

05

Разрушение горных пород разрядами при повышенных давлениях и температурах

© В.Ф. Вазов, Р.Р. Гафаров, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков,
В.В. Лопатин, В.М. Муратов, В. Jeffryes

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск
Schlumberger, Cambridge Research Center
E-mail: muratov@hvd.tpu.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2010 г.

Проведены исследования электроимпульсного разрушения песчаника, известняка и гранита при совместном увеличении давления до 350 atm и температуры до 110°C. Получены зависимости изменения глубины разрушения, производительности разрушения, энергозатрат.

Электроимпульсный способ разрушения твердых диэлектрических и полупроводящих тел [1] находит практическое применение для бурения глубоких скважин в горных породах. Это обусловлено возможностью обеспечения высокой скорости бурения при практически неизменяющемся буровом наконечнике (электродной системе) и низкими энергозатратами.

Бурение осуществляется в системе наложенных на твердое тело электродов в изолирующей или полупроводящей жидкости за счет откола разрушаемого материала на свободную поверхность [2]. Источником механических напряжений является внедренный в твердое тело разрядный канал, расширяющийся при импульсном введении в него энергии [3].

Увеличение глубины забоя скважины приводит к росту давления прорывочной жидкости и горной породы, а также их температуры, которые изменяют электрическую прочность твердых [4] и жидких диэлектриков [5] и могут кардинально изменить траекторию разрядного канала и соответственно объем откольной каверны.

Целью работы являются исследования влияния температуры и давления на производительность и энергозатраты электровзрывного разрушения горных пород.

Исследования проводились в камере, обеспечивающей давление жидкости до 350 atm, температуру до 110°C и импульсное напряжение до 400 kV. Давление в камере объемом 6.2 л регулировалось гидравлическим мультипликатором. Нагрев жидкости и образцов горной породы осуществлялся резистивным нагревателем, расположенным внутри объема камеры, а температура образцов контролировалась термопарой. Импульсное напряжение подавалось в камеру через высоковольтный ввод из поликарбоната, имеющего высокую механическую прочность и рабочую температуру.

Исследования проводились на горных породах, отличающихся по физико-механическим характеристикам, составу, структуре и условиям образования: песчанике (предел прочности при одноосном сжатии 86 МПа), известняке (120 МПа) и граните (160 МПа). Образцы размером 120 × 80 × 40 mm вырезались из массивного куска породы. В камере образцы закреплялись на диэлектрической подставке и на большую поверхность накладывались стержневые электроды, один из которых был заземлен. Расстояние между электродами (S) составляло 20 mm. Камера заполнялась буровым раствором VersaPro, используемым для бурения глубоких скважин.

Источником высокого импульсного напряжения являлся генератор импульсов Маркса с максимальными запасенной энергией 500 J и напряжением 400 kV. Пробой осуществляется на фронте импульса напряжения положительной полярности длительностью 0.22 μs.

Значения длины L , ширины B , глубины H и объема откольной каверны V (рис. 1) измерялись после подачи на образец пяти импульсов высокого напряжения. Это обусловлено, во-первых, вероятностным характером внедрения канала разряда в твердое тело (при расстоянии между электродами 20 mm вероятность внедрения в гранит составляет 75–85% [2]), во-вторых, тем, что наибольшая эффективность разрушения достигается при подаче пяти импульсов [6].

Удельные затраты энергии на образование каверны при числе импульсов n определялись по запасенной энергии W в конденсаторах генератора Маркса:

$$w = \frac{W n}{V}.$$

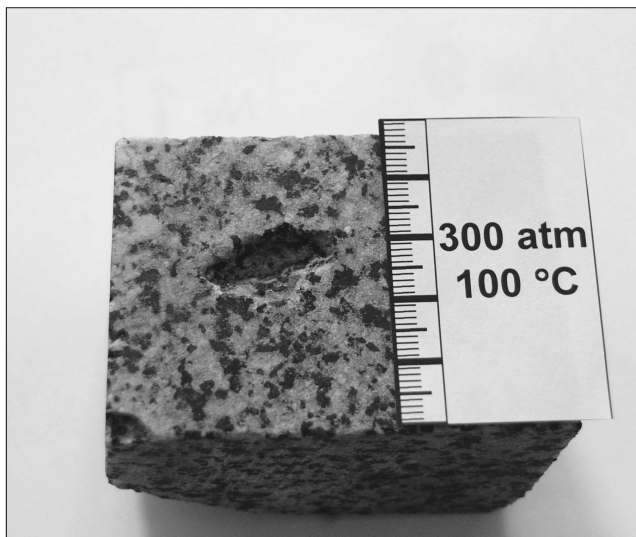
*a**b*

Рис. 1. Образцы гранита после внедрения: *a* — $P = 1 \text{ atm}$, $T = 20^\circ\text{C}$; *b* — $P = 300 \text{ atm}$, $T = 100^\circ\text{C}$.

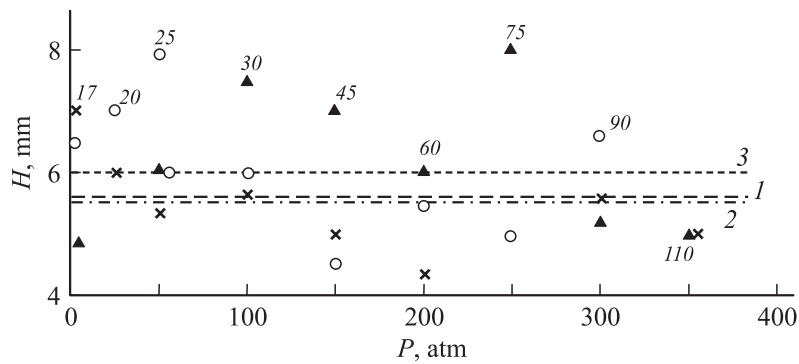


Рис. 2. Зависимость глубины разрушения от давления и температуры. 1 — песчаник (○), 2 — известняк (×), 3 — гранит (▲).

Соответственно производительность разрушения на один импульс определялась как $Q = V/n$. В каждом опыте испытывалось 5–10 образцов, а результаты усреднялись. H , V и L зависят от траектории разрядного канала [2], энергии [6] и скорости ее введения в плазму канала [3], механических и волновых характеристик разрушаемого материала. Траектория разрядного канала стохастична и определяется условиями внедрения разрядного канала в твердое тело, причины которого являются дискуссионными [1,7,8].

На рис. 2 приведены зависимости глубины разрушения H при одновременном воздействии давления и температуры, на рисунке и далее цифры у точек указывают температуру в градусах Цельсия. Несмотря на существенную дисперсию полученных результатов, можно утверждать, что глубина разрушения не зависит от P и T . При этом средние значения близки для исследованных горных пород и составляют $\bar{H} \approx (0.27 - 0.32)S$ во всем диапазоне давлений и температур, т.е. приблизительно такие же, как и при нормальных для поверхности земли условиях [2]. Аналогичный результат был получен в [9] при межэлектродном зазоре 11 mm в диапазоне давлений 1–150 atm и комнатной температуре. Глубина каверн слабо зависит от электрофизических и упругопластических свойств горной породы.

Если глубина откольной каверны слабо меняется с ростом давления и температуры, то ширина и длина заметно уменьшаются, что приводит

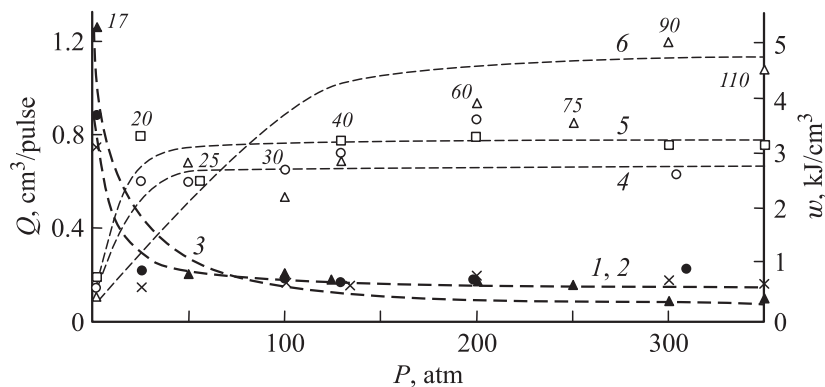


Рис. 3. Зависимость производительности разрушения (1–3) и энергозатрат (4–6) от давления и температуры: 1, 4 — песчаник (○, ●), 2, 5 — известняк (×, □), 3, 6 — гранит (△, ▲).

