлиненных кристаллов роговой обманки и чешуек биотита. Структура бластопорфировая, обусловленная наличием на мелкозернистом фоне бластопорфиров, плагиоклазов и кварца. Состав: кварц, плагиоклаз, микроклин, биотит, роговая обманка, эпидот. Из акцессорных минералов встречены: магнетит, апатит, сфен и циркон.

Размер зерен колеблется от 0,2 до 0,8—1,5 *мм* в поперечнике.

По буримости данная порода относится к IX категории.

2. *Среднезернистый кварцевый диорит.* Порода имеет среднезернистое строение, состоит из кварца, калиево-натриевого полевого шпата, плагиоклаза, биотита и роговой обманки. Из акцессорных минералов обнаружен апатит. Структура его гипидоморфнозернистая.

В породе содержится кварца 4%, калиево-натриевого полевого шпата — 11%, плагиоклаза — 45%, биотита — 20% и роговой обманки — 20%. Размер составляющих компонентов колеблется от 2 до 5 *мм*.

По буримости порода относится к VIII категории.

3. *Среднезернистый оливиновый диаллагит.* Текстура массивная. Структура гипидоморфнозернистая. Состав: диаллаг, оливин, амфибол, биотит, основной плагиоклаз. Из акцессорных присутствуют рудный минерал и апатит. Диаллаг содержится в количестве 80%, оливин — 7%, плагиоклаз — 8%, биотит и амфибол — 5%. Размер зерен колеблется от 0,6 до 4 *мм*.

По буримости порода относится к VIII категории.

Питание скважины шариками производилось единовременной засыпкой порции в 50 *г*, которой хватало на проходку до 1,5 *м*. Колотые шарики в процессе бурения (в небольшом количестве) удалялись через каждые 250 *мм* проходки и заменялись целыми.

Питание чугунной дробью осуществлялось порциями по 500 *г* единовременно. Диаметр коронки 65 *мм* из Ст-50. Количество подаваемой жидкости во всех случаях 8 *л/сек*. Для бурения применялись стальные шарики диаметром 3,175 и 2 *мм* и чугунная дробь диаметром от 3,0 до 3,5 *мм*.

В минуту буровой снаряд делал 220—340 оборотов.

Удельное давление задавалось 10, 20, 30, 40 *кг/см*^{2}.

Результаты, полученные при бурении стальными шариками, были сравнены с результатами бурения стандартной чугунной дробью в аналогичных условиях, т. е. по тем же породам, при одинаковых давлениях на забой, равных скоростях вращения бурового снаряда, одном и том же количестве промывочной жидкости, постоянном диаметре и одинаковом качестве дробовых коронок (табл. 1—4).

Таблица 1

Средняя скорость проходки в мелкозернистом биотитово-роговообманковом гнейсе при различных угловых скоростях вращения коронки и различных удельных давлениях, *мм/мин*

Качество и состав дроби	Удельное давление, *кг см*^{2}							Примечание
	10	20	30	40	10	20	30	
	При $n = 220$ об/мин				При $n = 340$ об/мин			
Смесь шариков диаметром 3,175 и 2 *мм* . .	1,6	3,0	5,0	6,5	2,5	4,8	8,0	Проходка в каждом случае 500 – 600 *мм*
Чугунная дробь диаметром 3 *мм*	2,3	4,8	6,0	—	3,5	7,2	—	
Шарики диаметром 3,175 *мм*	—	—	0,5	—	0,13	0,44	0,6	Проходка в каждом случае 150 *мм*
Шарики диаметром 2 *мм*	—	—	0,36	—	—	—	—	Бурение производилось только при $n = 220$ об/мин и $p = 30$ *кг/см*^{2}

Примечание. Прочерки в табл. 1—3 означают невозможность длительного бурения чугунной дробью в данных условиях.

Таблица 2

Средняя скорость проходки по среднезернистому оливиновому диаллогиту при различных режимных параметрах, при $n = 340$ об/мин, *мм/мин*

Качество и состав дроби	Удельное давление, *кг/см*^{2}				Проходка в каждом случае, *мм*
	10	20	30	40	
Смесь шариков диаметром 3,175 и 2 *мм*	2,3	4,5	6,4	9,4	750—800
Чугунная дробь диаметром 3 *мм*	3,6	7,0	—	—	750—800
Деформированные шарики	4,0	7,8	—	—	800
Шарики диаметром 3,175 *мм*	0,33	0,8	1,3	2,0	150

На основании данных табл. 1—4 можно сделать выводы.

