

АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ УСОВ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-организационного отдела, Кольский на-
учный центр РАН

usov@admks.apatity.ru

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ: НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПОСОБА И ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

Изложены физические основы электроимпульсного способа разрушения материалов – формирование канала пробоя в твердом теле на импульсном напряжении в микросекундном диапазоне воздействия и закономерности его разрушения действием канала электрического разряда при выделении в нем энергии емкостного накопителя.

Ключевые слова: электроимпульсное разрушение материалов, электрический пробой, канал разряда

Российскими учеными предложен и всесторонне исследован электроимпульсный способ разрушения материалов (ЭИ). Заложены основы нового научного направления в электрофизике – физики электровзрыва в конденсированных средах и его технологического применения для разрушения материалов (электроимпульсная технология). Выполненными работами созданы научно-технические основы для появления высокопроизводительных, энергетически и технологически эффективных технических средств и процессов для горного дела, инженерного строительства, переработки минерального сырья.

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Разрушающее действие разрядов атмосферного электричества известно давно. В литературе описаны многочисленные случаи наблюдавшегося в природе разрушения естественных объектов и сооружений (деревья, скалы, башни, железобетонные опоры и т. п.) при ударе в них молний. Электрический пробой твердой изоляции в электрических аппаратах и в системах передачи импульсного высокого напряжения также, как правило, сопровождается ее механическим разрушением. Полезное использование наблюдавшегося эффекта разрушения твердых тел электрическим разрядом для разрушения горных пород и руд было предложено в 50–60-е годы прошлого века несколькими отличающимися способами, которые составили класс импульсных электроразрядных способов разрушения материалов.

Согласно первоначальному предложению профессора А. А. Воробьева [1], электрический пробой твердого тела достигался использованием высокого импульсного напряжения, как это имеет место при пробое твердых диэлектриков в исследованиях электрической прочности. Однако, чтобы реализовать данный вариант способа, требуется создать особые условия для пробоя,

которые бы гарантировали сквозной электрический пробой твердого тела и исключали возможность электрического разряда по поверхности твердого тела (разряда перекрытия). Отбойка породы от массива возможна при расположении электродов в отдельных специально выбуруемых шпурах так, чтобы путь перекрытия по поверхности был значительно больше разрядного промежутка в твердом теле; в крайнем случае, для пород с низкой электрической прочностью (сланцы, каменные угли), – при ступенчатой форме забоя. Именно в таком варианте впервые в 1953 году И. И. Калаяцким (Томский политехнический институт) был опробован способ отбойки углей электрическим пробоем с использованием генераторов импульсного напряжения (ГИН) типа Аркадьева – Маркса.

Оригинальное решение было найдено в варианте способа, который в дальнейшем получил название электроимпульсного разрушения материалов. Его основой является эффект внедрения разряда в твердое тело на импульсном напряжении в микросекундном диапазоне воздействия [2], зарегистрированный как научное открытие «Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульсов напряжения» (А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев и А. Т. Чепиков, приоритет от 14 декабря 1961 года) и иллюстрируемый на рис. 1.

В традиционных условиях на постоянном и переменном напряжении, на импульсном напряжении миллисекундного диапазона при значительной вариации электрической прочности различных диэлектриков наиболее общим случаем является тот, что электрическая прочность твердых диэлектриков выше прочности жидких диэлектриков и еще в большей степени – газов. В этом случае разряд в промежутке между электродами, наложенными на подвергаемый разрушению массив с одной свободной поверхности и даже на кусковой фрагмент породы, развивается по поверхности массива или фрагмента с мини-

мальным эффектом разрушения за счет электро-гидравлического воздействия. При сокращении экспозиции импульсного напряжения электрическая прочность диэлектриков растет (зависимость описывается ВСХ), однако прочность твердых тел возрастает в меньшей степени, чем жидких сред и газов. В результате этого наступает инверсия соотношения электрических прочностей сред: в диапазоне времени воздействия менее 10^{-6} с электрическая прочность горных пород становится ниже прочности диэлектрических жидкостей, а при экспозиции напряжения менее $(1-2) \cdot 10^{-7}$ с – ниже прочности технической воды.

Точка пересечения вольт-секундных характеристик (критериальная крутизна фронта импульса напряжения A_k) соответствует равенству прочностей и вероятностей электрического пробоя сравниваемых сред. В области инверсии прочностей (на диаграмме в области левее A_k) при подаче импульса напряжения на электроды, установленные на поверхности твердого тела, электрический разряд формируется уже непосредственно в твердом теле и разрушает его. Среда, окружающая разрушающий материал с токоподводящими электродами, выполняет в процессе прежде всего роль агента, способствующего электрическому пробою твердого тела, и обеспечивает технологическую функцию удаления продукта разрушения из зоны реализации процесса.

Техническими средствами реализации способа в различных технологических процессах являются многоэлектродные конструкции, позволяющие превратить единичные акты разруше-

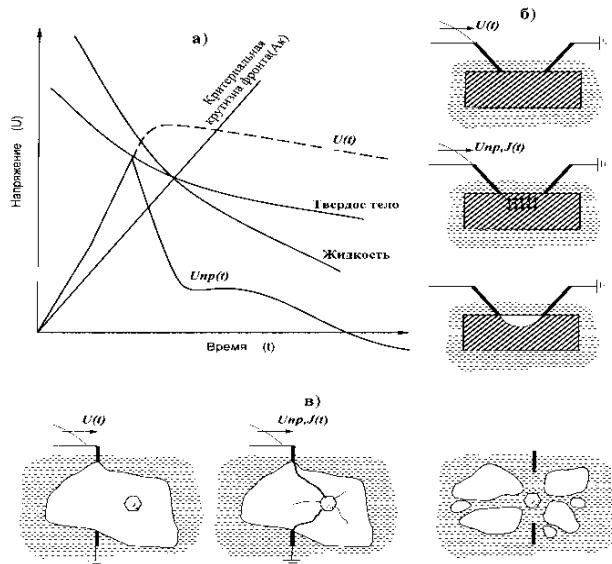


Рис. 1. Принцип электроимпульсного разрушения:
а) сопоставление вольт-секундной характеристики (ВСХ) различных сред; б) последовательность процессов пробоя и разрушения в системе с одной свободной поверхностью;
в) последовательность процессов пробоя и разрушения фрагментов материала

