

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ИМПУЛЬСА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Шадрина А.В.¹

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, д. 30), e-mail: avshadrina@rambler.ru

В работе изложены результаты экспериментальных исследований разрушения горной породы в режиме ударно-поворотного бурения. На основе исследований проведена количественная и качественная оценка изменения крупности бурового шлама горной породы (крупнозернистого гранита) в зависимости от формы и энергетических параметров силовых импульсов, формируемых при различных предупредных скоростях бойка, различных цилиндрических ударниках и буровых коронок. Приведены результаты исследования фракционного состава гранита. Для анализа экспериментальных данных применены статистические методы (ранговая корреляция Спирмена, множественный регрессионный анализ с фиктивной переменной, непараметрический критерий Краскала-Уоллиса). Полученные закономерности показывали, что с повышением энергии удара очевидно преимущество буровой коронки штыревого типа. Штыревая коронка во всех случаях обеспечивала большую крупность обломков разрушенной горной породы и имела отличные результаты при разных скоростях соударения. Так при скорости соударения с колонной труб 5 м/с для всех цилиндрических ударников содержание частиц диаметром более двух миллиметров составляет около 10 %, а содержание частиц диаметром менее 0,25 мм не превышает 49 %. При скорости 7 м/с результаты сопоставимы с разрушением гранита крестовой и долотчатой коронками. Экспериментальные данные будут полезны специалистам, занимающимся совершенствованием бурового инструмента, а также компьютерным моделированием процессов разрушения горных пород.

Ключевые слова: ударно-поворотный способ бурения, буровой снаряд, продукты разрушения гранита, ситовый анализ, фракционный состав, экспериментальные зависимости.

THE IMPACT ASSESSMENT OF POWER PULSE FORM AND ENERGY PARAMETERS ON RESULTS OF ROCK DISTRIBUTION

Shadrina A.V.¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenina Avenue, 30), e-mail: avshadrina@rambler.ru

The paper presents experimental studies of coarse-grained rock failure provided by percussive drilling in laboratory setting. The particle-size distribution in granite-cutting sludge was analyzed in this paper. Quantification and qualitative analysis were carried out to estimate critical values of rock failure depending on pulse form and energy parameters. The power pulses were generated at different the hammer pre-impact velocity, types of drill bits and cylindrical hammer parameters (weight, length, diameter). Statistical approach (Spearman's rank-order correlation, multiple regression analysis with dummy variables, Kruskal-Wallis nonparametric test) was used to analyze the drilling process. With increase of the percussive energy the insert bit has the advantage over other drill bit types. The insert bit produced granite-cutting sludge of larger size in all cases and showed perfect results at different impact rates. Thus, at 5 m/s impact rate of the hammer the percentage of particles having the diameter over 2 mm is about 10 wt.%, while that of particles with diameter less than 0,25 mm does not exceed 49 wt.%. Results obtained at 7 m/s impact rate of the hammer are comparable with those of the crosscut and spade drill bits. Experimental data will be useful for specialists engaged in simulation and illustration of rock failure.

Keywords: percussive drilling, drill string, granite-cutting sludge, particle analysis, particle-size distribution, empirical relations

Для специалистов в области бурения процесс разрушения горной породы является определяющим. Все исследования, связанные с бурением, прямо или косвенно, направлены на повышение его эффективности. Совершенствуя технологию и технику применительно к

ударно-вращательному способу бурения скважин малого диаметра, важно представлять характер влияния формируемых при ударе силовых импульсов на показатели разрушения.

На современном уровне знаний установлено, что по величине силовой импульс должен соответствовать силам сопротивления горной породы внедрению при соблюдении условия минимума энергии отраженного импульса. Кроме того, под оптимальным понимается такой импульс, который при наибольшем внедрении буровой коронки в горную породу дает наименьшую величину отраженного импульса напряжений в буровом снаряде.

