

04;05;12

Электроимпульсный пробой и разрушение гранита

© В.Ф. Важов, Р.Р. Гафаров, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков, В.М. Муратов

Научно-исследовательский институт высоких напряжений Томского политехнического университета,
634028 Томск, Россия
e-mail: muratov@hvd.tpu.ru

(Поступило в Редакцию 18 августа 2009 г.)

Проведены исследования разрушения гранита электроимпульсным способом для двухэлектродной системы в диапазоне изменения расстояний между электродами 10–300 мм и энерговыклада на единицу длины межэлектродного промежутка 3.6–100 Дж/мм. Получены эмпирические зависимости для пробивного напряжения, глубины разрушения, производительности разрушения, удельных энергозатрат в функции расстояния между электродами.

Введение

Поиск новых способов и методов разрушения твердых тел (в частности, горных пород) привел к открытию принципиально нового способа — электроимпульсного [1,2]. К настоящему времени выполнен значительный объем научно-исследовательских работ, направленных на изучение закономерностей электрического пробоя различных диэлектрических сред: твердых, жидких, газообразных. Установлено, что при воздействии импульсного напряжения на твердые и жидкие диэлектрики их вольт-секундные характеристики имеют различный коэффициент импульса $\beta = U/U_b$, где U — напряжение пробоя на импульсном напряжении, U_b — напряжение пробоя на постоянном напряжении.

Уменьшение времени приложения импульсного напряжения приводит к более быстрому росту U жидких диэлектриков по сравнению с твердыми. Это обуславливает инверсию электрической прочности указанных сред в микросекундном диапазоне времен, т.е. электрическая прочность диэлектрических жидкостей и даже технической воды становится выше, чем у твердых диэлектриков. Действительно, если в жидкой среде на одну поверхность твердого диэлектрика установить систему из двух стержневых электродов и воздействовать импульсом высокого напряжения соответствующей длительности, то пробой происходит в объеме твердого диэлектрика — канал разряда внедряется в твердый диэлектрик на определенную глубину. При этом если в канал разряда будет достаточно быстро выделено необходимое количество энергии, то произойдет электровзрыв в твердом теле между электродами с образованием откольной воронки [3].

В самой сущности электроимпульсного способа разрушения заложена возможность достижения более высокой по сравнению с механическими способами эффективности разрушения с низкими энергетическими затратами. Динамический характер нагружения обеспечивает хрупкое разрушение материала без потерь энергии на пластическую деформацию. Низкие энергозатраты обусловлены также тем, что разрушение материала происходит крупным сколом. При электроимпульсном

разрушении подвод энергии к каналу разряда может регулироваться заданным образом по величине и времени выделения, т.е. имеется возможность регулирования процесса разрушения.

Данное явление было реализовано для широкой гаммы технологического применения и, в частности, для бурения, дробления, резания горных пород, разрушения поверхностных слоев и т.д. В работе [4] систематизирован широкий круг вопросов, связанных с электроимпульсным разрушением твердых диэлектриков и горных пород, но технологические аспекты разрушения не отражены.

В настоящей работе проведены исследования закономерностей изменения основных характеристик электроимпульсного разрушения гранита как одной из наиболее распространенных крепких и очень крепких горных пород в широком диапазоне изменений расстояния между электродами и энерговыклада на единицу длины межэлектродного промежутка.

Методика проведения исследования

Исследования проводились на генераторах импульсов Аркадьева–Маркса с регулируемыми разрядными напряжениями и значениями запасенной энергии. Волновое сопротивление генераторов изменялось в диапазоне 12.5–19.2 Ом. Электродная система всегда состояла из двух стержневых электродов диаметром 8–10 мм. Электроды устанавливались на одну поверхность образца гранита. Расстояние между электродами S изменялось в диапазоне 10–300 мм. Гранит имел среднезернистое строение с относительно узким диапазоном изменения удельной механической прочности на сжатие: $\sigma = 120–160$ МПа. Размеры образцов $400 \times 300 \times 250$ мм. Жидкий средой являлось загрязненное трансформаторное масло с электрической прочностью $E = 40$ кВ/см. В процессе испытаний измерялись: пробивное напряжение U , время до пробоя t , параметры откольной воронки — максимальная глубина H и объем разрушения V . Ток в разрядной цепи всегда имел колебательный характер. Он оценивался по амплитуде и

периоду колебаний. Период колебаний тока T для разных генераторов изменялся в диапазоне $5.6\text{--}8.0\ \mu\text{s}$, что практически соответствует оптимальному значению — $6.4 < T < 24.7\ \mu\text{s}$, рекомендуемому работой [4].