1. Эффективное бурение возможно круглой неколотой дробью. Скорость проходки целой стальной дробью, а также расколотыми стальными шариками может быть большей, чем скорость проходки при бурении чугунной дробью, колющейся в процессе бурения.

Таблица 3

Средняя скорость проходки по среднезернистому кварцевому диориту при различных режимных параметрах, *мм/мин*

Качество и состав дроби	Удельное давление, *кг/см²*							Проходка в каждом случае, *мм*
	10	20	30	10	20	30	40	
	при n = 220 об/мин			при n = 340 об/мин				
Смесь шариков диаметром 3,175 и 2 *мм*	1,6	3,1	5,0	2,9	6,0	8,5	11,4	600
Дробь чугунная диаметром 3 *мм*	3,7	7,0	9,0	5,1	9,2	—	—	
Шарики диаметром 3,175 *мм*	—	—	0,53	0,2	0,6	0,8	1,25	150
Шарики диаметром 2 *мм*	—	—	0,4	—	—	—	—	

Таблица 4

Средний расход мощности при бурении по мелкозернистому гнейсу, *вт*

Качество и состав дроби	Удельное давление, *кг/см²*						Примечание
	10	20	30	10	20	30	
	при n = 290 об/мин			при n = 550 об/мин			
Чугунная дробь диаметром 3—3,5 *мм*	435	500	1080	1050	1550	1900	Порция дроби 500 *г*, диаметр коронки 65 *мм*
Смесь шариков диаметром 3,175 и 2 *мм*	203	380	510	450	700	1000	

Примечание. Значения мощности приняты ориентировочные. Определялись они как разность между полной мощностью, потребляемой электродвигателем при заданном режиме, и мощностью холостого хода станка. Замер мощности производился через каждые 5 мин.

Большая скорость проходки при бурении стальными шариками получена при повышенных давлениях, которые не допустимы для чугунной дроби.

2. Эффективное бурение шариками возможно при окружной скорости коронки до 3 *м/сек*.

3. Скорость бурения скважины в данной породе при заданном режиме бурения можно считать постоянной.

4. Процесс бурения идет спокойно, без заметных вибраций бурового снаряда.

5. Мощность, расходуемая на разрушение породы и вращение бурового снаряда, меньше, чем при бурении чугунной дробью.

6. Расход шариков в среднем в 60—80 раз меньше расхода чугунной дроби.

7. Диаметр скважины и керна — постоянные. Их поверхности гладкие. Зазоры между керном и коронкой, коронкой и стенкой скважины равны диаметру больших шариков.

Получить одинаковую скорость проходки при бурении шариками и чугунной дробью путем изменения соотношения количества крупных и мелких шариков (при прочих равных условиях) не удалось. Скорость проходки при бурении чугунной дробью и деформированными шариками

всегда была выше, чем целыми шариками, причем скорость проходки при бурении деформированными шариками была получена выше, чем при бурении чугунной дробью в аналогичных условиях. Большая скорость проходки при бурении колющейся дробью может быть частично объяснена тем, что поступающая на забой целая дробь накатывается на плоские частицы колотой дроби и при этом приподнимает буровой снаряд. Такое поступление дроби под коронку сопровождается вертикальной вибрацией бурового снаряда, в результате чего динамическая нагрузка на дробь производит дополнительную работу по разрушению забоя.

Работа бурового снаряда при бурении шариками плавная и спокойная, вертикальных вибраций бурового снаряда не наблюдается. Возможно, естественно создающийся состав буровой массы при бурении чугунной дробью является более удовлетворительным, чем искусственно созданный состав из смеси шариков при соотношении их по весу 1 : 1.

Была проделана серия опытов с целью подбора такого состава смеси шариков разных диаметров, при котором получилась бы наибольшая скорость проходки. При соотношении веса крупных шариков к мелким 1 : 2 скорость проходки была незначительной, наиболее удовлетворительным оказался состав смеси шариков при соотношении веса 1 : 1.

Опыт бурения чугунной дробью показывает, что процесс разрушения пород колотой дробью является сложным. Возможны два самостоятельных процесса разрушения породы дробью: 1) круглой, не колющейся в процессе бурения; 2) частицами неправильной формы.

Бурение дробью, колющейся во время работы, представляет сложный процесс. В разрушении пород принимает участие как целая, так и деформированная дробь. Основную работу бурения выполняют наиболее крупные частицы, посредством которых главным образом передается усилие на забой от бурового снаряда.

