

Кузнецова Н.С.,

*кандидат физико-математических наук,
доцент, Томский политехнический университет*

Россия, г. Томск

Сарсикеев Е.Ж., PhD,

*заведующий кафедрой эксплуатации электрооборудования
Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина*

Казахстан, г. Нур-Султан

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА БЕТОНА И ГОРНЫХ ПОРОД

***Аннотация:** В работе приведены результаты экспериментальных исследований электровзрыва с измерением длин регистрируемых магистральных трещин в образце, что является основой для верификации разработанных физико-математических программ. Выполненное сравнение результатов компьютерных исследований с помощью программ ЭВМ для моделирования электроразрядного разрушения горных пород и искусственных материалов с результатами физических экспериментов показало сходимость более 85 %.*

***Ключевые слова:** электровзрыв, горная порода, бетон, откол, разрушение.*

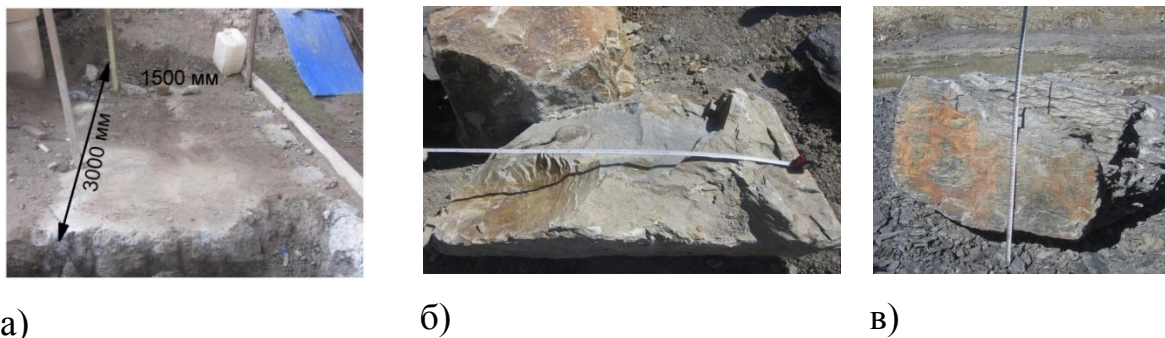
***Annotation:** The paper presents the results of experimental studies of electroexplosion with the measurement of the lengths of the recorded main cracks in the sample, which is the basis for the verification of the developed physical and mathematical programs. Comparison of the results of computer studies using computer programs to simulate the electric-discharge destruction of rocks and artificial materials with the results of physical experiments showed a convergence of more than 85%.*

***Key words:** electrical explosion, rock, concrete, spalling, destruction.*

Развитие электроразрядных технологий откола и разрушения материалов, несмотря на их энергосберегающий характер и перспективность в сравнении с традиционными механическими и другими, тормозится отсутствием количественного описания всех происходящих при электровзрыве явлений и, соответственно, неправильно выбранными режимами обработки, требующими использования технологического оборудования с завышенными параметрами и ценой. Это обусловлено недостаточной изученностью всех стадий электровзрыва: развития неустойчивостей, приводящих к образованию плазменного канала; законов его расширения в зависимости от ввода энергии; формирования волн давления и поля напряжений в обрабатываемом материале; трещинообразования и разрушения. Развитие электроразрядных технологий требует оптимизации энерговыделения, что может быть осуществлено после создания количественной модели электровзрыва и верификации параметров и законов, описывающих отдельные явления, экспериментальными исследованиями [1–6].

Для проведения экспериментальных исследований шпурового электровзрыва и измерения длин генерируемых трещин использовался экспериментальный образец установки электроразрядного откола и разрушения горных пород и искусственных материалов.

Экспериментальные исследования проводились на залитом в землю бетоне марки М300 и образцах негабаритов горных пород (природного камня). Имитатор массива представлял собой монолитный бетонный блок размером 3000×1500×1200 мм марки М300. Бетонный блок залит в земле, верхняя часть блока располагается на уровне земли. Между грунтом и одной из боковых граней было свободное пространство 50 см. Внешний вид имитатора массива представлен на рисунке 1. Для проведения испытаний по разрушению горных пород были подготовлены образцы из природного камня, размером от 0,1 до 0,8 м³. Испытания проводились на негабаритах из песчаника и долерита, примеры негабаритов представлены на рисунке 1.



а) бетонной блок, б)– песчаник, в)– долерит

Рисунок 1. Экспериментальные образцы

Исследование поэтапного откола от монолитного бетонного блока электроразрядным способом производилось при иницировании канала разряда в одном шпуре и одновременном иницировании в двух шпурах. Шпуры диаметром 26 мм бурились на расстоянии (30–50) см друг от друга вертикально на расстоянии от 20 до 50 см от свободной боковой грани монолитного бетонного блока. Глубина шпуров составляла от 50 до 80 см. Запуск генератора производился при зарядном напряжении 12 кВ, 13 кВ и 14 кВ при общей емкости генератора 1120 мкФ. Передающей средой в шпуре являлись вода либо полиэтилен. Для каждой комбинации условий проводилось не менее 5 экспериментов.

Испытания с иницированием канала разряда в одном шпуре производились последовательно в каждом шпуре. Форма импульса тока и напряжения, полученные в одном из испытаний, представлены на рисунке 2.

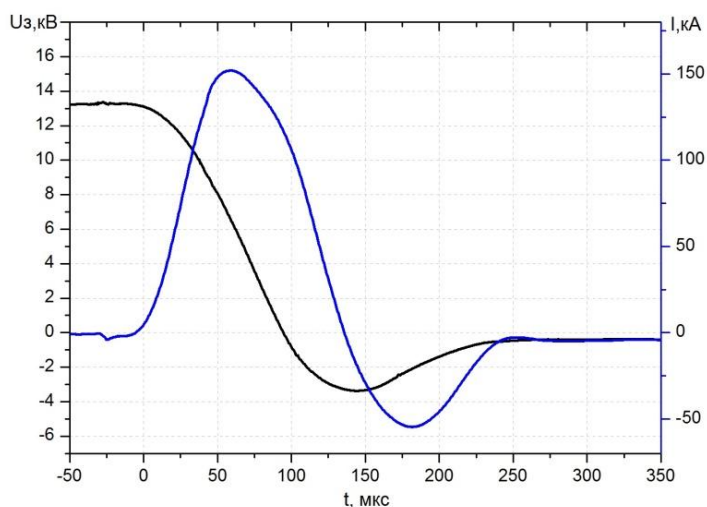


Рисунок 2. Осциллограммы тока и напряжения

На основе осциллограмм из испытаний были построены графики выделяемой в разрядном контуре энергии при различном напряжении (рисунок 3).

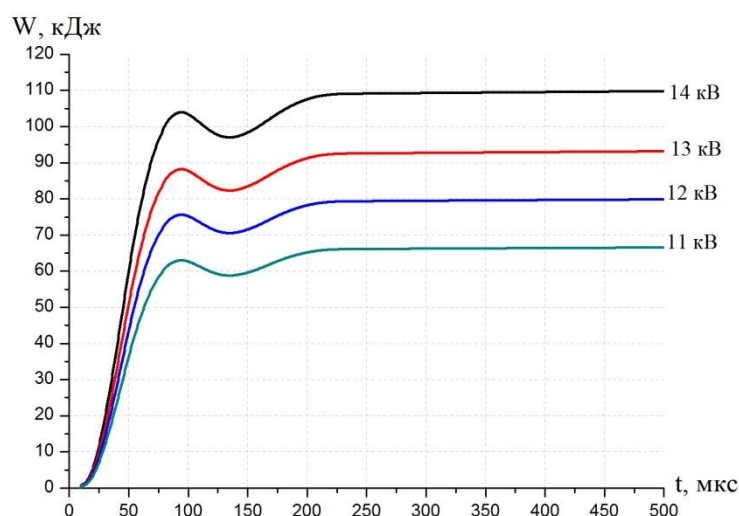


Рисунок 3. Энергия в разрядном контуре

На рисунке 4 представлен участок монолита с подготовленными шпурами и образовавшиеся трещины после серии электровзрывов.



а)

б)

а) – шпуры с установленными картриджами; б) – трещины между шпурами после серии электровзрывов

Рисунок 4. Откол бетонного монолита с иницированием канала разряда в одном шпуре

Произведен ряд испытаний с иницированием канала разряда одновременно в двух шпурах. Эксперименты проводились при одновременном иницировании канала разряда в двух шпурах. Шпуры бурились попарно на

одной линии, одинаковой глубины (h), расстояние от края блока до центра шпура (d) постоянно возрастало. Шаг между линиями шпуров был выбран 25 см, расстояние между шпурами одной линии – 40 см.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований шпурового откола от монолитного бетонного блока при инициировании канала разряда одновременно в двух шпурах.

Таблица 1.

Откол от монолитного бетонного блока

W_r , кДж	d , см	Результат
67	25	2 магистральные трещины от шпуров к краю блока 22 и 25 см
67	50	растрескивание в области шпуров, радиус растрескивания 4–5 см
67	75	растрескивание в области шпуров, радиус растрескивания 2–3 см
80	25	магистральная трещина по всей ширине блока через центры шпуров, от центра шпуров разрослись по 2 трещины длиной порядка 20 см
80	50	магистральная трещина по всей ширине блока через центры шпуров, между шпурами множественные растрескивания
80	75	магистральная трещина между шпурами, от центра шпуров расходятся мелкие трещины длиной до 10 см
94	25	2 магистральные трещины по всей ширине блока через центры шпуров, практически откололся фрагмент массива
94	50	магистральная трещина между шпурами, разветвляется на множество мелких трещин
94	75	3 трещины между шпурами, длиной 25, см 30 см, 28 см

Электровзрыв в бетоне при указанных энергиях, как видно из таблицы 3, вызывает рост трещин длиной в редких случаях больше 25 см. Это скорее всего

связано с длительностью выделения энергии и скоростью распространения ударно-волновых возмущений в бетоне. При длительности выделения энергии порядка 200 мкс (реализуемая в настоящих испытаниях), ударная волна в бетоне успевает пройти расстояние порядка (50–55) см. Поэтому при увеличении расстояния до свободной поверхности более 30 см уже не позволяет сформировать магистральную трещину.

Исследование по разрушению негабаритных горных пород (природного камня) путем электровзрывов производилось при инициировании канала разряда в одном шпуре и одновременном инициировании в двух шпурах. Шпуры диаметром 26 мм бурились таким образом, что расстояние между шпурами было равным расстоянию от соответствующего (левого/правого) шпура до соответствующей (левой/правой) боковой грани негабаритной горной породы. Глубина шпуров составляла от 50 до 80 см. Запуск генератора производился при зарядном напряжении 12 кВ, 13 кВ и 14 кВ при общей емкости генератора 1120 мкФ. Передающей средой в шпуре являлись вода либо полиэтилен. Для каждой комбинации условий проводилось не менее 5 экспериментов. Результаты испытаний по разрушению негабаритов горных пород, где в качестве передающей среды использовалась вода, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты разрушения негабаритов горных пород (передающая ударную волну среда – вода)

$V_{\text{негаб}}, \text{ м}^3$	$h, \text{ см}$	$W_{\text{г}}, \text{ кДж}$	Результат
0,264	30	34	мелкие трещины, разрушения нет.
0,4095	30	34	1 магистральная трещина 60 см
0,27	35	34	разрушение негабарита на множество частей
0,22	30	34	1 магистральная трещина 65 см
0,448	40	34	3 магистральные трещины 35 см
0,27	30	34	4 магистральные трещины 30 см
0,255	30	34	6 магистральных трещин 30 см

0,245	30	34	5 магистральных трещин 30 см
0,5445	35	40	1 магистральная трещина 90 см
0,315	35	40	2 магистральные трещины 40 см
0,239525	30	40	4 магистральные трещины 35 см
0,351	35	40	6 магистральных трещин 40 см
0,1575	25	40	4 магистральные трещины 25 см
0,252	35	40	5 магистральных трещин 30 см
0,36	35	40	4 магистральные трещины 35 см
0,12	30	40	7 магистральных трещин 20 см
0,264	40	47	4 магистральные трещины 30 см
0,165	30	47	разрушение негабарита на множество частей
0,432	35	47	3 магистральные трещины 45 см
0,28	30	47	4 магистральных трещины 35 см

Из результатов экспериментов видно, что при увеличении объема негабарита количество магистральных трещин уменьшается, т.к. увеличивается расстояние до свободной поверхности и, соответственно, уменьшается влияние суперпозиции прямой и отраженной ударной волны, также с увеличением расстояния происходит диссипация её энергии и снижение амплитуды. Указанные данные качественно и количественно согласуются с данными компьютерных испытаний. В случае расстояний до свободной поверхности негабарита более 30 см отраженная волна вносит минимальный вклад в формирование профиля волн механических напряжений.

Результаты испытаний по разрушению негабаритов горных пород, в которых в качестве передающей ударную волну среды использовался полиэтилен, представлены в таблице 3. Испытания производились с использованием электрода с электровзрывным патроном из полиэтилена. По оси патрона расположен тонкий медный проводник диаметром 0,2 мм длиной 90 мм.

Результаты разрушения негабаритов горных пород (передающая ударную волну среда – полиэтилен)

$V_{\text{негабар.}}, \text{ м}^3$	$h, \text{ см}$	$W_{\text{г}}, \text{ кДж}$	Результат
0,2475	35	34	6 магистральных трещин 30 см
0,1914	30	34	4 магистральные трещины 25 см
0,162	30	40	4 магистральные трещины 25 см
0,374	30	40	разрушение негабарита на множество частей
0,42	50	40	4 магистральные трещины 40 см
0,162	35	47	разрушение негабарита на множество частей
0,546	40	47	3 магистральные трещины 40 см
0,455	55	47	разрушение негабарита на множество частей

Из полученных данных видно, что использование полиэтиленового картриджа при тех же параметрах негабаритов и генератора импульсных токов позволяет вести разрушение с большей эффективностью, т.е. при одинаковой затраченной энергии разрушать негабариты на большее число фрагментов. Полученные данные хорошо согласуются с результатами моделирования и лабораторными экспериментами [7, 8].

Таким образом, в рамках четвертого этапа проекта выполнены экспериментальные исследования шпурового электровзрыва и измерение длин генерируемых трещин для верификации физико-математической модели и ее численной реализации. Сравнение результатов компьютерных исследований, выполненных помощью программ ЭВМ для моделирования электроразрядного откола и разрушения горных пород и искусственных материалов с результатами физических экспериментов показало хорошую степень сходимости (более 85 %).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Халилов Д.Д. Исследование электрофизических характеристик искрового канала в горных породах и анализ путей оптимизации устройств

- электроимпульсной технологии: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск, 1973. – 140 с.
2. Воробьев А.А. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Издательство ТГУ, 1971. – 223 с.
 3. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 488 с.
 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. Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
 6. Стефанов К.С. Техника высоких напряжений. – Ленинград: Энергия, 1967. – 496 с.
 7. Kuznetsova N.S., Burkin V.V., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids. II. Characteristics of wave process // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – № 23. – P. 235209.
 8. Юдин А.С., Кузнецова Н.С., Иванов Н.А., Лопатин В.В. Влияние характеристик канала капиллярного разряда при шпуровом отколе от массива бетона // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т 57. № 3/3. – С. 279–282.