Согласно исследованиям, проведенным К.И. Ивановым [3], по сопоставлению импульсов различной формы с идеальным прямоугольным импульсом, наиболее предпочтительными по форме являются ассиметричные и треугольные импульсы. Они дают наибольшую глубину внедрения по сравнению с прямоугольным импульсом (2 и 10 % соответственно) и значительное снижение суммарных отраженных импульсов напряжений в буровой колонне ($\approx 40\%$).

Форма импульса определяется силой и его длительностью. Как показывают многие исследования, для эффективности разрушения горной породы требуется увеличить время контакта породоразрушающего инструмента с горной породой, а это значит, что и длительность переднего фронта импульса должна быть больше [1].

В ходе проведенного исследования были получены осциллограммы импульсов, формируемых в буровом снаряде, при различных экспериментальных условиях, а также соответствующие им данные по фракционному составу продуктов разрушения гранита.

Цель исследования

Исследования фракционного состава бурового шлама гранита имеют цель показать изменение крупности продуктов разрушения гранита от формы и энергетических параметров силовых импульсов, а также типа применяемого породоразрушающего инструмента.

Материал и методы исследования

Экспериментальная часть работы проводилась в два этапа. Первый этап заключался в фиксации с помощью измерительной аппаратуры УИПУ-4М силовых импульсов, формируемых с помощью вертикального копра во фрагменте бурового снаряда при различных экспериментальных условиях (скорости приложения ударной нагрузки (5 и 7 м/с), массе m и длине l закрепленных на копре цилиндрических ударников: 1 ударник – $m = 2,5$ кг, $l = 350$ мм; 2 ударник $m = 5,48$ кг, $l = 450$ мм; 3 ударник $m = 5,48$ кг, $l = 700$ мм; 4 ударник $m = 8,32$ кг, $l = 253$ мм). При этом использовался метод единичных ударных нагрузок [6].

Так как бурение на стенде в лабораторных условиях осуществлялось на небольшую глубину, силовой импульс, сформированный во фрагменте бурового снаряда, передавался к горной породе (крупнозернистому граниту) практически без искажения. Как отмечается в

многочисленных литературных источниках [3, 5] и подтверждено нашими исследованиями [6], при значительной длине бурового снаряда форма импульса изменяется, а энергия теряется. Такая постановка эксперимента позволила провести оценку влияния параметров формируемых импульсов на изменение процентного содержания частиц разрушенной горной породы.

Экспериментальное исследование представлено результатами многофакторного анализа характера разрушения горной породы (фракционный состав бурового шлама) от параметров ударной нагрузки. Нужно отметить, что подобных исследований очень мало [3, 4], а полученные нами результаты позволили уточнить закономерности разрушения, в частности, установить разный характер влияния увеличения длины ударника на энергоемкость разрушения лезвийного и штыревого породоразрушающего инструмента.

Непосредственное разрушение горной породы осуществлялось штыревой, крестовой и долотчатой коронками диаметром 43 мм. Для сопоставления удельных энергий удара буровых коронок для штыревой коронки за длину лезвия была принята суммарная величина диаметров штырей буровой коронки.

Энергия единичного удара изменялась в диапазоне 31-207 Дж. В общей сложности было проведено 862 удара. Разрушаемая среда представлена блоком гранита. Выбор модельного материала обусловлен тем, что гранит представляет собой относительно однородную горную породу, разброс результатов испытаний невелик. Кроме того, данный материал использовался многими исследователями, что позволяет сопоставлять результаты различных исследований.

Разрушенный серией из десяти ударов гранит, собирался в отдельные пакеты для дальнейшего взвешивания (аналитические весы Acculab VIC-120d3 с точностью 0,001 г) и получения среднего значения веса разрушенного гранита за единичный удар. Объем разрушенного при заданных условиях гранита просеивался через набор стандартных лабораторных сит с отверстиями следующих размеров: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 мм.