Анализ работы шариков, а также чугунной дроби, которая колется в процессе бурения, приводит к выводу, что влияние режимных параметров на скорость проходки как при бурении шариками, так и при бурении чугунной дробью аналогично. Эта аналогия наблюдается при исследовании влияния на скорость проходки фактора давления, окружной скорости бурового снаряда, качества металла дроби и коронок и т. д.

При исследовании работы шариков представляется возможность более правильно выявить характер влияния различных режимных параметров на скорость проходки, четко сформулировать условия нормальной работы дроби, а также наметить пути к повышению эффективности дробового бурения.

Процесс разрушения пород круглой дробью осуществляется, главным образом, крупными дробинками, которые перекатываются под давлением по забою и производят его разрушение (табл. 1 — 3).

Поверхность соприкосновения между породой и шариками очень мала, так как величина вдавливания шарика в породу составляет лишь десятки микрон. Величина напряжения на поверхности соприкосновения шарика с породой может превзойти предел прочности и вызвать нарушение цельности породы или дроби в месте их контакта в зависимости от прочности соприкасающихся тел. Аналогичная картина наблюдается при бурении твердыми коронками из высокопрочной стали, когда при недостаточной деформации коронки контактные напряжения приводят к разрушению шариков.

Практика подтверждает, что эффект бурения определяется физико-механическими свойствами породы и дроби, величиной приложенной

нагрузки на дробь, частотой ее приложения, т. е. числом оборотов снаряда, диаметром дроби и другими факторами.

Процесс разрушения горных пород круглой неколющейся дробью может быть объяснен теорией Герца, которая нашла свое подтверждение в машиностроении — теории шарико- и роликоподшипников, в теории работы зубчатых колес и ряде других отраслей [4].

Рассмотрим возможность приложения теории Герца к разрушению горных пород круглой дробью. Герц рассматривал случай сжатия двух упругих тел с криволинейной поверхностью под некоторым давлением. Разработанная теория и позднейшие исследования в этой области основаны на предположении: 1) оба соприкасающихся тела однородны; 2) соприкосновение тел происходит по очень малым, в сравнении с полными, поверхностям (поверхности должны быть гладкими); 3) действующие усилия направлены нормально к поверхности соприкосновения обоих тел; 4) напряжения, действующие в месте касания, не превышают предела упругости материала соприкасающихся тел.

Эти исследования позволяют рассчитать: 1) форму и размер поверхности контакта; 2) величину нормального давления на этой поверхности и ее распределение по площади контакта; 3) величину деформации тел в зоне контакта.

Из перечисленных величин, определимых по теории Герца, наибольший интерес представляют напряжения в зоне контакта, которые и вызывают разрушение горных пород при дробовом бурении.

Выясним, в какой степени указанные исследования применимы к процессу бурения шариками.

Первое положение теории, исходящее из однородности соприкасающихся тел, можно считать удовлетворительным, особенно для мелкокристаллических пород.

Второе условие, требующее небольшой величины соприкасающихся поверхностей, можно считать тоже удовлетворительным. Поверхности шарика и забоя достаточно гладки, а твердости материалов высоки.

Нормальное приложение нагрузки по третьему условию удовлетворяется. Что же касается четвертого условия, то указанная теория рассматривает явления в пределах упругости. В нашем случае процесс протекает за пределами упругости. Как известно, существующие теории прочности, разработанные в пределах упругости, используются в практике и за пределами упругости.

Таким образом, с некоторыми оговорками теорией Герца может быть объяснен процесс бурения неколющейся дробью. Однако она не может дать точных результатов, так как в наших условиях вопрос необходимо рассматривать за пределами упругости, а в настоящее время отсутствуют достаточные исследования в этой области.

Необходимо также иметь в виду и то, что поверхность забоя не является идеально гладкой, а горные породы только условно однородны. Вершины микроскопических выступов породы, имеющиеся на забое, первыми воспринимают давления и разрушаются, так как их опорная поверхность незначительна.

Несмотря на невысокую точность полученных результатов, теория Герца позволяет установить некоторые основные закономерности дробового бурения. Как отмечалось выше, Герц рассматривал случай сжатия двух соприкасающихся тел, имеющих криволинейную поверхность. Тела, сжатые силой P, будут соприкасаться по некоторой поверхности, ограниченной в общем случае криволинейным контуром.