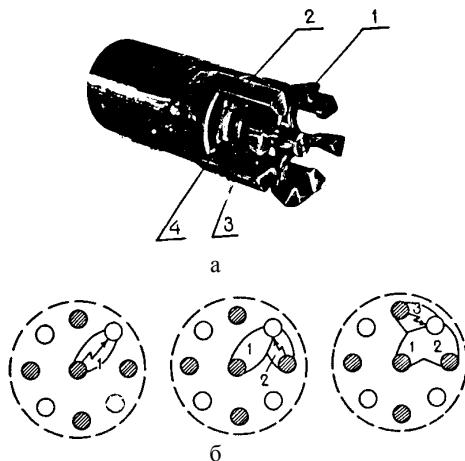


Рис. 2. Буровой наконечник (а) и последовательность пробоя и разрушения забоя скважины многоэлектродным устройством (б). Штриховкой отмечены потенциальные электроды

ния в непрерывный технологический процесс со свойственными ему техническими параметрами. Важнейшим элементом физической основы способа является физический феномен автоматического распределения разрядов в разрядных промежутках многоэлектродной породоразрушающей конструкции. Принцип автоматического распределения разрядов в разрядных промежутках многоэлектродной породоразрушающей конструкции действует следующим образом. При пробое в одном из промежутков (1) образовавшаяся в поверхностном слое массива после разрушения воронка заполняется жидкостью, что приводит к электрическому упрочнению промежутка в данном участке забоя. Поэтому последующие разряды происходят поочередно в соседних промежутках (2, 3, ...), обеспечивая полное разрушение породы по всей площади забоя и циклическое перемещение электродного устройства в скважине.

Принцип автоматического распределения разрядов по площади забоя при использовании многоэлектродных конструкций позволяет обеспечить непрерывность процесса разрушения массива на забое в процессе бурения или последовательное сокращение крупности кускового материала в процессах его дезинтеграции без каких-либо специальных мер (вращение инструмента, классификация материала по крупности и принудительная коммутация разрядов и т. п.). Забою разрушения за счет соответствующего выбора формы электродов и их расположения может быть придана любая произвольная форма – круглая, прямоугольная, щелевая, кольцевая и т. д.

Исследование физических закономерностей и технологическому опробованию новых технологий посвящен монографический цикл работ [8], [6], [5], отмеченный премией им. П. Н. Яблочкива Российской академии наук за 2003 год. Ниже приводятся лишь краткие сведения об объектах исследования и основных результатах этих работ.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Практическая возможность использования способа в конкретных технологических целях в значительной степени определяется электрическими и энергетическими параметрами процесса, такими как уровень рабочих напряжений U , производительность единичного разряда V , энергоемкость разрушения W . Приоритетности этих показателей подчинены изучение физических основ, оптимизационные исследования техники и технологии способа. Уровень рабочего напряжения определяет техническую и эксплуатационную надежность техники. При слишком высоком уровне рабочего напряжения снижаются надежность работы изоляционных элементов, стабильность работы генерирующей аппаратуры, повышаются габариты оборудования. Производительность и энергоемкость разрушения определяют экономическую эффективность технологии.

Механизм ЭИ может быть представлен двумя процессами, действующими во времени друг за другом: образованием в результате электрического пробоя в поверхностном слое твердого тела канала разряда и последующим разрушением твердого тела под действием механических напряжений, возникающих в результате расширения канала разряда при выделении в нем энергии емкостного накопителя. Первая стадия процесса определяет уровень напряжения, при котором реализуется процесс (рабочее напряжение). Выбором оптимальных параметров импульсного напряжения и условий пробоя (вид среды, геометрия электродной конструкции) достигаются минимальные градиенты напряжения пробоя. На второй стадии процесса за счет оптимизации преобразования энергии накопителя в работу разрушения достигается минимальная энергоемкость разрушения материала.

Феноменология пробоя

Разрядный процесс в промежутке (рис. 1б) начинается с развития многочисленных «кистевых» разрядов по поверхности твердого тела с обоих электродов. По мере продвижения «кистевых» разрядов с их головок инициируются многочисленные каналы неполного пробоя в твердом теле, прорастающие с электродов на встречу друг другу. Финальная стадия процесса представляет собой смыкание каналов разряда в твердом теле, которое опережает по времени возможное при других условиях смыкание кистевых разрядов по поверхности. Характер разрядных процессов существенно зависит от полярности импульса и расположения электродов относительно поверхности твердого тела. Практическую значимость в этих исследованиях имеют данные о технологической эффективности пробоя, показателем которой служит величина потенциального объема разрушения V , оп-

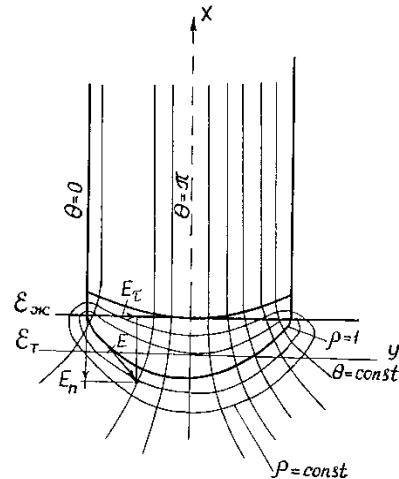


Рис. 3. Картина электрического поля в системе с электродами на границе двух сред

ределяемая протяженностью l_s и глубиной внедрения разряда в твердое тело h .

Имеются попытки аналитического рассмотрения задачи о глубине внедрения канала разряда в твердое тело. И. И. Каляцким задача рассмотрена в приближении, соответствующем замене реальной картины электрического поля между электродами породоразрушающего устройства полем на краю пластин плоского конденсатора [6]. Предполагалось, что разряд развивается по направлению, соответствующему силовой линии поля максимальной напряженности, и при условии, что внедрение разряда начинается непосредственно с острой электродов или из точек, исчезающие мало удаленных от острой (рис. 3).

Для случая, когда диэлектрические проницаемости жидкости и твердого тела равны, имеем следующую систему параметрических уравнений:

$$x = \frac{l}{2\pi} (-\cos \theta - \ln \varpi), \quad (1a)$$

$$y = \frac{l}{2\pi} [-\sin \theta + (\pi - \theta)], \quad (1b)$$

где $0 < \varpi < \infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$, l – расстояние между электродами. При $\theta = \text{const}$ получаем уравнение для линии равного потенциала, при $\varpi = \text{const}$ – для силовых линий поля.

Линия максимальной напряженности поля описывается следующей системой уравнения (при $\varpi = 1$):

$$x = l/2\pi \cdot \cos \theta, \quad (2a)$$

$$y = l/2\pi \cdot [\sin \theta + (\pi - \theta)]. \quad (2b)$$

Максимальный прогиб силовой линии (глубина внедрения) h будет:

$$\begin{aligned} h &= x_{\theta=0} - x_{\theta=\pi} = \\ &= l/2\pi \cdot (\cos \theta - \cos \pi) = l/\pi \approx 0.32l. \end{aligned} \quad (3)$$

Длина канала разряда в твердом теле l_s , соответственно, будет:

$$\begin{aligned} l_p &= 2 \int_0^{\pi} l/2\pi \sqrt{2(1 - \cos \theta)} d\theta = \\ &= 4l/\pi \cos \theta / 2 \Big|_0^{\pi} = 4l/\pi = 1.27l. \end{aligned} \quad (4a)$$

Или

$$\begin{aligned} l_s &= 2 \int_0^{\pi} l/2\pi \cdot \sqrt{2(1 - \cos \theta)} d\theta = \\ &= 4l/\pi \cdot \cos \theta / 2 \Big|_0^{\pi} = 4l/\pi = 1.27l. \end{aligned} \quad (4b)$$

Потенциальный объем откольной воронки, если принять его за половину объема эллипсоида с полуосами, равными $l/2, l/\pi$ и $l/2\pi$, будет:

$$V_0 = 2/3\pi \cdot l/2 \cdot l/\pi \cdot l/2\pi = l^3/6\pi \approx 0.053l^3. \quad (5)$$

Результаты аналитического рассмотрения задачи о глубине внедрения разряда частично подтверждаются моделированием поля в электролитической ванне по методике полной проводимости электролитов [4]. Различными авторами выполнены представительные экспериментальные исследования, ставившие целью выявить зависимость глубины внедрения и параметров разрушения от таких контролируемых факторов пробоя, как межэлектродное расстояние, амплитуда и форма импульса напряжения, диэлектрические и прочностные свойства жидкой среды и твердого тела. Эти исследования выполнены на большой гамме горных пород (более 100 разновидностей) при пробое их в трансформаторном масле, дизельном топливе, растворах на нефтяной основе, воде. Оказалось, что в реальных условиях h находится в значительной зависимости от вещественного состава, структуры и текстуры горных пород; коэффициент пропорциональности в соотношении $h(l)$ изменяется в пределах от 0,1 до 0,6, а степенной показатель в соотношении $V(l)$ варьирует в пределах 1,5 ÷ 2,7. Удельные энергетические затраты на разрушение W при увеличении разрядного промежутка l снижаются пропорционально степени 1,5 ÷ 2,0. Для практического использования способа особо важно следующее. Соотношения $h(l)$ и $V(l)$ указывают на эффективность способа повышения производительности V и снижения энергоемкости W электроимпульсного разрушения за счет использования увеличенных разрядных промежутков l .

Критериальные условия и вероятность пробоя

Критериальный параметр $A_k = U/t$, соответствующий равновероятности пробоя в параллельной системе сред и выражаемый крутизной

фронта косоугольного импульса напряжения (рис. 1а), в значительной степени определяется тремя главными факторами: видом горной породы, видом окружающей частицу разрушающего материала внешней среды, формой импульса напряжения. В меньшей степени A_k зависит от геометрии электродов, величины разрядного промежутка и соотношения размеров разрядного промежутка и разрушающего твердого тела. Наиболее существенно A_k зависит от вида среды. При пробое крепких горных пород в диэлектрических жидкостях $A_k = 200$ –500 кВ/мкс и 2000–3000 кВ/мкс при пробое в технической воде. Применение данного критерия правомочно в достаточно широком диапазоне разрядных промежутков 10^{-2} – 10^{-1} м и для геометрии электродов, свойственных технологическим устройствам разрушения пород. На прямоугольных импульсах напряжения вольт-временные характеристики имеют подобный вид, но абсолютные значения электрической прочности сред на 10–15 % ниже. При иных промежуточных формах импульса напряжения требуется и возможно введение корректирующих коэффициентов.

Показана возможность аналитической оценки вероятности пробоя в параллельной системе диэлектриков, для чего требуется лишь задать описание ВСХ отдельных сред и функции распределения напряжения пробоя (И. И. Калицкий [6]). В качественном отношении результаты таких оценок достаточно верно отражают экспериментально наблюдаемую картину зависимости вероятности внедрения от крутизны фронта импульса напряжения и могут быть использованы в практических целях на этапе предварительного выбора параметров импульсного напряжения для реализации электроимпульсного процесса.

По экспериментальным данным, для горных пород преобладающей тенденцией является повышение вероятности внедрения с ростом крутизны фронта импульсов напряжения и межэлектродного расстояния, и это выводит на соответствующие рекомендации для повышения эффективности пробоя – увеличивать разрядные промежутки, уменьшать фронт импульса вплоть до наносекунд (10^{-9} с).

Напряжение пробоя и рабочие напряжения

Исследования электрической прочности горных пород и жидкостей как необходимый этап для выявления оптимальных условий реализации ЭИ-процесса выполнены в широком диапазоне изменения переменных параметров: экспозиции импульсного напряжения – от 10^{-5} до 10^{-7} с (на импульсах прямоугольной формы – в пределах до 10^{-8} с), разрядных промежутков – до 10^{-1} м (в отдельных случаях – до 0,3 м), давления – до 150 атм, величины сосредоточенной нагрузки на электрод – до 2500 кг/см², температуры – до 160 °C [3]. Исследования охватывают обширную гамму типов горных пород с диапазоном изменения

физико-механических свойств по контактной прочности – $64 \div 290$ кг/мм², пористости – 1–20,4 %, прочности на сжатие – 150–3900 кг/см². Сопоставление ВСХ ряда горных пород, диэлектрической жидкости – трансформаторного масла и воды – представлено на рис. 4. Электроимпульсному пробою и разрушению подвержена преобладающая масса горных пород и руд, за исключением лишь отличающихся сплошной металлической проводимостью (сплошные магнетитовые и полиметаллические руды).

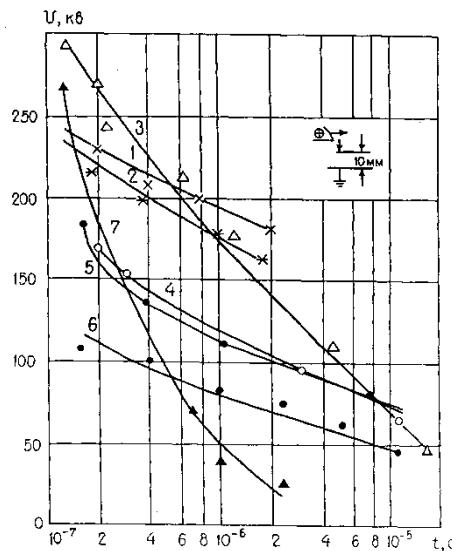


Рис. 4. Вольт-секундные характеристики пробоя некоторых горных пород и жидкостей на косоугольных импульсах напряжения: 1 – кварц; 2 – фельзит-порфир; 3 – трансформаторное масло; 4 – мрамор; 5 – глинистый сланец; 6 – песчаник; 7 – вода при $\rho = 60$ Ом·м

Для оценки области наиболее эффективного применения ЭИ-технологии важное значение имеет то, что горные породы по электрической прочности различаются в меньшей степени, чем по физико-механическим свойствам. Например, кварцит и песчаник по прочности на сжатие отличаются в 7 раз, а по электрической прочности – менее чем в 2 раза. С ростом механической прочности (крепости) пород эффективность ЭИ-разрушения снижается существенно в меньшей степени, чем при разрушении традиционными механическими способами, то есть относительная эффективность его использования в сравнении с механическими способами растет. Поэтому, хотя ЭИ-способ может быть применен для разрушения горных пород любой механической прочности, наибольший технико-экономический эффект его применения достигается на особо крепких горных породах и мерзлых грунтах.

Предложены эмпирические соотношения для описания зависимости напряжения пробоя от основных факторов: вида горной породы и жидкости, формы импульсного напряжения, величины разрядного промежутка. Для оценочных целей укажем средние значения напряжения про-

боя горных пород в промежутке 10⁻² м. Они составляют 50–100 кВ/см при пробое в диэлектрических жидкостях и достигают 250–300 кВ/см при пробое крепких горных пород в технической воде. Показатель в степенной функции $U(l)$, отражающий рост напряжения пробоя с увеличением разрядного промежутка, не превышает 0,5. Это имеет большое практическое значение – существует эффективная возможность повысить производительность ЭИ-процесса за счет применения электродных конструкций с увеличенными разрядными промежутками, но при этом рабочее напряжение остается на приемлемом уровне. В разработанных технологических процессах величина разрядного промежутка изменяется в пределах 0,01–0,3 м, уровень рабочего напряжения составляет 250–800 кВ.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Искровой канал в твердом теле выступает как преобразователь электрической энергии во внутреннюю энергию продуктов канала, далее переходящую последовательно в работу по его расширению, в энергию поля механических напряжений и деформаций, в энергию вновь образованной поверхности продукта разрушения. Существующие методы расчета потерь энергии на каждом этапе ее преобразования и его оптимизации позволяют по параметрам электрической схемы источника импульсов рассчитать внутреннюю энергию продуктов канала E_0 , оценить потери с истечением плазмы вне твердого тела и рассеивание в форме теплоты и оценить долю, трансформируемую в работу расширения канала в твердом теле A . Определяющие $A(t)$ параметры давления плазмы $p(t)$, объема и радиуса канала $V(t)$, $r(t)$, являясь результатом реакции среды на изменение внутренней энергии канала, зависят как от режима выделения энергии в канале, так и от упругих свойств среды. Решение краевой задачи расширения канала в твердом теле выводит на установление параметров возникающего в твердом теле нестационарного поля механических деформаций и напряжений. Возбужденная в твердом теле волна поля механических напряжений частично реализуется в полезном эффекте ЭИ – нарушении сплошности твердого тела, то есть его разрушении, значительной же частью выносится с волной давления вне твердого тела, рассеивается на дислокациях, преобразуется в тепло. Эффективность использования волны поля механических напряжений зависит от параметров самой волны давления, а также от особенностей механизма разрушения твердого тела в условиях динамического нагружения (скорости и концентрации очагов роста трещин).

Результаты исследований этих процессов дают возможность расчета конечных показателей разрушения и обоснования оптимальных

режимов реализации процесса. Аналитическое решение всего комплекса вопросов, имеющее конечной целью определение параметров разрушения и оптимизацию параметров энергетического блока, практически невозможно. Более продуктивен метод, комбинирующий аналитическое рассмотрение с использованием полученных экспериментальным путем эмпирических и полуэмпирических аппроксимаций закономерностей и параметров с общей оценкой погрешности и достоверности полученных результатов.

Расширение канала разряда

На стадии преобразования энергии основная информация о процессе содержится в регистрируемых параметрах расширения и излучения канала разряда. По ним можно судить о температуре, давлении, степени термодинамических превращений вещества твердого диэлектрика в искровом канале. Для изучения динамики расширения искрового канала использовалось сквозное фотографирование. Чтобы сделать возможным перенесение результатов исследования на широкий класс материалов, использовались как хрупкие (щелочно-галлоидные кристаллы), так и пластичные прозрачные диэлектрические материалы (органическое стекло). Типичные фотографии канала пробоя образца KCl представлены на рис. 5.

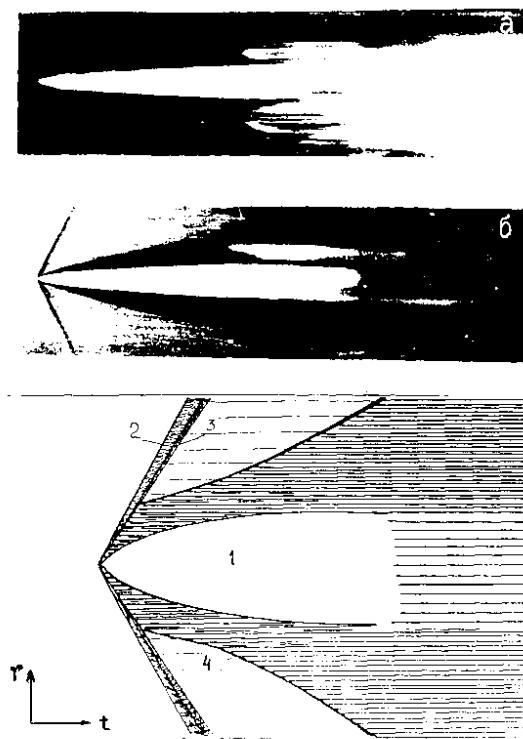


Рис. 5. Фоторазвертки канала пробоя образца KCl:
а – режим самосвещения; б – с подсветкой; 1 – граница канала; 2 – упругий предвестник; 3 – фронт ударной (пластической) волны; 4 – трещины

Экспериментальные зависимости радиуса канала во времени с погрешностью не более 3–4 % для KCl, NaCl, KBr и 6–8 % для ПММА аппроксимируются параболой:

$$r_k(t) = -a + \left(\frac{t-d}{k} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где a, d, k – константы.

Излучение и температура канала разряда

Спектроскопические методы исследования искрового канала дают наибольшую информацию о термодинамических процессах, протекающих в фазе его расширения. В исследованиях проведены измерения спектральной плотности излучения из зоны канала, яркостной температуры T искрового канала, коэффициентов и показателей поглощения, потерь энергии с излучением.

Расчеты температуры канала по модели абсолютно черного тела (АЧТ) на основе экспериментальных значений спектральной яркости в широком диапазоне вариации энерговклада для щелочно-галлоидных кристаллов (ЩГК) NaCl – KCl – KBr дают значения амплитуды яркостной температуры канала в пределах 12000–18000 К. Плотность вещества в канале пробоя ($n \approx P/kT$), соответствующая этим температурам и энерговкладу в канал (1–50) Дж/см за характерное время 10^{-6} с, оценивается как $n = (0,02–0,8) \cdot 10^{22}$ 1/см.

На основе измерения распределения спектральной плотности излучения и показателя поглощения по сечению (разбито на 5 участков) получено распределения температуры по сечению искрового канала (рис. 6).

Термодинамические функции, состав и уравнение состояния плазмы канала

Преобразование электрической энергии, запасенной в реактивных элементах разрядной цепи, в работу по разрушению (диспергированию) твердых диэлектриков происходит через промежуточное состояние – внутреннюю энергию E вещества в канале пробоя. Последняя занимает в этом переходном процессе центральное место и трансформируется частично по мере расширения канала пробоя в работу A над окружающим диэлектриком

$$A = \int_0^{V_f} p \, dV.$$

Показана применимость для вещества пробоя конденсированного диэлектрика известных уравнений калорической формы типа

$$E = \frac{pV}{\gamma_s - 1}.$$

На примере ЩГК разработаны приемы аналитического расчета термодинамических функций, состава и уравнений состояния плазмы канала, дающие удовлетворительное соответствие расчетно-экспериментальной оценке $\gamma(t)$ на основе измерений динамики геометрических размеров канала пробоя и энерговклада. Наиболее вероятным значением γ для минералов при их импульсном электрическом пробое в режиме технологического электровзрыва следует считать $\gamma = 1,12-1,16$ для соединений, не содержащих металлов I группы либо содержащих их в малом количестве, и $\gamma = 1,6-1,22$ – для минералов с высоким содержанием металлов I группы периодической таблицы (например, $N_{a_2}O$, $N_{a_2}O SiO_3$, K_2O и т. д.).

Динамическое нагружение среды искровым разрядом

Исследование характера возмущений в среде, вызванных электрическим разрядом, скоростей их распространения и параметров является важным этапом на пути к решению задачи о разрушающем действии разряда. Визуализация возмущения с помощью теневой съемки и метода фотоупругости при скоростной съемке процесса во многом позволяет дать ответ на поставленные выше вопросы.

На рис. 7, 8 представлены фотограммы скоростной фотoreгистрации распространения возмущений от канала разряда при пробое органического стекла (ПММА) в режиме щелевой развертки и режиме лупы времени теневым способом и в поляризованном свете. При интенсивном энерговыделении на начальном этапе в первую осцилляцию разрядного тока в диэлектрике (в частности, в образцах ПММА), формируется и распространяется сверхзвуковая ударная волна уплотнения, которая, однако, быстро (на расстоянии 1–2 мм) вырождается в акустическую, расщепляясь на упругий предвестник и пластическую волну. При пробое ЩГК практически с момента замыкания межэлектродного промежутка каналом сквозной проводимости от канала отшнуровывается двухволновое возмущение: упругий предвестник (первая линия) и фронт ударной пластической волны (вторая линия). Двухволновая структура возмущения соответствует упругопластическому поведению ЩГК, наблюдавшемуся в этих кристаллах в диапазоне до десятков килобар. Такая структура, содержащая упругий предвестник и ударную пластическую волну, характерна для поздних стадий взрыва ВВ в твердых телах, когда сверхзвуковая ударная волна, отделившись от стенки камеры, по мере развития теряет скорость и через некоторое время разделяется на упругую и пластическую.

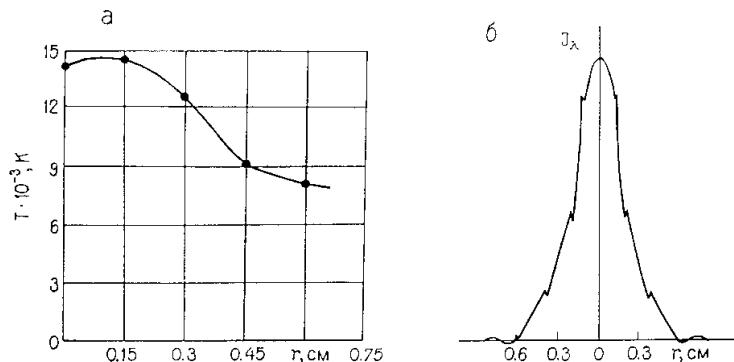


Рис. 6. Радиальное распределение температуры (а) и спектральной плотности потока (б) в канале пробоя

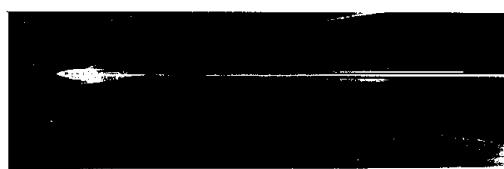


Рис. 7. Фоторазвертка канала пробоя ПММА съемкой теневым методом (а) и в поляризованном свете (б)



Рис. 8. Фоторазвертка (а) и фотохронограмма в режиме лупы времени (б) в поляризованном свете при пробое ПММА

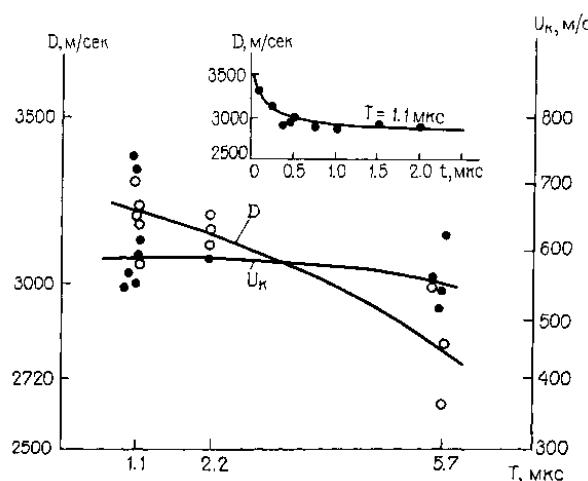


Рис. 9. Зависимость начальной скорости распространения ударной волны D и скорости расширения канала V_k от периода разрядного тока

На рис. 9. представлен график изменения скорости головной ударной волны в ПММА при энергии разряда 450 Дж и периоде разрядного тока 1,1 мкс. Максимальная скорость фронта ударной волны (ФУВ) в момент отшнуровки от канала разряда оценивается величиной 3700–4000 м/с.

Давление на распространяющийся с такой скоростью ФУВ, оцененное по ударной адиабате ПММА или по универсальной кривой состояния твердого тела, составляет $(2,5\text{--}3,5) \cdot 10^9$ Па.

Аналитическое соотношение для давления на ФУВ в гидродинамическом приближении

$$p = \rho_0 D u \quad (7)$$

с учетом, что

$$D = c + A u, \quad (8)$$

преобразуется в

$$p = \rho_0 \frac{D(D - c)}{A}, \quad (9a)$$

$$p = \rho_0 (c + A u) u, \quad (9b)$$

где ρ_0 – начальная плотность вещества; D – скорость ударной волны; c – скорость звука; u – массовая скорость за фронтом ударной волны; A – постоянная материала (для ПММА $A = 1,3$). Приняв $c = 3800$ м/с, $\rho_0 = 1,2$ г/см³, $A = 1,3$, для $D = 3800$ м/с получим по (9) тот же порядок величин $p \approx 3,5 \cdot 10^9$ Па. Наконец, если считать, что скорость расширения канала можно рассматривать как массовую скорость за фронтом волны, то экспериментально фиксируемая в этом случае скорость увеличения радиуса 700 м/с приведет к такому же порядку величин давления на ФУВ.

Для оценки поля напряжений в твердом теле высокую информативность представляет метод динамической фотоупругости. На основании картины поля изохром оценивается разность двух главных напряжений

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{rr} = \frac{\sigma_{10}}{2l} n, \quad (10)$$

где $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{rr} – нормальные напряжения в полярных координатах; σ_{10} – коэффициент оптической активности материала; l – толщина образца; n – порядок полосы. Для случая пробоя ПММА с энергией в разряде 500 Дж и периодом разрядного тока $T = 3,2$ мкс в окрестности трещин порядок полосы равен 4–5, что соответствует разности главных напряжений $400\text{--}500$ кг/см², то есть растягивающие напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$, под действием которых и происходит рост радиальных трещин в «хвосте» волны, могут составлять $500\text{--}800$ кг/см², что существенно выше прочности ПММА на сдвиг ($300\text{--}500$ кг/см²).

При аналитическом рассмотрении течения среды вокруг искрового канала с различными моделями течения и уравнениями состояния твердого тела (Особорна, Жаркова – Калинина, Тэта, Жданова – Конусова и др.) показана возможность расчета профилей волн в пространстве для ряда фиксированных значений времени и расчета напряжений в твердом теле (Б. В. Семкин [6]). Профили радиальных s_1 и тангенциальных s_2 напряжений приведены на рис. 10.

Выполнен анализ применимости для целей аналитического расчета электроимпульсного разрушения различных моделей поведения твердого тела и различных критериев разрушения.

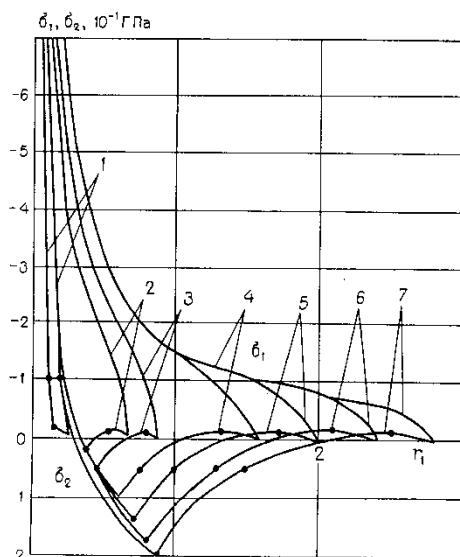


Рис. 10. Профили радиальных s_1 и тангенциальных s_2 напряжений при пробое «скальной породы» ($W_1 = 60$ Дж/см, $t = 3 \cdot 10^{-6}$ с): Время t , мкс: 1 – 0,4; 2 – 1,2; 3 – 2,0; 4 – 2,8; 5 – 3,6; 6 – 4,4; 7 – 5,2

Наиболее близкими к задаче электроимпульсного разрушения являются подходы, используемые при анализе разрушения с помощью ВВ. Базируясь на положениях теории хрупкого разрушения Гриффитса – Ирвина и решениях равновесия системы со звездой радиальных трещин от цилиндрической полости, нагружаемой изнутри в статическом и динамическом варианте при ВВ, прогнозируется гранулометрический состав разрушения (В. И. Курец [5]). Аналогично этому при электроимпульсном разрушении решается задача расчета длины трещин в зоне растрескивания. При этом используются результаты оценки радиуса канала разряда $r_k(t)$, а энерговклад разряда рассматривается с учетом разгрузки канала разряда через устья пробоя.

Кинетика и энергетические характеристики электроимпульсного разрушения диэлектриков и горных пород

Главными факторами, определяющими характер и динамику трещинообразования, являются структура материала (моноцисталическая, поликристаллическая, аморфная) и интенсивность нагружения.

Для динамики электроимпульсного разрушения характерны следующие закономерности:

- Генеральная картина разрушения твердого диэлектрика под действием инициированного в его толще электровзрыва содержит в качестве основного элемента звезду радиальных трещин с убывающим по мере удаления от канала пробоя их числом; зона объемного разрушения слабо выражена; кольцевые трещины, наблюдаемые для взрыва химической природы, как правило, отсутствуют. Зона объемного разрушения и зарождение звезды трещин формируются под действием волновых возмущений; в заключительной стадии, в том числе в фазе финишной остановки (равновесия) радиальных трещин, определяющим механизмом передачи энергии в устье трещин является силовое воздействие канала пробоя (зоны пластических деформаций); энергия, необходимая для роста трещин, доставляется в устья волнами Рэлея.
- Характерной особенностью разрушения хрупких материалов является практически постоянная скорость роста трещин вплоть до момента их остановки (рис. 11). Максимальная скорость роста трещин в силикатном стекле ~ 1500 м/с, что соответствует 0,38 от скорости продольных волн в стекле. В пластичном оргстекле трещины распространяются с дискретными скоростями, что отмечается разными авторами. При более высоком разрешении в динамике прорастания изломов отмечаются кратковременные остановки трещин и широкий набор дискретных скоростей. Объектам ЭИ-технологии более отвечает канифоль, обладающая по сравне-

нию со стеклом более выраженными пластическими свойствами с функцией $l(k_l/k_{lc})$.

- В горных породах с большой концентрацией дислокаций имеет место переносное разрушение по Финкелю [9], когда трещинообразование определяется смыканием отдельных микротрещин и его скорость соответствует скорости распространения упругой волны. Для исследования процесса применим косвенный метод, когда с помощью герметизированных электродов канал разряда в образце формируется на фиксированном расстоянии от поверхности и оптической скоростью фотографии определяется время прорыва на поверхность продуктов электровзрыва, а осциллографической регистрацией – динамика изменения электрического сопротивления канала разряда в предположении, что моменту выхода трещин на поверхность будет соответствовать его резкое падение за счет разгрузки. Полученные результаты на ряде горных пород подтверждают механизм переносного разрушения с фронтом акустической волны.
- Эффект электроимпульсного разрушения материалов при одинаковых затратах энергии зависит от характера энерговыделения в канале разряда. Об эффективности разрушения можно судить по таким его параметрам, как максимальная длина трещин, суммарная длина и поверхность трещин, размер зоны трещинообразования и др. Наиболее общим случаем является зависимость указанных параметров от скорости выделения энергии при неизменной ее величине, представленная кривой с оптимумом (рис. 12). В зависимости от характера материала (хрупкие – пластичные) оптимум значительно сдвигается в область малых или больших значений мощности.

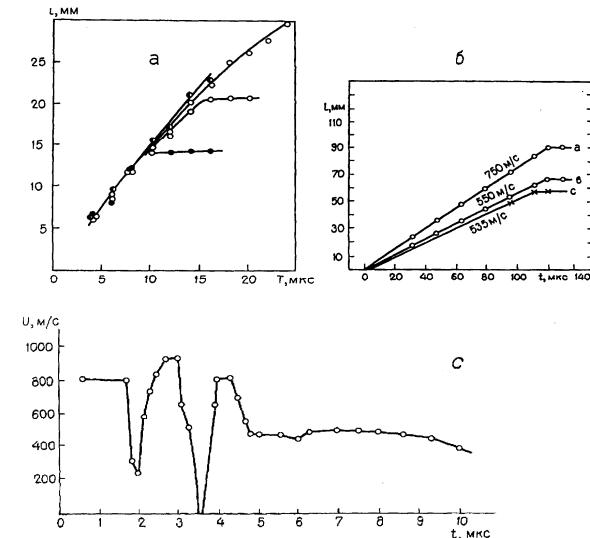


Рис. 11. Динамика роста трещин в силикатном стекле (а), канифоли (б) и органическом стекле (в)