Для анализа процесса бурения применены статистические методы (ранговая корреляция Спирмена (табл. 1), множественный регрессионный анализ с фиктивной переменной, непараметрический критерий Краскала-Уоллиса).

Таблица 1

Коэффициенты ранговой корреляции по Спирмену между параметрами бойков, параметрами формируемых ими силовых импульсов и результатами разрушения для рассматриваемых буровых коронок

Тип коронки	Параметры формируемого бойком силового импульса				Параметры бойка		
	Энергия, W	Амплитуда, A	Длительность всего импульса, T	Длительность переднего фронта, t	Диаметр, d	Длина, l	Масса, m
Результаты разрушения							
Углубление лунки за единичный удар							
Штыревая	0,94	0,88	0,80	не значим	0,47	не значим	0,79
Долотчатая	0,94	0,95	0,78	не значим	0,57	не значим	0,65
Крестовая	0,86	0,92	0,75	не значим	0,48	не значим	0,55
Объем разрушенной породы							
Штыревая	0,88	0,84	0,71	0,36	0,45	не значим	0,72
Долотчатая	0,93	0,93	0,71	0,44	0,49	0,20	0,63
Крестовая	0,81	0,89	0,67	0,20	0,43	-0,12	0,39
Удельная энергоёмкость разрушения							
Штыревая	0,74	0,72	0,5	не значим	0,83	-0,23	0,79
Долотчатая	0,67	0,60	0,53	0,29	0,64	не значим	0,79
Крестовая	0,48	0,25	0,18	0,25	0,27	0,21	0,67

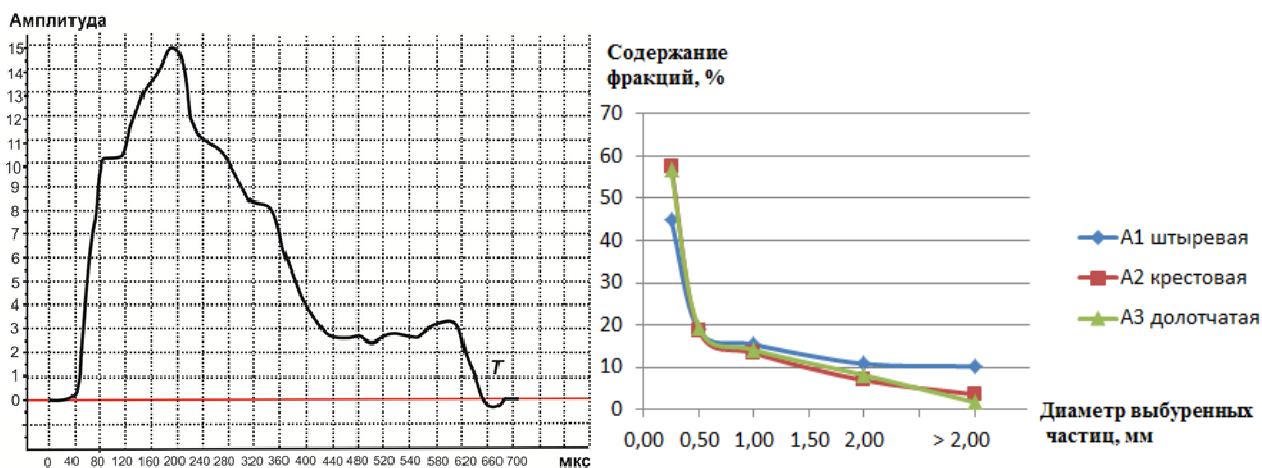
Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены анализируемые силовые импульсы и результаты фракционного состава гранита, соответствующие ударникам с равной массой, а значит равнозначным по величине энергии импульсам.

В целом анализ показал, что зависимости имеют выраженный гиперболический характер и стабильное процентное содержание выбуренных частиц определённого диаметра: 0,25-мм фракция – 40-60 %; 0,5- и 1,0-мм фракция – 10-20 %; 2,0-мм фракция – 5-13 %; фракция частиц диаметром >2 мм – 2-14 %.