к снижению объема V и производительности Q . Наиболее корректно определять производительность по величине объема каверны, так как он измерялся с точностью не менее 5% и обладал меньшей дисперсией. Рис. 3 иллюстрирует зависимость изменения средней производительности разрушения, пересчитанной на один импульс при совместном увеличении давления и температуры. Происходит быстрое уменьшение объема разрушения при относительно низких давлениях 25–50 atm и близкой к комнатной температуре. Следовательно, определяющую роль в снижении Q играет давление. При этом более существенное значение имеют физико-механические свойства горной породы. В табл. 1 приведены значения относительного изменения объема откольной воронки для исследованных горных пород. При атмосферных условиях ($P = 1$ atm, $T = 17^\circ\text{C}$) объем разрушения для песчаника и известняка значимо меньше, чем для гранита. Но для давления $P = 50$ atm относительное снижение V для гранита значительно больше, чем для песчаника и известняка. Эта особенность сохраняется при дальнейшем увеличении P вплоть до 350 atm (рис. 3, табл. 1). Следует отметить, что абсолютные значения объемов разрушения для разных пород при высоких давлениях и температурах сближаются, а при $P \sim 100$ atm практически одинаковы (рис. 3).

Таблица 1. Относительное изменение объема разрушения

Горная порода	Относительное изменение Q		
	$P = 1 \text{ atm},$ $T = 17^\circ\text{C}$	$P = 50 \text{ atm},$ $T = 25^\circ\text{C}$	$P = 350 \text{ atm},$ $T = 110^\circ\text{C}$
Гранит	1.0	6.5	11.2
Известняк	0.73	3.7	4.6
Песчаник	0.62	4.5	5.6

Таблица 2. Относительное изменение энергозатрат

Горная порода	Относительное изменение w		
	$P = 1 \text{ atm},$ $T = 17^\circ\text{C}$	$P = 50 \text{ atm},$ $T = 25^\circ\text{C}$	$P = 350 \text{ atm},$ $T = 110^\circ\text{C}$
Гранит	1.0	6.6	11.4
Известняк	1.65	4.6	4.6
Песчаник	1.36	4.5	5.4

Энергозатраты на электровзрывное разрушение при повышенных давлениях и температурах резко возрастают в диапазоне давлений до 100 atm при температурах до 30°C (рис. 3, табл. 2). Дальнейшее повышение давления и температуры слабо влияет и на энергозатраты, и соответственно на производительность разрушения. Наибольшее относительное повышение энергозатрат характерно для гранита.

Совместное повышение давления до 350 atm и температуры до 110°C приводит к уменьшению производительности электровзрывного разрушения и увеличению энергозатрат для исследованных горных пород в 5–11 раз. Наиболее значительные их изменения происходят в диапазоне давлений 1–50 atm и температур до 30°C, что в первую очередь обусловлено увеличением давления. Дальнейшее повышение давления и температуры слабо влияет на изменение производительности и энергозатрат.

Работа выполнена при поддержке Schlumberger и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF).

Список литературы

- [1] *Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Чепиков А.Т.* Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. / Свидетельство на открытие № А-122 от 29.04.1998 с приоритетом от 14.12.1961.
- [2] *Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И.* Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1995. 276 с.
- [3] *Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 5. С. 42–48.
- [4] *Физика диэлектриков.* Л.-М.: ГТТИ, 1932. 560 с.
- [5] *Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.Н., Лопатин В.В.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
- [6] *Важов В.Ф., Гафаров Р.Р., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Муратов В.М.* // ЖТФ. 2010. № 80. В. 6. С. 79–84.
- [7] *Воробьев Г.А., Чепиков А.Т., Важов В.Ф.* // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. Т. 199. С. 110–113.
- [8] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 24. С. 51–59.
- [9] *Кривко В.В.* Исследование импульсных характеристик пробоя различных сред и разрушение горных пород при повышенных давлениях и температурах / Дис. . . . канд. техн. наук. Томск, 1964. 171 с.