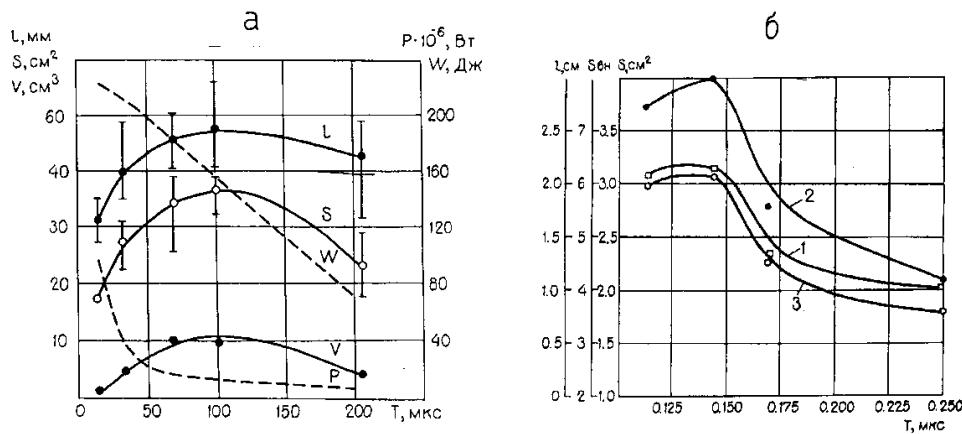


Рис. 12. Влияние длительности выделения энергии на эффективность разрушения моделей из органического (а) и силикатного стекла (б)

Таблица 1
Энергоемкость бурения скважин различными способами

Способ бурения	Удельная энергия разрушения, Дж/ см^3 (кГм/ см^3)
С использованием специальных породоразрушающих инструментов:	
Ударный	200–650 (20,4–66,3)
Вращательный:	
бурение шарошками	700–950 (71,4–96,8)
алмазное бурение	600–800 (61,2–81,5)
Ударно-вращательный	400–600 (40,8–61,2)
Вращательно-ударный	600–800 (61,2–81,5)
Без использования специальных породоразрушающих инструментов:	
Взрывной	200–400 (20,4–40,8)
Гидравлический*	1000–2000 (102–204)
Гидроимпульсный*	70–100 (7,1–10,2)
Электрогидравлический	400–500 (40,8–51)
Электротермический*	5000 (510)
Электроимпульсный	100–200 (10,2–20,4)
Лазерный	5000–12000 (510–224)
Комбинированное бурение	
Огневой	1500 (153)
Плазменный	5000 (510)
Термошарошечный	1200–1600 (122–163)
Электротермомеханический	500–800 (51–82)

*Способы, предназначенные для проходки выработок и скважин большого диаметра.

Энергоемкость электроимпульсного разрушения диэлектриков и горных пород

Физическая природа способа дает возможность достижения более низкой энергоемкости разрушения в сравнении с традиционными спо-

собами. Динамический характер ЭИ-нагружения обеспечивает хрупкое разрушение материала без потерь энергии на пластическую деформацию. Канал разряда в сравнении с ВВ имеет то преимущество, что его энергосодержание, обеспечиваемое подводом энергии извне от емкостного накопителя, может простыми способами регулироваться в широких пределах по величине и во времени, создавая оптимальные условия нагружения твердого тела в зависимости от его природы и размера разрушаемых фрагментов. По энергетической эффективности ЭИ-способ применительно к процессам, реализующим разрушение горных пород с одной свободной поверхности (бурение, резание, съем поверхностного слоя), заметно предпочтительнее большинства других способов (табл. 1).

При дезинтеграции материалов возможности достижения свойственной электроимпульсному способу высокой энергетической эффективности несколько ограничены. В сопоставительных исследованиях энергоемкости измельчения руд различными способами (В. А. Цукерман [5]) энергоемкость электроимпульсного измельчения одного порядка и даже несколько выше, чем при измельчении в центробежных и стержневых мельницах, и все они на порядок ниже, чем при электрогидроимпульсном измельчении (табл. 2).

При электроимпульсной дезинтеграции с уменьшением крупности разрушаемых частиц до 1–2 мм имеет место смена электроимпульсного механизма воздействия на электрогидроимпульсный, что приводит к резкому, почти на порядок, повышению энергоемкости процесса. Однако и в этом случае проблема энергоемкости не является тупиковой для использования электрофизических эффектов в процессах переработки минерального сырья. В отдельных случаях проблема снимается использованием режимов электроразрядного разупрочнения (ЭРР) [7].

Таблица 2

Удельные затраты энергии при измельчении различными способами (руда Шерлово-горского месторождения; исходная крупность – 30 мм, конечная – 2 мм)

№	Способ измельчения	Установка	Производительность, кг/час	Удельный расход энергии, кВт · ч/т
1	Электроимпульсный	ЭИ-установка	100	13,1
2	Механический	Лабораторная центробежная мельница	150	11,7
3	Механический	Лабораторная стержневая мельница	85	12,6
4	Электро-гидравлический	Установка ВостНИГРИ	100	117,2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А. Электрические разряды обрабатывают материалы, разрушают твердые тела // Известия Томского политехн. ин-та. 1958. Т. 95. С. 315–339.
2. Воробьев А. А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. Томск: Изд-во ТГУ, 1961. 150 с.
3. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Завадовская Е. К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во ТГУ, 1971. 225 с.
4. Казуб Б. Т., Коршунов Г. С. Электрический разряд на границе раздела жидкого и твердого диэлектриков // Физика диэлектриков и новые области их применения: Тез. докл. Всесоюз. конф. Караганда, 8–10 июня 1978 г. Караганда: Изд-во Караганд. политехн. ин-та, 1978. С. 26–27.
5. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
6. Усов А. Ф., Ракаев А. И. Электроимпульсное дробление и разупрочнение руд и материалов // Обогащение руд. 1989. № 4. С. 42–43.
7. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные (электрические) процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. 179 с.
8. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 276 с.
9. Финкель В. М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.