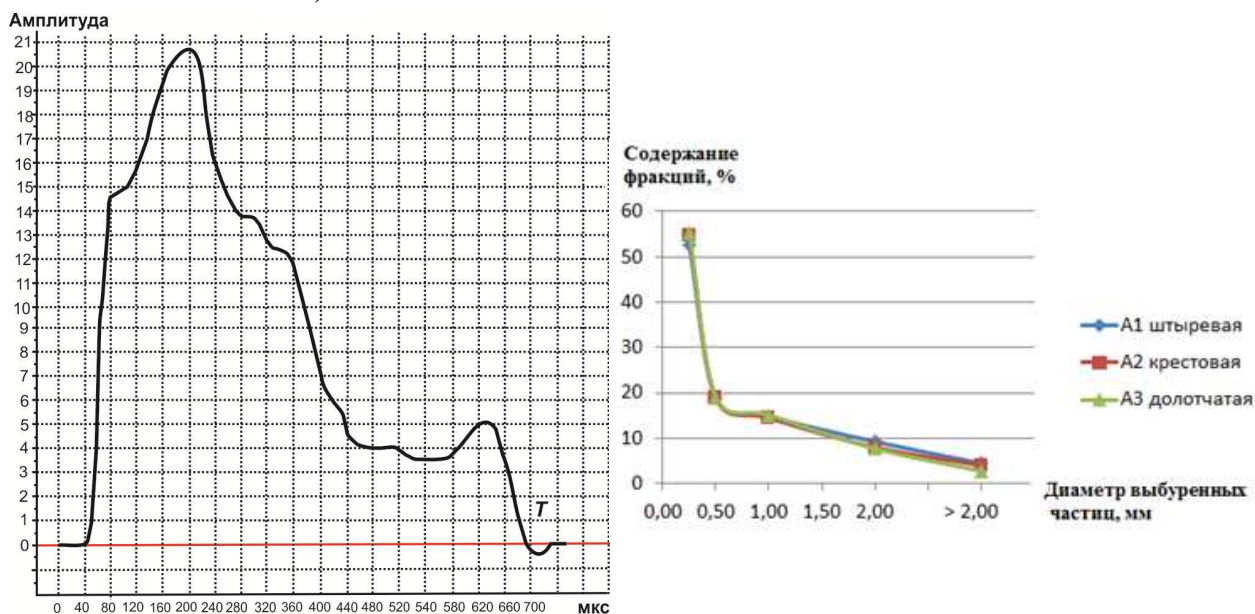
С повышением энергии удара очевидно преимущество буровой коронки штыревого типа, которая практически во всех случаях обеспечивала большую крупность обломков разрушенной горной породы.

а)



Амплитуда силы $A = 14,9 \text{ т}$
 Длительность импульса $T = 620 \text{ мкс}$
 Длительность переднего фронта импульса $t = 160 \text{ мкс}$

б)