Если на поверхности контакта двух соприкасающихся тел под действием нагрузки будет превзойден предел прочности, то в этой точке возникнет местное разрушение. Площадь соприкосновения и возникающие напряжения в месте контакта могут быть подсчитаны по соответствующим формулам.

Для шариков, соприкасающихся с поверхностями тел вращения, полуоси эллипса, ограничивающего площадку соприкосновения, определяются по формулам, выведенным Герцем:

$$a = \mu \sqrt[3]{\frac{3P(\theta_1 + \theta_2)}{8(\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22})}};$$

$$b = \nu \sqrt[3]{\frac{3P(\theta_1 + \theta_2)}{8(\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22})}},$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса, *см*;

P — сжимающее усилие, *кг*;

θ_1 и θ_2 — коэффициенты эластичности, зависящие от модуля упругости E, *кг/см*^{2}; для большинства тел θ лежит в пределах от $\frac{3}{E}$ до $\frac{4}{E}$, в среднем $\theta = \frac{32}{9E}$;

ρ_{11} и ρ_{12} — главные кривизны первого сдавливаемого тела, *см*;

ρ_{21} и ρ_{22} — главные кривизны второго сдавливаемого тела, *см*;

μ и ν — коэффициенты, учитывающие кривизну тел в месте их взаимного касания, определяемые в зависимости от главных радиусов кривизны и угла между плоскостями главной кривизны обоих тел.

В нашем случае соприкосновение шарика с породой происходит по криволинейным поверхностям. Так как величина напряжения определяется давлением и площадью контакта, то естественно, что кривизна соприкасающихся поверхностей будет определять величину напряжений.

Радиус кривизны поверхности забоя примерно в 7—10 раз больше радиуса шарика, причем плоскости главной кривизны совпадают. При таком соотношении радиусов можно принять, что соприкосновение шарика с породой происходит по плоскости, в результате чего решение вопроса значительно упрощается, а ошибка в расчетах не превышает 5%. Поверхность соприкосновения в принятом случае будет ограничена кругом. Для принятого случая:

$$\mu = \nu = 1;$$

$$\rho_{11} = \frac{1}{r},$$

где r — радиус шарика;

$$\rho_{12} = \rho_{21} = \rho_{22} = 0.$$

Принимая значения

$$\theta_1 = \frac{32}{9E_1}, \quad \theta_2 = \frac{32}{9E_2},$$

получим, что при $a = b$

$$a = 1{,}1 \sqrt[3]{Pr\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)}.$$

Среднее нормальное напряжение на поверхности контакта определяется величиной площади контакта

$$\sigma_m = \frac{P}{\pi a^2}.$$

Напряжения сжатия имеют максимальную величину на поверхности — в центре площади контакта

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{3}{2}\frac{P}{\pi a^2}.$$

При деформации, вызываемой нормальным к поверхности усилием, участки поверхностей соприкасающихся тел, расположенные в зоне контакта, сжимаются или растягиваются. В последнем случае длина линии опорной поверхности удлиняется, что для горных пород может сопровождаться появлением мелких трещин, которые, пересекаясь между собой, приводят к отделению частиц от породы.

Наиболее опасными местами напряженного состояния при вдавливании сферы в плоскую поверхность является контур, а в объеме тела — точка, расположенная на нормали в центре площади контакта, на расстоянии от поверхности давления $Z = 0{,}5\ a$, где имеет место максимальное касательное напряжение.

Величина касательных напряжений в зависимости от нормальных определяется

$$\tau = 0{,}4\sigma_{\text{макс}}.$$

Сдвигающие напряжения более опасны, так как прочность пород сдвигу значительно ниже, чем сжатию.

Полученное выражение величины напряжения на поверхности контакта определяется величиной давления и площадью контакта. Следовательно, эффект разрушения при заданной нагрузке будет тем выше, чем меньше величина площади контакта. Последняя при заданной нагрузке определяется физико-механическими свойствами соприкасающихся тел, а также величинами радиусов кривизны. Эти важные закономерности, установленные в теории упругости, позволяют наиболее обоснованно охарактеризовать процесс разрушения горных пород и исследовать процесс бурения не только качественно, но и количественно, одновременно выяснить условия более эффективного разрушения горной породы путем подбора соответствующего качества дроби, ее размера и металла коронки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Е. В. Технологические процессы дробового бурения. ОНТИ, 1936.

2. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. Гостоптехиздат, 1950.

3. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолиздат, 1952.

4. Hertz H. Gesammelte Werke. B. I, Att 5, 6, 1895

Поступило
20. XI. 1953 г.