

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 621.374

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО БУРЕНИЯ ГРАНИТА

В. Ф. Важов¹, М. Ю. Журков¹, С. Ю. Дацкевич¹,
В. М. Муратов¹, А. Рёдланд²

¹Институт физики высоких технологий, Томский политехнический университет,
E-mail: zhurkov@tpu.ru, просп. Ленина, 2а, 634028, г. Томск, Россия

²Норвежский технологический университет,
7010, г. Тронхейм, Норвегия

Показано, что при электроимпульсном бурении увеличение энерговклада в канал разряда приводит к линейному возрастанию скорости бурения, которое тем больше, чем больше расстояние между электродами. При этом энергозатраты в зависимости от энерговклада изменяются минимально, а размер шлама зависит от энерговклада и расстояния между электродами.

Электроимпульсное бурение, гранит, энерговклад, энергозатраты, промывка, шлам

В начале 60-х годов прошлого столетия в Томском политехническом университете был открыт принципиально новый способ разрушения твердых диэлектрических материалов — электроимпульсный (ЭИ) [1]. Суть этого способа заключается в превышении электрической прочности жидких диэлектриков над электрической прочностью твердых диэлектрических материалов при времени воздействия импульсного напряжения 1 мкс и менее. При достаточном энергокладе, т. е. энергии, выделенной во внедрившемся в твердый диэлектрик канале разряда, отнесенной к расстоянию между электродами, возникает электровзрыв с образованием откольной воронки, которая заполняется жидкостью [1, 2]. При многоэлектродной системе (например, буровом наконечнике для бурения скважин, рис. 1) следующий разряд произойдет вновь в твердом теле в другом месте [3]. Отмечается автоматическое перемещение разрядов по поверхности разрушения (забой скважины), пока не будут разрушены все участки твердого тела. После удаления продуктов разрушения буровой снаряд под собственным весом опускается на глубину разрушения, при этом многоэлектродная система (буровой наконечник) остается неподвижной [4].

В ЭИ способе разрушения в сравнении с механическими способами заложена возможность достижения более высокой эффективности разрушения с низкими энергетическими затратами. Этим способом могут быть разрушены практически все горные породы и твердые диэлектрические материалы, кроме материалов с высоким содержанием электропроводящих включений. Преобразование электрической энергии генератора импульсных напряжений в механическую

работу разрушения происходит непосредственно в горной породе без промежуточных ступеней трансформации, а хрупкое разрушение осуществляется крупным сколом, что определяет высокую энергетическую эффективность способа [5, 6].

Цель настоящей работы — определение влияния энергоклада в канал разряда на эффективность ЭИ бурения скважин большого диаметра (400 мм) в граните.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве источника высоковольтных импульсов использовался генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Маркса, на рабочее напряжение U до 600 кВ с запасаемой энергией W_3 от 2000 до 5000 Дж, которая определяется емкостью генератора импульсов в разряде C и уровнем зарядного напряжения. В зависимости от условий бурения частота следования импульсов f изменялась в диапазоне от 1 до 10 имп/с. В связи с изменением частоты результаты по скорости бурения рассчитывались для одной выбранной и наиболее часто используемой частоты следования импульсов $f = 10$ имп/с. Подобный подход корректен, поскольку известно, что скорость бурения в диапазоне f от 1 до 20 имп/с линейно возрастает с увеличением f [2].

Для бурения был разработан и изготовлен ЭИ буровой снаряд и два стальных буровых наконечника диаметром 360 мм с расстояниями между электродами $S_1 = 80$ и $S_2 = 120$ мм (рис. 1). Поскольку в экспериментах применялся генератор не погружного, а поверхностного исполнения, буровой снаряд служил передающей линией высокого напряжения от генератора импульсов к буровому наконечнику с сопутствующими в этом случае потерями энергии. Кроме того, количество энергии, выделенной в канале разряда в горной породе, существенно зависит от расстояния между электродами (сопротивления искры) и составляет 30–75 % от энергии, запасенной генератором, для межэлектродных промежутков 20–120 мм соответственно [7, 8].



Рис. 1. Общий вид бурового наконечника диаметром 360 мм: 1 — буровой снаряд; 2 — высоковольтный проходной изолятор; 3 — заземленный электрод; 4 — высоковольтный электрод

Один из факторов, определяющих скорость ЭИ бурения, — промывка. Для обеспечения эффективного удаления шлама с поверхности забоя применялась схема промывки с общей прямой циркуляцией, которая включала в себя два насоса производительностью 1900 л/мин каждый и бак для приема шлама с ситами +40, +20, +10, +5, –5 мм, соединенный сливным лотком с баком-отстойником. В качестве промывочной жидкости использовалось трансформаторное масло.

Образцы из гранита высотой 2000 мм сечением 900×800 мм забетонированы в цилиндрическом стальном корпусе. Прочность гранита при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 140$ МПа.

Для оценки эффективности ЭИ бурения выбраны следующие параметры: скорость бурения V ; производительность бурения $D = P/n$, где P — объем пробуренной скважины, n — число воздействующих импульсов; удельные энергозатраты $W_{уд} = W_{\Sigma}/P$, где $W_{\Sigma} = nW_3$; энерговклад $M = W_3/S$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ЭИ бурение скважин сопровождается образованием крупных частиц шлама [9]. В связи с этим возрастают требования к производительности промывки призабойной зоны, так как ее недостаток вызывает снижение эффективности разрушения из-за переизмельчения отбитой породы и уменьшения скорости бурения.

Для бурового наконечника с расстоянием между электродами 80 мм проведено бурение при одинаковом энерговкладе в канал разряда $M = 36.1$ Дж/мм, но при разной производительности промывки Q (таблица). Увеличение Q в 2 раза вызвало увеличение скорости бурения в 1.27 раза и уменьшение доли мелкого шлама (-5 мм) в 1.42 раза. При этом появился шлам фракции $+40$ мм, следовательно, условия промывки оказывают существенное влияние на эффективность ЭИ бурения. Увеличение расстояния между электродами до 120 мм при той же емкости в разряде ($C = 0.025$ мкФ) и промывке $Q = 3900$ л/мин привело к снижению энерговклада в 1.43 раза и вызвало увеличение скорости бурения, а также крупности фракционного состава шлама.

Фракционный состав шлама

S, мм	M, Дж/мм	V, м/ч	Состав шлама, %				
			+ 40 мм	+ 20 мм	+ 10 мм	+ 5 мм	- 5 мм
$C = 0.025$ мкФ; $Q = 1900$ л/мин							
80	36.2	1.5	—	1.2	7.0	13.5	78.4
$C = 0.025$ мкФ; $Q = 3900$ л/мин							
80	36.1	1.9	1.4	8.3	15.4	19.8	55.1
120	25.3	2.2	1.8	10.5	13.0	18.6	56.1
$C = 0.04$ мкФ; $Q = 3900$ л/мин							
80	61.0	3.3	1.7	10.8	14.0	19.3	54.0
120	45.7	4.8	4.0	15.0	16.1	20.3	44.6

Увеличение энерговклада в 1.7–1.8 раза при $C = 0.04$ мкФ для $S = 80$ и 120 мм повышает скорость бурения в 1.73 и 2.18 раза соответственно, т. е. для $S = 120$ мм приращение скорости более значительное (таблица). При этом возрастает доля крупного шлама ($+40$ мм), что еще раз подчеркивает значимое влияние условий промывки. Из таблицы следует, что величина энерговклада в канал разряда оказывает влияние на изменение скорости бурения. На рис. 2 представлена подобная зависимость при бурении скважин в граните диаметром 400 мм.

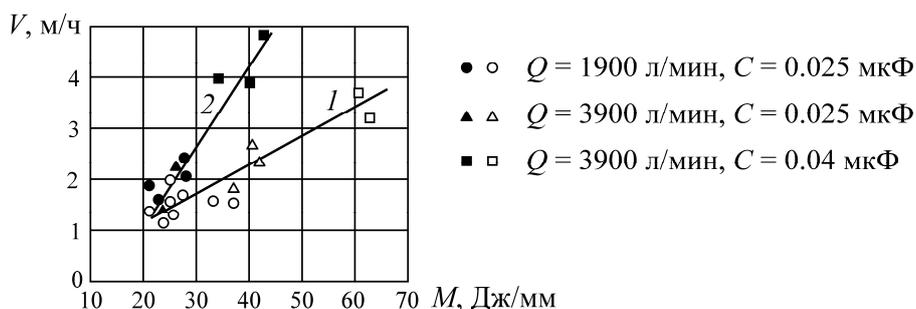


Рис. 2. Зависимость скорости бурения от энерговклада: 1 — $S_1 = 80$ мм; 2 — $S_2 = 120$ мм

Увеличение энерговклада в исследованном диапазоне вызывает линейное возрастание скорости бурения для обоих S , но для $S = 120$ мм приращение V с ростом M больше. Это в первую очередь определяется производительностью разрушения горной породы, которая пропорциональна S^2 [10]. При одинаковом энерговкладе (40 Дж/мм) скорость бурения при $S = 120$ мм в 1.83 раза выше, чем при $S = 80$ мм. Следовательно, увеличение расстояния между электродами — эффективный способ повышения скорости бурения.

Энергозатраты $W_{уд}$ являются одной из важных характеристик бурения горных пород любым способом. Рассмотрим вопрос о влиянии энерговклада M на энергозатраты при ЭИ бурении скважин большого диаметра. В [2, 11] показано, что зависимость энергозатрат от энергии, запасаемой генератором импульсов, имеет минимум. На рис. 3 приведена зависимость $W_{уд} = f(M)$, полученная для $S = 80$ и 120 мм. Отмечен минимум энергозатрат при определенном энерговкладе, величина которого смещается в область больших значений с увеличением S .

Минимум энергозатрат может быть одним из критериев оценки эффективности ЭИ бурения. Однако дальнейшее увеличение энерговклада вызывает увеличение скорости бурения (рис. 2, кривая 1), последняя также может являться критерием оценки эффективности бурения. Выбор того или иного критерия эффективности ЭИ бурения зависит от достаточно большого числа факторов и определяется условиями работы.

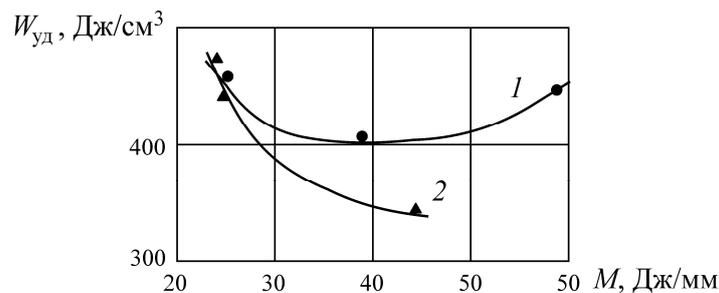


Рис. 3. Зависимость энергозатрат от энерговклада при бурении гранита буровым снарядом БИ-325: 1 — $S_1 = 80$ мм; 2 — $S_2 = 120$ мм

ВЫВОДЫ

Преимущества ЭИ способа бурения горных пород предполагают наиболее перспективное его применение при бурении скважин большого диаметра и большой глубины по крепким и очень крепким породам. Увеличение диаметра скважины позволяет реализовать большие расстояния между электродами, что в конечном счете увеличивает производительность и скорость бурения и уменьшает энергозатраты.

Результаты ЭИ бурения убедительно доказывают, что для больших расстояний между электродами увеличение расстояния в 1.5 раза увеличивает скорость бурения гранита более чем в 1.9 раза в зависимости от энерговклада в канал разряда в горной породе. При этом имеет место оптимальный энерговклад, при котором энергозатраты на бурение минимальны. Дальнейшее увеличение энерговклада увеличивает скорость бурения, но при этом возрастают энергозатраты. Выбор условий бурения должен определяться технико-экономическими показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство на открытие № А-122. Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, А. Т. Чепиков. — 29.04.1998.

2. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. — СПб.: Наука, 1995. — 276 с.
3. Важов В. Ф., Дацкевич С. Ю., Журков М. Ю., Кураков А. Г., Муратов В. М., Редланд А. Электроимпульсная буровая установка с погружным источником высоковольтных импульсов // Проблемы геологии и освоения недр: сб. трудов симп. — Томск: Изд-во НИ ТПУ. — 2010. — Т. 1. — С. 187–190.
4. Bоеv S., Vajov V., Levchenko B., Jgun D., Muratov V., Peltsman S., Adam A., Uemura K. Electro-pulse technology of material destruction and boring, 11th IEEE International Pulsed Power Conf., Baltimore, 1997, Vol. 1. — P. 220–225.
5. Пат. 2083824 С1 РФ. Способ разрушения горных пород / А. М. Адам, В. Ф. Важов, Г. А. Воробьев, Б. С. Левченко, Б. В. Семкин, А. Т. Чепиков // Оpubл. в БИ. — 1997. — № 19.
6. Пат. 2123596 С1 РФ. Электроимпульсный способ бурения скважин и буровая установка / А. М. Адам, В. Ф. Важов // Оpubл. в БИ. — 1998. — № 35.
7. Буркин В. В., Кузнецова Н. С., Лопатин В. В. Образование откольной каверны при электровзрыве в диэлектрике // ПМТФ. — 2010. — № 1. — С. 162–172.
8. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Завадовская Е. К., Каляцкий И. И. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. — Томск: Изд-во ТГУ, 1971. — 226 с.
9. Важов В. Ф., Дацкевич С. Ю., Журков М. Ю., Муратов В. М., Рябчиков С. Ю. Гранулометрический состав шлама при электроимпульсном разрушении горных пород // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 118–125.
10. Важов В. Ф., Гафаров Р. Р., Дацкевич С. Ю., Журков М. Ю., Муратов В. М. Электроимпульсный пробой и разрушение гранита // Техн. физика. — 2010. — № 6. — С. 79–84.
11. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. — 324 с.

Поступила в редакцию 2/VI 2016