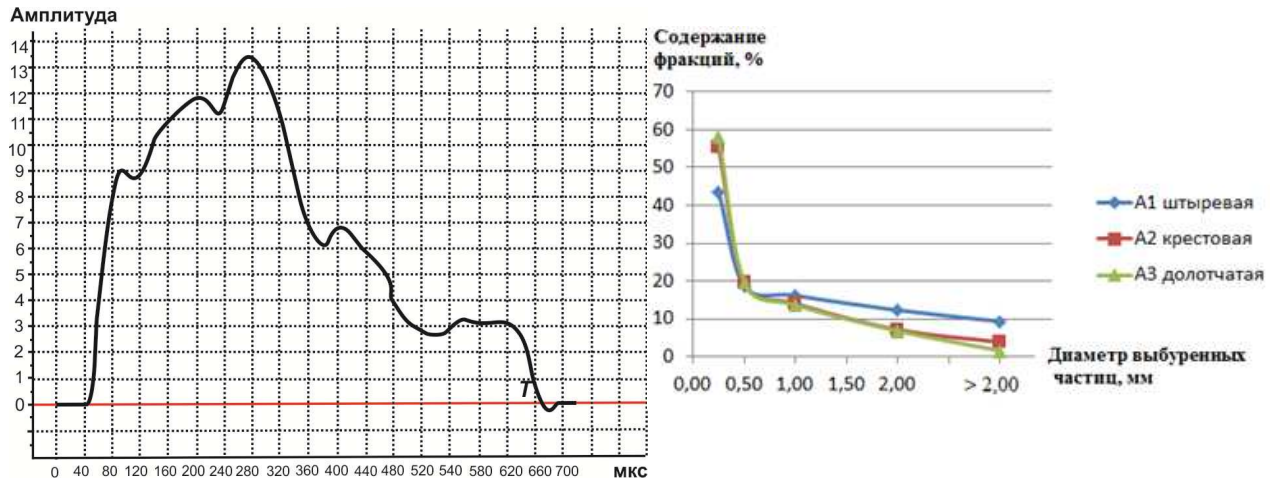


Амплитуда силы $A = 20,7 \text{ т}$
 Длительность импульса $T = 650 \text{ мкс}$
 Длительность переднего фронта импульса $t = 160 \text{ мкс}$

а) – скорость приложения ударной нагрузки – 5 м/с
 б) – скорость приложения ударной нагрузки – 7 м/с

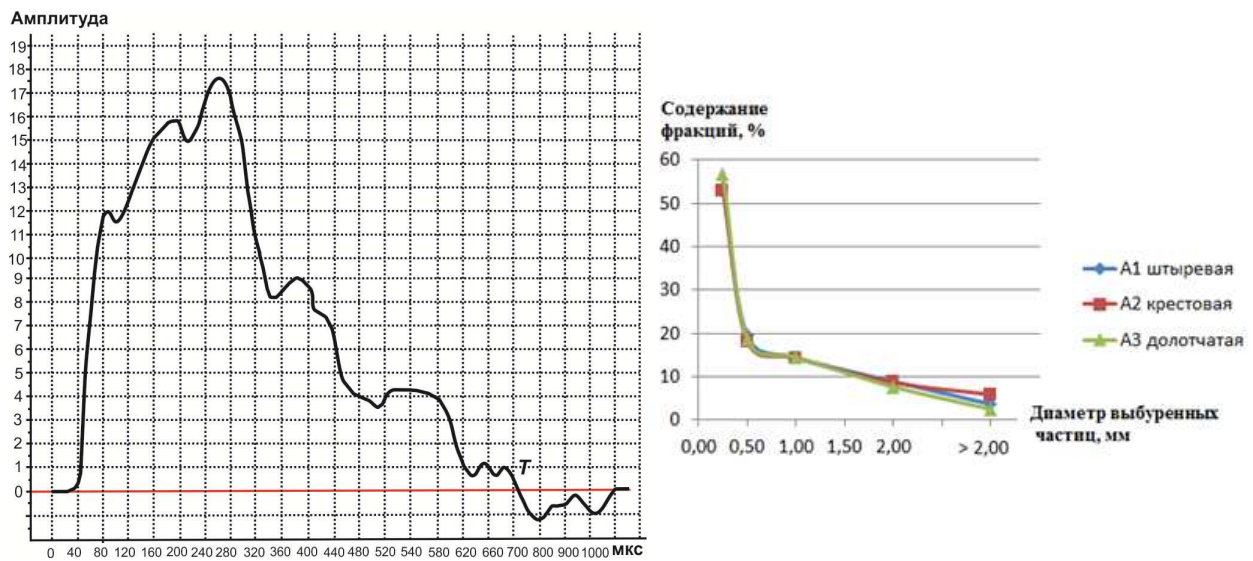
Рис. 1. Сопоставление осциллограмм силовых импульсов и характеристики содержания фракций бурового шлама от диаметра выбуренных частиц при предударной скорости бойка 5 м/с (параметры цилиндрического бойка: масса, кг – 5,48; длина, мм – 450; диаметр, мм – 45)

