Д.В.ЖГУН, В.Ф.ВАЖОВ, М.Ю.ЖУРКОВ
Томский политехнический университет,
Россия

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И БУРЕНИЕ СКВАЖИН

Традиционные способы разрушения и обработки горных пород и искусственных материалов, основанные на механическом разрушении, практически приблизились к пределу своих технических возможностей. Неизбежным недостатком наиболее распространенных механических способов разрушения, как следствие применения интенсивного давления на породу, являются высокие удельные энергозатраты, малая стойкость и высокий износ разрушающего

инструмента. Другой особенностью механических способов разрушения материалов является ярко выраженная зависимость показателей разрушения от крепости породы, особенно резкое снижение эффективности разрушения по скальным породам и мерзлым грунтам.

На протяжении последних десятилетий идет интенсивный поиск и разработка новых эффективных способов разрушения.

К наиболее перспективным способам в настоящее время относятся электрофизические [5, 10], так как они позволяют без промежуточной трансформации преобразовывать запасенную электромагнитную энергию непосредственно в работу разрушения.

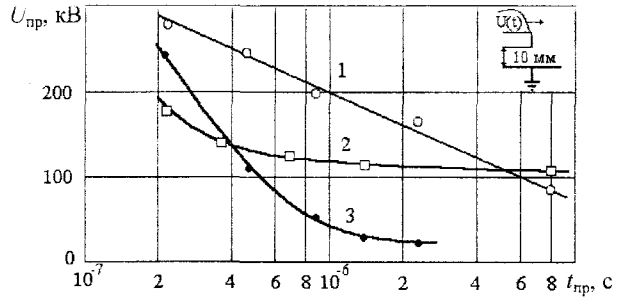


Рис.1. Вольт-секундные характеристики (ВСХ) пробоя диэлектриков
1 – трансформаторное масло; 2 – фторопласт; 3 – техническая вода

Одним из электрофизических методов разрушения горных пород является разрабатываемый в Томском политехническом университете принципиально новый – электроимпульсный (ЭИ) способ разрушения, основанный на открытии, зарегистрированном в 1999 г. [2]. В монографии [6] достаточно подробно изложены физические основы ЭИ-способа разрушения и некоторые аспекты его технологического применения, в частности: бурение скважин, дробление, обработка природного камня, разрушение железобетонных изделий и ряд других.

Рассмотрим зависимость пробивного напряжения от экспозиции напряжения до пробоя для твердых и жидких диэлектриков, а также воды (рис.1). Это так называемые вольт-секундные характеристики (ВСХ) пробоя диэлектриков. Пробой осуществляется в системе электродов «острие – плоскость». Видно, что имеет место пересечение ВСХ пробоя жидких и твердых диэлектриков. При времени, меньшем времени точек пересечения, пробивные напряжения трансформаторного масла и технической воды оказываются выше, чем твердых диэлектриков и горных пород. Следовательно, если при этих условиях расположить твердый диэлектрик в среде жидкого диэлектрика, то разряд будет проходить через твердое тело (рис.2, *б*). Наиболее выразительно этот эффект проявляется при расположении электродов на одной поверхности твердого (рис.2, *а*). При этом разряд заглубляется (внедряется) в твердое тело, а выделившаяся энергия источника (ГИН) производит разрушение. Следовательно, рабочим телом, разрушающим горную породу, является плазма канала пробоя. Износ разрушающего инструмента (электродов), изготовленного из рядовых сталей, чрезвычайно мал. Процесс разрушения, учитывая характер его протекания, можно классифицировать как электрический взрыв в объеме горной породы. При этом разрушение осуществляется за счет растягивающих усилий, что требует в 10-15 раз меньших затрат энергии, чем при механических способах. Преобразование электрической энергии источника в механическую работу разрушения происходит непосредственно в породе без промежуточных ступеней трансформации. ЭИ-способом могут быть разрушены практически все горные породы, за исключением пород с очень высокой электропроводностью.

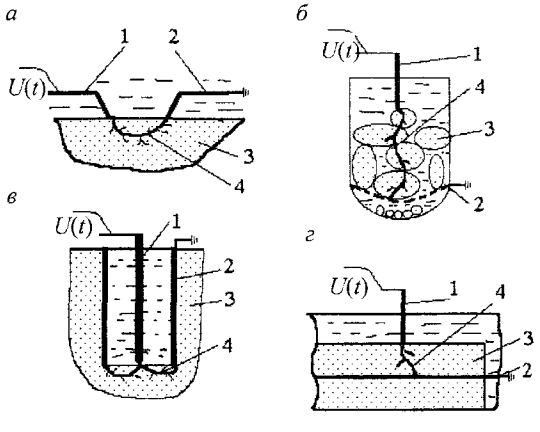


Рис.2. Схемы разрушения твердых диэлектриков электроимпульсным способом: *а* – откалывание; *б* – дробление; *в* – бурение; *г* – разрушение железобетона
1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – твердый диэлектрик; 4 – канал пробоя

Установки для ЭИ-разрушения достаточно компактны, транспортабельны и могут изготавливаться, в основном, из элементов, освоенных электротехнической промышленностью.

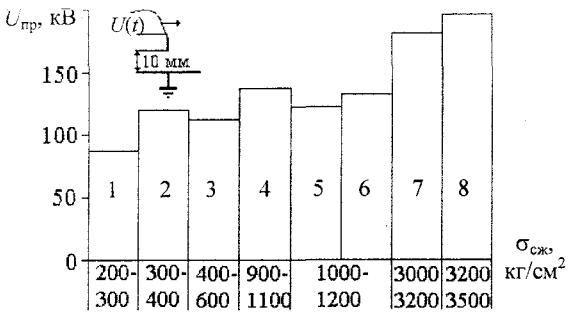


Рис.3. Распределение импульсных пробивных напряжений горных пород в зависимости от их прочности на сжатие. Время до пробоя $t_{пр}$ = 1 мкс
1 – мрамор крупнозернистый; 2 – глинистый сланец; 3 – песчаник; 4 – мрамор мелкозернистый; 5 – гранит крупнозернистый; 6 – гранит среднезернистый; 7 – фельзит-порфир; 8 - кварцит

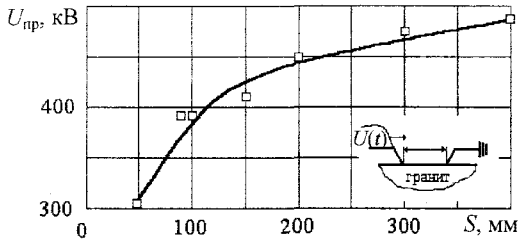


Рис.4. Зависимость пробивного напряжения гранита в воде ($\sigma_{сж}$ = 233 МПа) от расстояния между электродами

Можно выделить две стадии процесса пробоя:

1) формирование канала пробоя в твердом диэлектрике (предпробивная стадия);

2) резкое расширение канала пробоя и разрушение твердого тела в результате взрывного ввода энергии.

Первая стадия изучалась для разных материалов при различных условиях воздействия напряжения. Показано, что между коэффициентом крепости горной породы по М.М.Протодьяконову, прочностью горных пород на разрыв, плотностью пород, скоростью распространения продольных волн и акустической жесткостью горных пород и их импульсными пробивными напряжениями существует тесная корреляционная зависимость [4]. С ростом указанных показателей физических свойств горных пород их импульсные пробивные напряжения, как правило, увеличиваются. Но данное увеличение незначительно (рис.3). Очень важно, что пробивное напряжение $U_{пр}$ возрастает нелинейно с увеличением межэлектродного расстояния S (рис.4).

Вторая стадия реализуется за счет выделения в канале пробоя энергии, запасенной источником. Ударные волны, генерируемые давлением в канале пробоя, приводят к динамическим воздействиям на горную породу и разрушают ее за счет введенной в канал пробоя энергии. В результате происходит отрыв материала, расположенного над каналом пробоя, как показано на рис.2, *а*.

Научно-исследовательский институт высоких напряжений (НИИ ВН) при ТПУ развивает несколько технологий ЭИ-разрушения материалов, основанных на проникновении разряда в твердое тело, погруженное в жидкость: дробление непроводящих и полупроводящих материалов (рис.2, *б*); бурение скважин (рис.2, *а*, *в*); разрушение некондиционных железобетонных изделий (рис.2, *г*).

Интересен случай разрушения твердого тела, когда два и более электрода расположены на одной поверхности твердого тела (рис.2, *а*, *в*). В этом случае электрические разряды производят разрушение и откалывание частиц материала. Это место заполняется жидкостью. Так как электрическая прочность жидкости выше, чем твердого тела, следующий разряд происходит снова в твердом теле. Данный эффект используется для бурения скважин различного диаметра (рис.2, *в*), для проходки горизонтальных туннелей, для ремонта бетонных покрытий дорог, резания и обработки камня и др. Важно заметить, что при использовании нескольких высоковольтных и заземленных электродов пробивное напряжение горной породы уменьшается, особенно при многократном импульсном воздействии из-за возникающих при разрядах трещин, которые облегчают прохождение следующих разрядов.

Удельные энергозатраты на разрушение при ЭИ-бурении с увеличением межэлектродного расстояния S уменьшаются по гиперболическому закону и при S = 300÷400 мм составляют W_y = 10÷20 Дж/см^3 (рис.5) [8]. При таких межэлектродных расстояниях минимальный диаметр бурового наконечника составляет 1000-1200 мм. Для сравнения на рис.5 приведены удельные

энергозатраты на бурение скважин диаметром 200 мм по породам средней крепости различными традиционными способами [10]. Для ЭИ-способа бурения это соответствует межэлектродному расстоянию $S \approx 80$ мм. Из рис.5 видно, что уже при $S = 20 \div 30$ мм (диаметр бурового наконечника не менее 100 мм) ЭИ-способ бурения является конкурентоспособным с традиционными способами бурения.

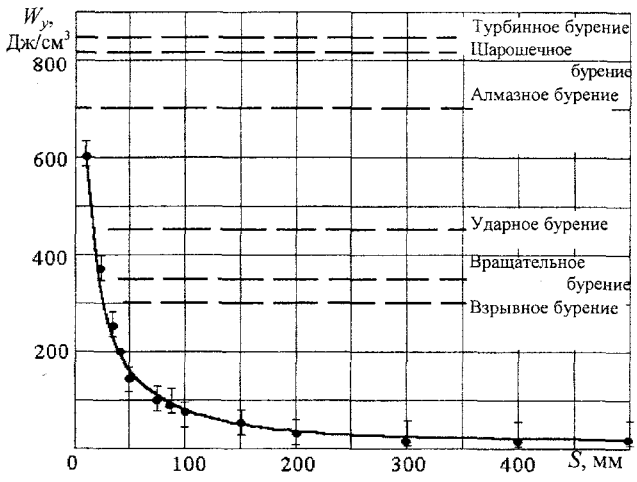


Рис.5. Зависимость усредненных удельных энергозатрат при ЭИ-разрушении горных пород

Разрушение породы осуществляется крупным сколом. Это обеспечивает высокий КПД перехода накопителя энергии в работу разрушения, низкую энергоемкость и высокую производительность отбойки породы. Последовательность разработки забоя регулируется автоматически, что исключает необходимость вращения бурового наконечника, использования других видов механических нагрузок. Все это позволяет изготавливать элементы бурового снаряда из рядовых сталей. Энергия в канал пробоя, образованного в горной породе (на забое скважины), вводится из внешнего накопителя (ГИН). Режим ее ввода можно регулировать в широких пределах путем изменения параметров разрядного контура, что позволяет активно управлять процессом разрушения, оптимизировать его параметры в зависимости от свойств горной породы, регулировать фракционный состав отбитой породы и т.д. При соответствии параметров разрушающих импульсов свойствам горной породы скорость ЭИ-бурения мало зависит от крепости горных пород. Особенностью ЭИ-способа бурения является существенное возрастание эффективности проходки с увеличением диаметра скважины, что видно из рис.5.

К настоящему времени проведены исследования по разрушению различных горных пород при пробое на фронте импульса напряжения (ФИН) и прямоугольном импульсе с наносекундным фронтом (ПИНФ).

Многочисленные лабораторные исследования и испытания электроимпульсного бурения в различных природных условиях позволили выявить следующие основные достоинства этого способа:

1. Высокий коэффициент полезного действия процесса разрушения породы на забое скважины вследствие того, что электрическая энергия без каких-либо промежуточных звеньев подводится к забою и преобразуется. Исследования [7] показывают, что до 75 % энергии разрядного контура генератора импульсных напряжений выделяется непосредственно в канале пробоя в горной породе. Коэффициент полезного действия большей части применяемых способов бурения не достигает и 10 %, что связано с большими потерями энергии в промежуточных передаточных звеньях.

2. Скорость и энергоемкость разрушения в основном определяются электрофизическими свойствами горных пород [3]. Из диаграммы (рис.6) видно, что прочность габбро на сжатие превышает прочность слабых сланцев в 12 раз, тогда

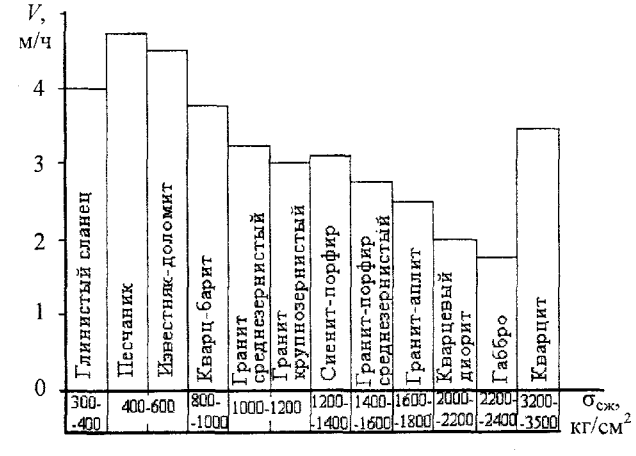


Рис.6. Изменение скорости электроимпульсного бурения в зависимости от предела прочности горных пород на сжатие

как скорость электроимпульсного бурения габбро ниже всего в 2,3 раза. При механических способах бурения такое превышение прочности горных пород приводит к снижению скорости бурения в 12-15 раз.

3. Простота создания больших мощностей на забое скважины.

4. Износ бурового наконечника незначителен, поскольку рабочим органом, разрушающим горную породу, является, по существу, электрический разряд в твердом теле. Имеется возможность проходки в крепких породах сотен метров скважины без смены бурового наконечника, изготовленного их сравнительно дешевых материалов, например сталей. До половины износа электродов буровых наконечников приходится на электрическую эрозию [6], а остальной износ происходит при спускоподъемных операциях и при воздействии шлама.

5. Отсутствие необходимости во вращении бурового снаряда и в давлении на забой скважины, что значительно снижает потери энергии, исключает аварии, вызванные вращением бурового снаряда и давлением на буровой наконечник, снижает требования к прочности колонны бурильных труб.

6. Возможность бурения скважин с отбором керна, в том числе ориентированного. Это позволяет не только вести геолого-разведочные работы, но и бурить скважины большого диаметра, не разрушая керн до шлама, а скалывая в виде крупных кусков породы.

7. Частицы шлама имеют сравнительно большие размеры, например, при больших межэлектродных промежутках буровых наконечников превышают 10 см. Это позволяет вести изучение геологических особенностей исследуемого района по частицам шлама.

8. Возможность бурения скважин любого сечения и даже перехода от одной формы к другой, что важно для получения ориентированного керна, строительных работ, размещения зарядов взрывчатых веществ и другого. Практически было выполнено бурение скважин квадратного, прямоугольного, эллипсообразного сечений и с переходом от круглого сечения к прямоугольному большой площади.

9. Возможность эффективного искусственного искривления скважин и многозабойного бурения.

Процесс ЭИ-бурения скважин состоит из двух основных этапов: отбойка породы от массива и вынос ее на поверхность. Оба этапа по приоритету равны. Вынос отбитой породы осуществляется той же жидкостью, в которой происходит разрушение породы. Это электроизоляционные жидкости самого различного состава, до воды включительно.

Дальнейшее развитие ЭИ-способа разрушения связано с необходимостью использовать в качестве изолирующей среды экологически безопасные и дешевые жидкости. Ранее проведенное бурение показывает [1, 6], что использование технической воды приводит к значительному снижению себестоимости разрушения, улучшению условий эксплуатации ЭИ-установок и повышению безопасности при проведении работ. Поэтому в настоящее время вопросу использования технической воды в качестве изоляционной жидкости при ЭИ-разрушении горных пород (бурении, резании) уделяется большое внимание [9].

Однако при практическом использовании воды имеется ряд трудностей, которые не только тормозят, но и, по существу, не позволяют решить данную задачу при пробое на ФИН. При использовании воды в качестве изолирующей жидкости крутизна фронта импульса напряжения значительно повышается ($A \geq 2000 \div 3000$ кВ/мкс) по сравнению с пробоем в диэлектрических жидкостях ($A = 300 \div 500$ кВ/мкс) [6]. Поэтому в воде пробой горных пород на фронте импульса напряжения осуществляется в короткие промежутки времени (десятки-сотни наносекунд), что приводит к возрастанию пробивного напряжения. Добиться снижения пробивного напряжения можно, увеличивая время до пробоя, для чего необходимо повышать длительность фронта импульса. При пробое в воде увеличение длительности фронта импульса нежелательно, так как увеличиваются потери энергии в предпробивной стадии.

Предложенная нами методика пробоя горных пород на спаде импульса напряжения (СИН) позволяет значительно увеличить время до пробоя без изменения длительности фронта импульса. При этом вероятность внедрения канала разряда в горную породу составляет 100 % при $t < t_{кр}$. Сравнение полученных нами результатов по пробою горных пород на спаде импульса напряжения

с имеющимися данными по пробою на фронте импульса (ФИН) [4] и на прямоугольном импульсе с наносекундным фронтом (ПИНФ) [1] (см. таблицу) показывает, что при одинаковом времени до пробоя пробивное напряжение гранита на СИН ниже в 2,26-2,38 раза, чем при пробое на ФИН, и в 1,61-1,98 раза ниже, чем на ПИНФ. При этом крутизна фронта импульса составляет не более 1100 кВ/мкс. Полученный эффект снижения пробивного напряжения позволяет использовать увеличенные межэлектродные промежутки при конструировании буровых наконечников для бурения скважин в горных породах в среде технической воды. Увеличение межэлектродного промежутка вызывает незначительное возрастание пробивного напряжения, и приводит к росту производительности бурения и снижению удельных энергозатрат (см. рис.5) [6].

Результаты исследований

S, мм	$t_{пр}$, мкс	Пробивное напряжение, кВ			$U_п/U_с$	$U_ф/U_с$
		на ПИНФ $U_п$	на ФИН $U_ф$	на СИН $U_с$		
20	0,5	258	310	130	1,98	2,38
30		281	395	175	1,61	2,26

Нами ведется разработка бурового снаряда для бурения скважин диаметром до 300 мм с использованием в качестве рабочей жидкости воды.

К настоящему времени достигнуты следующие характеристики ЭИ-бурения при использовании диэлектрических жидкостей: диаметр скважины 80-1100 мм; расстояние между электродами 20-300 мм; амплитуда импульсного напряжения 200-700 кВ; энергия в импульсе 0,5-20 кДж; средняя скорость бурения скважины диаметром 250 мм при частоте следования импульсов 8 имп/с составляет 17 м/ч.

Установки для ЭИ-бурения скважин испытывались в полевых условиях в различных регионах бывшего СССР: Рудный Алтай (микрокварциты), Курская магнитная аномалия (железистые кварциты), Колыма (вечная мерзлота с валунами и прослойками льда), трасса БАМ (вечная мерзлота), район г.Томска (песчаники, глинистые сланцы), Кольский полуостров, район Донбасса (глинистые сланцы). Установки показали хорошую работоспособность, что дает возможность перехода к созданию промышленных установок для бурения скважин различного назначения. Следует отметить принципиально более высокую производительность ЭИ-бурения, по сравнению с традиционными механическими способами, что было отмечено всеми контрольными комиссиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Брылин В.И.* Разрушение горных пород и бурение скважин с применением в качестве промывочной жидкости воды прямоугольными импульсами напряжения с наносекундным фронтом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1972. 20 с.

2. *Воробьев А.А.* Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения / А.А.Воробьев, Г.А.Воробьев, А.Т.Чепиков // Свидетельство на открытие № А-122 от 29.04.1998 с приоритетом от 14.12.1961.

3. *Игнатенко Л.Л.* Исследование электроимпульсной буримости горных пород и руд: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1965. 23 с.

4. *Малахов В.С.* Исследование импульсной электрической прочности горных пород применительно к их разрушению электроимпульсным способом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1968. 22 с.

5. Новые методы разрушения горных пород / М.А.Емелин, В.Н.Морозов, Н.П.Новиков и др. М.: Недра, 1990. 240 с.

6. *Семкин Б.В.* Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б.В.Семкин, А.Ф.Усов, В.И.Курец. СПб: Наука, 1995. 276 с.

7. *Синебрюхов А.Г.* Исследование энергетических характеристик импульсного разряда в твердых диэлектриках и электроимпульсное резание горных пород: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1964. 21 с.

8. Electropulse technology of material destruction and boring / S.Boev, V.Vajov, D.Jgun, V.Muratov, S.Peltsman, A.Adam, K.Uemura // Digest of Technical Papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference – USA, Baltimore, 1998. Vol.1 P.220-225.

9. Destruction of granite and concrete in water with pulse electric discharges / S.Boev, V.Vajov, D.Jgun, B.Levchenco, V.Muratov, A.Adam, K.Uemura // Digest of Technical Paper 12th IEEE International Pulsed Power Conference- USA, Monterey, 1999. P.1369-1371.

10. *Maurer W.C.* Novel Drilling Techniques. GB: Pergamon Press, 1968. 110 p.