Разрушение при электровзрыве оценивалось следующими характеристиками:

— относительная глубина разрушения откольной воронки $h = H/S$;

— энергия, запасенная генератором импульсов, $W = CU_0^2/2$, где C — разрядная емкость генератора, U_0 — напряжение генератора, определяемое как величина зарядного напряжения, умноженная на число ступеней генератора;

— производительность разрушения за один импульс $Q = V/n$, где n — число воздействующих импульсов;

— удельные энергозатраты на разрушение породы и образование откольной воронки $w = W_\Sigma/V$, где $W_\Sigma = nW$;

— энерговыклад в единицу длины межэлектродного промежутка $M = W/S$.

Результат и их обсуждение

Пробивные напряжения гранита

Для осуществления процесса пробоя горной породы при электроимпульсном способе разрушения следует правильно определить пробивное напряжение в диапазоне необходимых времен. Многообразие условий и факторов, влияющих на развитие процесса пробоя, затрудняет получение обобщающих зависимостей, которые можно было бы использовать в качестве аналитического решения. Задача еще более усложняется при наложении электродов на одну поверхность и при неизбежном увеличении длины канала разряда из-за его внедрения в гоную породу. В работе [4] приведен ряд расчетных зависимостей U , полученных разными авторами при пробое в системе электродов „острие—плоскость“.

Известно [1], что электрическая прочность диэлектриков зависит как от формы электродов, так и от способа их расположения (в [4] электроды располагаются на противоположных поверхностях образцов). Кроме того, указанные результаты затруднительно использовать для конкретной горной породы. Горные породы по составу крайне неоднородны, что вызывает большую дисперсию как пробивных напряжений, так и времен до формирования пробоя. В процессе разрушения происходит трещинообразование в монолите горной породы, что снижает ее пробивное напряжение, но при этом увеличивается длина канала разряда для последующих импульсов, что увеличивает пробивное напряжение. Возникают два взаимно противодействующих фактора, которые в настоящее время могут быть учтены только экспериментальным путем.

Нами проведены измерения пробивных напряжений для гранита при последовательном разрушении различным числом импульсов. На рис. 1 приведен зависимости

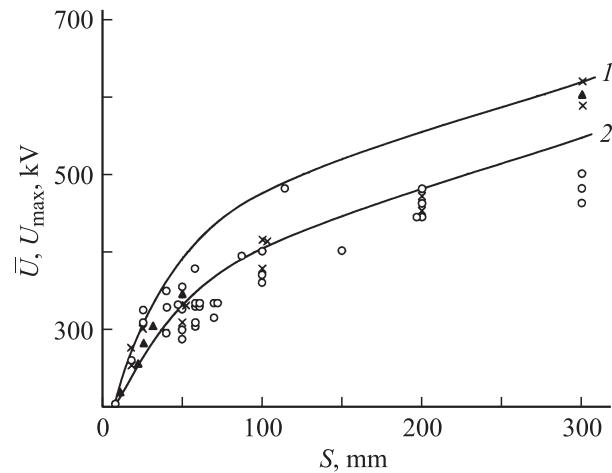


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами для разного числа импульсов, точки — эксперимент: \circ — $n = 3$, \times — 6 , \blacktriangle — $6\text{--}15$. Кривые — расчет: 1 — U_{\max} , 2 — U .

пробивного напряжения от расстояния между электродами при времени до пробоя $t \cong 0.2\text{--}0.35\ \mu\text{s}$ для разного числа воздействующих импульсов с 3 до 15 при неизменном расположении электродов. Увеличение числа воздействующих импульсов практически не влияет на величину пробивного напряжения. Но в работах [4,5] отмечается, что повторные воздействия импульса напряжения на горную породу при электродах, наложенных на одну поверхность образца, снижают пробивное напряжение на 25%. Это, по нашему мнению, объясняется методическими особенностями данных работ: сравнение U проводится относительно первого импульса на исходной поверхности образца. В настоящей работе рассматривается ситуация, соответствующая многоимпульсному воздействию при технологическом применении способа (бурение, резание и др.).

Многочисленные данные по пробоем твердых диэлектриков и горных пород показывают, что значения пробивных напряжений носят статистический характер и описываются нормальным законом распределения. Для технологического применения электроимпульсного способа разрушения необходимо наиболее вероятное внедрение канала в горную породу. С этой целью при осуществлении пробоя на фронте и амплитуде импульса напряжения (как необходимое требование для внедрения канала разряда в твердое тело [4,5]) следует использовать максимальное значение пробивного напряжения U_{\max} . В литературе, как правило, приводятся средние значения пробивных напряжений горных пород \bar{U} [1,3–5].

Средние и максимальные значения пробивных напряжений для гранита (рис. 1) могут быть описаны степенной функцией вида

$$U = U_{10}S^m, \quad (1)$$

где $U_{10} = 200\ \text{kV}$ и $224\ \text{kV}$ — пробивные напряжения при расстоянии между электродами $S = 10\ \text{mm}$ для сред-

них (\bar{U}) и максимальных значений (U_{\max}) соответственно; $m = 0.3$ — экспериментальный коэффициент. На рис. 1 кривые 1, 2 — расчетные значения максимальных (кривая 1) и средних (кривая 2) величин U для разных S . В работе [4] для каменной соли и льда коэффициент $m = 0.6$, а в [6] для микрокварцита — $m = 0.4$.

Следовательно, при пробое горных пород разного минералогического состава с существенно различающимися электрофизическими характеристиками (например, каменная соль, гранит, микрокварцит) функциональная зависимость $U = f(S)$ сохраняется в виде $U \equiv S^m$. При этом $m < 1$ и его значение зависит от свойств горной породы. Как отмечается в [4], изменения \bar{U} могут быть двукратными при пробое песчаника и кварцита, для которых удельная прочность на сжатие различается в 7 раз.

Глубина разрушения при внедрении канала разряда в гранит

Процесс электроимпульсного разрушения горных пород многофакторный и, в частности, зависит от свойств, строения и состава горной породы, характеристик жидкой среды, параметров импульса напряжения, механизма развития канала разряда в жидкой и твердой фазах и ряда других параметров. Одной из важных характеристик разрушения является глубина внедрения канала разряда. Аналитическое рассмотрение задачи определения этой глубины при заданных ограничениях приводит к зависимости $H = 0.32S$ [4,5]. Эксперименты показывают, что глубина внедрения канала разряда имеет стохастическую природу, а литературные данные зависят, главным образом, от различных методик проведения экспериментов. Случайный характер развития канала в результате пробоя горной породы приводит к существенной дисперсии значений максимальной глубины внедрения. В горных породах трудно определить глубину внедрения разрядного канала. Как правило, определяется глубина разрушения откольной воронки, которая больше чем глубина внедрения. Известно, что с увеличением расстояния между электродами абсолютная глубина внедрения канала разряда в твердое тело возрастает, а относительная — уменьшается [4,5].

На рис. 2 приведены относительные значения максимальной глубины разрушения гранита от расстояния между электродами. Значения H измерялись после воздействия трех импульсов напряжения, а не одного, как в [4,5]. Даже в этом случае имеет место существенная дисперсия значений глубины разрушения, особенно при малых значениях S . Например, для $S = 10$ мм различие H для минимальных и максимальных значений — двукратное. Увеличение расстояния между электродами в 30 раз (от 10 до 300 мм) приводит к уменьшению среднего значения относительной глубины разрушения в 2.33 раза. На основании полученных результатов средние значения максимальной относительной глубины разрушения в зависимости от расстояния между электрода-

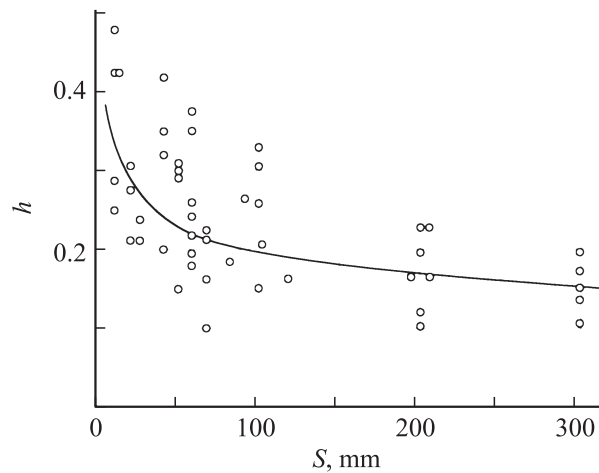


Рис. 2. Зависимость изменения относительной глубины разрушения от расстояния между электродами при $n = 3$ (точки — эксперимент, кривая — расчет.)

ми могут быть представлены выражением:

$$h = h_{10}S^a, \quad (2)$$

где $h_{10} = 0.36$ — среднее значение максимальной относительной глубины разрушения для $S = 10$ мм; $a = 0.25$ — экспериментальный коэффициент. На рис. 2 средние расчетные значения h приведены в виде кривой.

При многоимпульсном воздействии напряжения на горную породу следует ожидать увеличения глубины разрушения. На рис. 3 показаны зависимости относительной глубины разрушения от числа воздействующих на горную породу импульсов для разных расстояний между электродами. При больших S (более 100 мм) после воздействия 6–7 импульсов происходил раскол образцов. Общей закономерностью является насыщающийся характер изменения h с увеличением n . При этом для $S = 10$ мм значение h возрастает до 0.6, т.е. увеличение составило 1.69 раза при изменении n от 3 до 15 импульсов. Это, в частности, является одной из причин различных значений h , полученных разными исследователями. Главными причинами увеличения

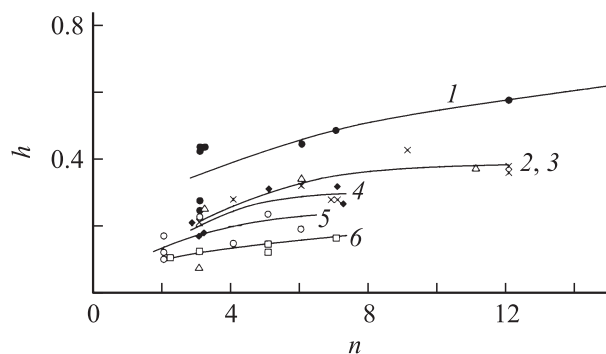


Рис. 3. Зависимость относительной глубины разрушения от числа импульсов для разных межэлектродных расстояний: 1 — $S = 10$, 2 — 20, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 300 мм.

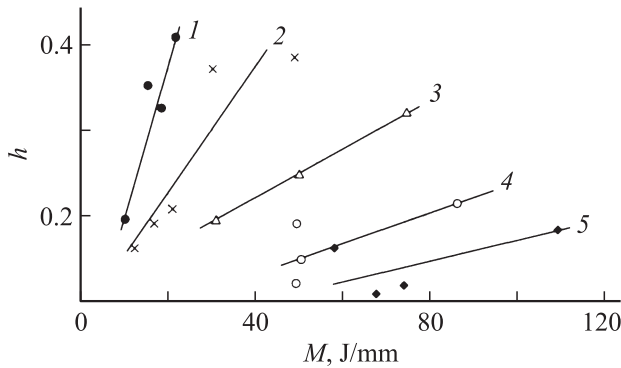


Рис. 4. Зависимость изменения относительной глубины разрушения от энерговыклада для разных межэлектродных расстояний при $n = 3$: 1 — $S = 40$, 2 — 60, 3 — 100, 4 — 200, 5 — 300 mm.

$h = f(n)$ являются трещиноватость и незавершенные каналы пробоя от предыдущих воздействий.

Гипотеза о большей величине глубины разрушения по сравнению с глубиной внедрения канала разряда в горную породу подтверждается рис. 4, где приведены зависимости h от энерговыклада M на единицу длины межэлектродного расстояния для разных S при воздействии трех импульсов напряжения. Для всех значений S глубина разрушения возрастает с увеличением энерговыклада и тем больше, чем меньше расстояние между электродами. Поскольку энерговыклад есть следствие энергии, запасаемой генератором импульсов, то для повышения производительности разрушения горной породы следует увеличивать W . Это еще одна из причин различия H у разных авторов.

Производительность электроимпульсного разрушения

Влияние на глубину разрушения гранита различных факторов (расстояния между электродами, количества импульсов, энерговыклада) неизбежно будет изменять объем разрушения — объем откольной воронки. Существенное влияние на объем разрушения должны оказывать физические характеристики различных горных пород. Рассматриваемый в данной работе гранит — гетерогенная горная порода, что вызывает большой разброс показателей разрушения, и при современном уровне знаний о закономерностях пробоя и разрушения они еще не могут аналитически с приемлемой точностью прогнозироваться без экспериментального опробования.

Увеличение числа импульсов, воздействующих на горную породу, при неподвижной электродной системе (что характерно для электроимпульсного бурения) приводит к изменению производительности разрушения, как на рис. 5. Каждая точка на рис. 5 — среднее значение для трех и более образцов. Имеет место максимальная производительность на один импульс при воздействии

от 3 до 5 импульсов для различных S . При этом максимальная производительность с увеличением S от 50 до 300 mm возрастает в 32.7 раз. Следовательно, для повышения производительности разрушения необходимо увеличивать расстояние между электродами, что подтверждают ранее полученные результаты при меньших значениях S [4,5]. Приведенные на рис. 5 результаты по максимальной производительности нельзя считать оптимальными, поскольку энергия, запасенная генератором, для каждого S выбиралась произвольным образом.

На рис. 6 приведены зависимости производительности (кривая 1) и удельных энергозатрат (кривая 2) от энергии, запасенной генератором импульсов, для $S = 60$ mm

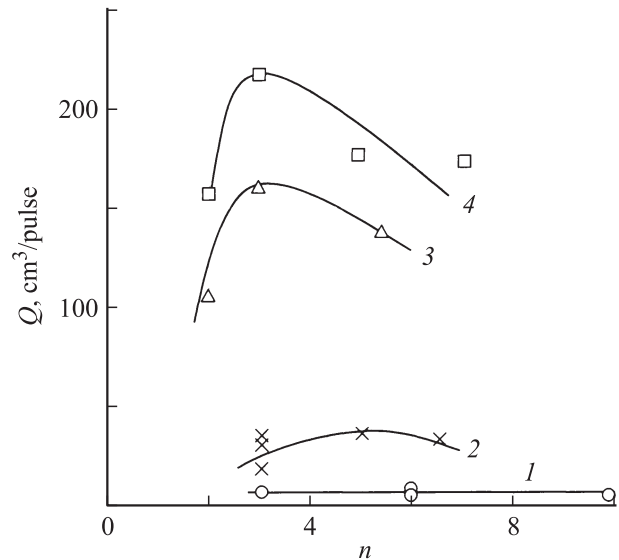


Рис. 5. Зависимость производительности разрушения от числа импульсов для разных межэлектродных расстояний: 1 — $S = 50$, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 300 mm.

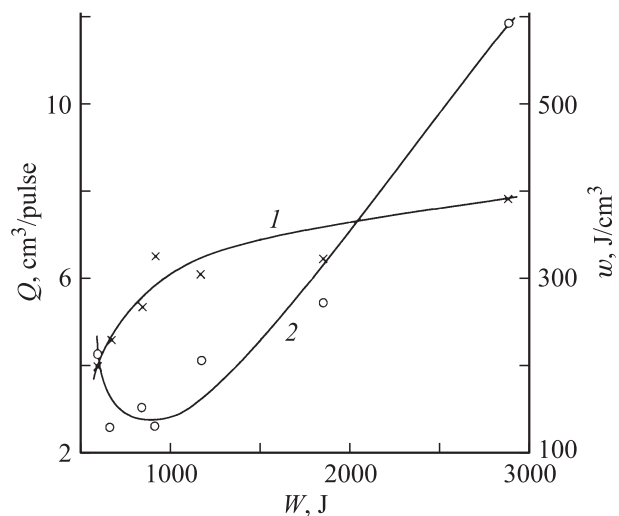


Рис. 6. Зависимость производительности разрушения и удельных энергозатрат от энергии, запасенной генератором: 1 — $Q = f(W)$; 2 — $w = f(W)$ (точки — эксперимент, кривые — расчет).

при $n = 3$, что адекватно изменению энерговклада M . Увеличение W вызывает непрерывное повышение производительности, особенно быстрое в области относительно малых W . При этом удельные энергозатраты изменяются с минимумом в области $W = 650-900$ J. Если оптимизировать процесс разрушения по удельным энергозатратам, то приведенное значение W будет оптимальным, а оптимальный энерговклад для $S = 60$ mm составит $M = 10.8-15.0$ J/mm.

Влияние энерговклада на процесс электроимпульсного разрушения

Можно предположить, что энерговклад при $S = 60$ mm не является константой для других S , поскольку абсолютная глубина внедрения возрастает с увеличением S и при неизменном периоде протекания тока необходима большая энергия импульса для образования откольной воронки. Тем не менее представляет интерес сравнить производительность и удельные энергозатраты при неизменном энерговкладе, поскольку и в литературе, и в наших экспериментах отсутствуют результаты по оптимизации W и M во всем исследуемом нами диапазоне S . Авторами проведены эксперименты при изменении энерговклада от 3.6 до 100 J/mm. Для сравнения выбраны значения энерговклада 20 и 50 J/mm как наиболее достоверные для всего диапазона расстояний между электродами.

На рис. 7 точками представлены экспериментальные значения производительности разрушения от расстояния между электродами для значений энерговклада 50 (кривая 1) и 20 J/mm (2) при воздействии трех импульсов. При изменении расстояния между электродами от 10 до 200 mm для этих значений энерговклада производительность разрушения возрастает в сотни раз. Эта

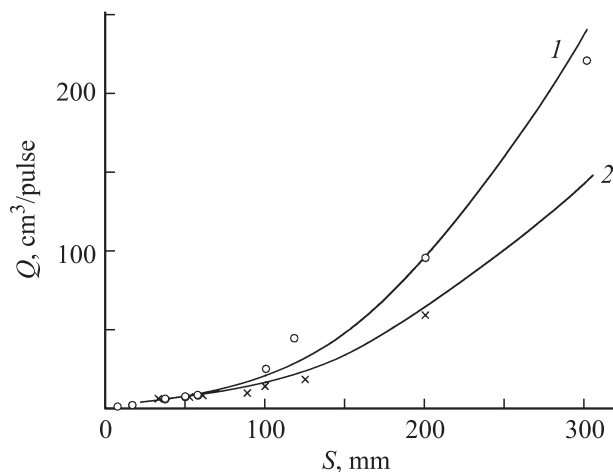


Рис. 7. Зависимость производительности разрушения от расстояния между электродами при одинаковом энерговкладе (точки — эксперимент, кривые — расчет): 1 — $M = 50$, 2 — 20 J/mm.

зависимость может быть представлена выражением вида

$$Q = 0.16S^{a_i}, \quad (3)$$

где S — расстояние между электродами; a_i — показатель степени, определяемый экспериментально: $a_{50} = 2.15$ для $M = 50$ J/mm и $a_{20} = 2.0$ — для $M = 20$, 0.16 — производительность разрушения при $S = 10$ mm. Расчетные зависимости (рис. 7) приведены в виде кривых 1 и 2. В литературе отсутствуют расчетные зависимости для производительности разрушения за один импульс, но предлагается выражение для объема разрушения вида

$$V = v_0S^B, \quad (4)$$

где v_0 и B — коэффициенты для разных горных пород [4]. В частности, для уррита

$$V = 0.27S^{1.5}, \quad (5)$$

при изменении S от 15 до 55 mm и случайном выборе W и числа воздействующих импульсов.

Из рис. 7 и уравнений (3) и (4) следует, что очень эффективным способом повышения производительности разрушения является увеличение расстояния между электродами. Но значение энерговклада должно оптимизироваться для каждого межэлектродного расстояния, что видно из кривых 1, 2 (рис. 7). Для $S > 60$ mm снижение энерговклада от 50 до 20 J/mm приводит к уменьшению производительности разрушения при $S = 200$ mm в 1.58 раза. Можно предположить, что для $S < 60$ mm энерговклад $M = 50$ J/mm является избыточным, так как и при $M = 20$ J/mm производительность разрушения практически не изменяется.

Удельные энергозатраты при электроимпульсном разрушении

Одной из основных характеристик разрушения горных пород являются удельные энергозатраты w . Известно, что энергозатраты снижаются при увеличении расстояния между электродами [4,5]. Эта зависимость пропорциональна $S^{-(b-1)}$, для уррита $b = 1.6$, а $w \equiv S^{-0.6}$ по [4,5]. В обеих работах указывается, что для правильного определения показателя степени необходимо оптимизировать процесс энерговыделения в канале разряда.

В настоящей работе получена зависимость $w = f(S)$ для достаточно большого диапазона изменения S (рис. 8) при постоянном энерговкладе $M = 50$ J/mm (кривая 1) и $M = 20$ (2). Наблюдается резкое уменьшение энергозатрат с увеличением S , особенно в области относительно малых расстояний — от 10 до 50 mm (кривая 1).

Кривая 1 может быть представлена расчетной зависимостью вида

$$w = W_0/S, \quad (6)$$

где W_0 — удельные энергозатраты при $S = 10$ mm, например, для $M = 50$ J/mm $W_0 = 3000$ J · cm/cm³. Для других значений M необходимо экспериментально определять W_0 .

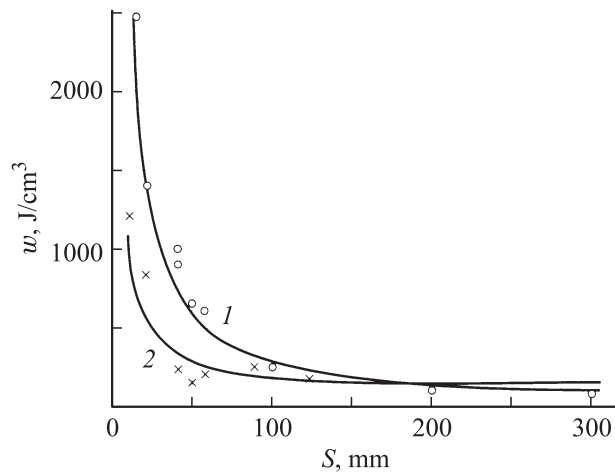


Рис. 8. Зависимость удельных энергозатрат от расстояния между электродами (точки — эксперимент, кривые — расчет): 1 — $M = 50$, 2 — 20 J/mm .

Анализ зависимостей рис. 7, 8 и выражений (3), (6) показывает, что для каждого значения межэлектродного расстояния имеет место оптимальная величина энерговыклада, энергии, запасенной генератором импульсов, при которых происходит наиболее эффективное разрушение горной породы.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что эффективность электроимпульсного разрушения горной породы резко возрастает с увеличением расстояния между электродами, что обусловлено как длиной разрядного канала, так и увеличением абсолютной глубины его внедрения в горную породу. При этом глубина откольной воронки возрастает с увеличением числа воздействующих импульсов и энерговыклада в канал разряда. Для каждого межэлектродного расстояния имеет место оптимальное значение энерговыклада, а значит, и энергии, запасенной генератором, при которых удельные энергозатраты минимальны.

Положительным фактором для использования при электроимпульсном разрушении больших межэлектродных расстояний является малое приращение пробивного напряжения по сравнению с увеличением расстояния между электродами.

Список литературы

- [1] Воробьев А.А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. Томск. Изд-во ТГУ, 1961. 150 с.
- [2] Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Чепиков А.Т. Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. А. с. № А-122 от 29.04.1998 с приоритетом от 14.12.1961.
- [3] Лимасов А.И., Чепиков А.Т. // Пробой диэлектриков и полупроводников. М.-Л.: Энергия, 1964. С. 176–179.

- [4] Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб: Наука, 1995. 276 с.
- [5] Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Изд-во КНУ РАН, 2002. 324 с.
- [6] Патент РФ 2123596 С1. Электроимпульсный способ бурения скважин и буровая установка. А.М. Адам, В.Ф. Важев. Оpubл. 20.12.1998. Бюл. № 35.