а)



Амплитуда силы $A = 13,4 \text{ т}$
 Длительность импульса $T = 630 \text{ мкс}$
 Длительность переднего фронта импульса $t = 230 \text{ мкс}$

б)



Амплитуда силы $A = 17,6 \text{ т}$
 Длительность импульса $T = 700 \text{ мкс}$
 Длительность переднего фронта импульса $t = 250 \text{ мкс}$

а) – скорость приложения ударной нагрузки – 5 м/с
 б) – скорость приложения ударной нагрузки – 7 м/с

Рис. 2. Сопоставление осциллограмм силовых импульсов и характеристики содержания фракций бурового шлама от диаметра выбуренных частиц при предударной скорости бойка 5 м/с (параметры цилиндрического бойка: масса, кг – 5,48; длина, мм – 700; диаметр, мм – 35)

Опыты по исследованию влияния формы ударника на энергоемкость разрушения горной породы единичным ударом бойками с постоянной массой, но различной длиной и диаметром (ударники 2 и 3) дали следующие результаты: с увеличением длины ударника с 450 до 700 мм энергоемкость разрушения для штыревой коронки снижается в среднем на 6 и 10 % соответственно при скорости приложения ударной нагрузки 5 и 7 м/с. Для крестовой буровой коронки энергоемкость разрушения единичным ударом увеличивается в среднем на 15 % при обоих значениях скорости приложения ударной нагрузки. Энергоемкость разрушения горной породы единичным ударом долотчатой коронкой увеличивается в среднем на 5 и 8 % соответственно при скорости приложения ударной нагрузки 5 и 7 м/с. Для крестовой и долотчатой коронок это можно объяснить влиянием чрезмерной длины бойка, а соответственно и большей длительности переднего фронта импульса, при которых не используется хвостовая часть импульса силы и приводит к повышению доли отраженной энергии. Для штыревой коронки не выявлено влияние длительности переднего фронта импульса силы на показатель энергоемкости разрушения гранита.

Заключение

С повышением энергии удара очевидно преимущество буровой коронки штыревого типа, которая практически во всех случаях обеспечивала большую крупность обломков разрушенной горной породы и имела особенности результатов при разных предударных скоростях бойка. Так, при предударной скорости бойка 5 м/с для всех цилиндрических бойков содержание частиц диаметром более двух миллиметров составляет около 10 %, а содержание 0,25-миллиметровой фракции не превышает 49 %. В свою очередь при предударной скорости бойка 7 м/с отмечается приближение результатов разрушения к значениям, полученным при применении крестовой и долотчатой коронок.

Список литературы

1. Дерюшева В.Н., Крауиньш П.Я. Формирование ударного импульса в зависимости от исполнения промежуточной полости пневмогидравлического ударного узла // Современные проблемы машиностроения: труды IV Международной научно-практической конференции - Томск, ТПУ, 26-28 ноября 2008. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 455-459.
2. Жуков И.А. К разработке безлезвийного бурового инструмента для разрушения горных пород высокой крепости // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. - № 6. – С. 39-41.
3. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.

4. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
5. Рындин В.П. Энергетические параметры волновых процессов // Вопросы горной механики и шахтного транспорта: межвуз. сб. науч. тр./ Кузбас. политех. ин-т. – Кемерово: Изд-во Кузбас. политех. ин-т, 1991. – С. 54-58.
6. Shadrina A. Exploration and determination of the principles of rotary-percussive underground slimhole drilling / A. Shadrina, L. Saruev // International Journal of Mining Science and Technology. – 2014. – Vol. 24, № 2. – P. 245–249.

Рецензенты:

Лукьянов В.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Голик В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и Правительства Республики Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ.