

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПРОЧНЫХ ГРУНТОВ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДА, ИНИЦИИРОВАННОГО ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИМИ КОМПОЗИЦИЯМИ**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Разработка новых эффективных, экологически чистых и безопасных методов разрушения прочных грунтов на территории действующих предприятий, где применение взрывов взрывчатых веществ (ВВ) недопустимо, а механические методы использовать нецелесообразно, – задача чрезвычайно актуальная, особенно в условиях развивающихся рыночных отношений, когда требуется реконструкция устаревших объектов с целью увеличения их конкурентоспособности.

Цель работы – установить энергетические режимы инициированного электроразряда, обеспечивающие эффективное разрушение прочных грунтов.

Реальность в достижении поставленной цели подтверждается результатами ранее проведенных исследований [1–3], которыми установлена принципиальная возможность использования электроразряда для разрушения донных грунтов и наземных негабаритов.

Сущность электроразрядного способа разрушения заключается в использовании ударных волн и гидравлических давлений, генерируемых высоковольтным электрическим разрядом. Так же, как и при использовании ВВ [4], в разрушаемом объекте выполняются шпуровые отверстия, которые заполняются водой, а вместо ВВ устанавливается электродная система. При подаче высокого напряжения от установки, генерирующей импульс тока на электродную систему, происходит разряд в разрядном промежутке. Этот процесс сопровождается расширением канала разряда, возрастанием давления, которое может достигнуть  $10^9$  Па, и формированием ударной волны. Воздействуя на стенку шпура, они вызывают развитие в ней трещин и разрушение.

Электроразрядный способ обладает рядом преимуществ перед взрывом ВВ, а именно:

- возможностью регулирования энергии в процессе проведения разрушений грунта;
- отсутствием бризантности, что исключает разлет осколков;
- отсутствием выделения вредных веществ в процессе разрушения;
- обеспечением заданного, направленного откола.

Результаты исследований подтвердили, что электроразрядный способ является эффективным и безальтернативным методом разрушения прочных грунтов и удовлетворяет все требования техники безопасности, а также дает возможность при запасаемой энергии до 100 кДж на глубине залегания до 20 метров разрушать и рыхлить скальные грунты прочностью до 30 МПа с производительностью до 3 м<sup>3</sup>/ч при незначительных энергетических затратах. Подводные съемки подтвердили экологическую безопасность с точки зрения сохранения флоры и фауны.

Достижение производительности разрушения более прочных грунтов до 5–8 м<sup>3</sup>/ч возможно при условии повышения более чем в 3 раза запасаемой энергии электроразряда, а также при разработке эффективных схем силового нагружения, понижающих интегральную прочность грунтов до показателей, приемлемых для механической разработки.

Исследованиями [3] установлено, что за счет инициирования разряда экзотермическими композициями (ЭК), при соблюдении всех норм техники безопасности, можно увеличить в несколько раз энергию, выделяемую в канале разряда, а также уменьшить массогабаритные показатели электротехнических систем. Экзотермическими композициями служат водные растворы аммиачной селитры как окислителя и алюминиевого порошка как горючего.

При высоковольтном электроразрядном шпуровом разрушении, высоковольтном электроразрядном инициированном взрыве, шпуровом взрыве ВВ образуются зоны деформации грунта в виде концентрических сфер, размеры которых зависят от многих факторов, главными из которых являются

ся физико-механические свойства грунтов и мощность динамической нагрузки взрывов. При электроразряде на границе шпура с грунтом ударная волна сжимает последний, напряжение сжатия становится значительно выше прочности грунта, вследствие чего он сжимается, образуя камуфлетную полость, радиус которой значительно превышает радиус шпура. За камуфлетной зоной образуется зона трещинообразования.

В зависимости от мощности и длительности разрядов для описания напряженно-деформированного состояния грунта в ближней зоне используются различные модели. При мощном электроразряде (электровзрыве) используется модель распространения ударной волны, при менее мощном импульсном воздействии – модель цилиндрической упругой волны в бесконечном пространстве. Приближенную оценку связи величины зоны трещинообразования с энергией разряда можно получить методом энергетического анализа. Пусть в результате действия внутренних разрывных окружающих усилий в цилиндре образуется радиальная трещина (рис. 1), площадь трещин определим как

$$S_{тр} = R_{тр} h_{шп}, \quad (1)$$

где  $S_{тр}$  – площадь трещин, м<sup>2</sup>;  $R_{тр}$  – радиус зоны распространения трещин, м;  $h_{шп}$  – глубина шпура (глубина рыхления), м.

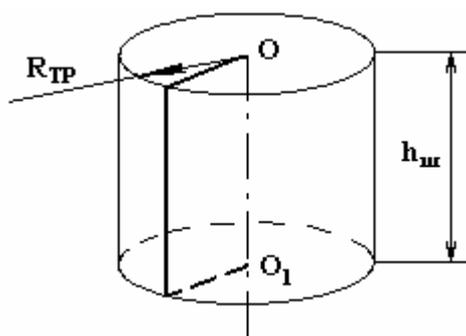


Рис. 1. Схема разрушения блока в виде радиальной трещины

Оценим необходимую энергию для такой трещины. Максимальное окружное усилие определим согласно закону Гука:

$$F_p = E_g \frac{\delta}{l_{тр}} S_{тр}, \quad (2)$$

где  $F_p$  – максимальное окружное усилие, кг/м<sup>2</sup>;  $E_g$  – модуль упругости грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – радиальная деформация цилиндра, м;  $S_{тр}$  – площадь трещин, м<sup>2</sup>;  $l_{тр}$  – длина трещин ( $l_{тр} = R_{тр}$ ), м.

Используя (1), из (2) получаем

$$F_p = E_g \delta h_{шп}. \quad (3)$$

Среднее усилие определим как  $F_p/2$ . Тогда работа по образованию трещин (растяжению грунта) будет

$$A_p = \frac{1}{2} F_p \delta, \quad (4)$$

где  $A_p$  – работа по образованию трещин, Дж.

Деформацию  $\delta$  найдем из выражения (3):

$$\delta = \frac{F_p}{E_g h_{шп}}. \quad (5)$$

Тогда работа по образованию трещин определится выражением

$$A_p = \frac{F_p^2}{2E_g h_{шп}}. \quad (6)$$

В свою очередь величина усилий  $F_p$  пропорциональна растягивающему напряжению  $\sigma_p$  и площади трещин  $S_{mp}$ , то есть

$$F_p = \sigma_p S_{mp}, \quad (7)$$

или 
$$F_p = \sigma_p R_{тр} h_{шп}. \quad (8)$$

Тогда выражение для работы с учетом (8) примет вид

$$A_p = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_p}{E_g} \right) \sigma_p h_{шп} R_{тр}^2. \quad (9)$$

Согласно [5] для прочных донных грунтов  $\sigma_p \sim$  от 10 до 20 МПа,  $E_g =$  от 500 до 1000 МПа.

Следовательно,  $\frac{\sigma_p}{E_g} \sim \frac{1}{500}$  и (9) примет вид:

$$A_p = \sigma_p h_{шп} R_{тр}^2 \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

С другой стороны, работа разрушения в виде образования трещины связана с энергией электровзрыва ( $W_B$ ):

$$A_p = \eta W_B, \quad (11)$$

где  $\eta$  – относительная величина полезного использования энергии взрыва, по оценкам [3], составляет примерно половину от общей энергии,  $\eta = 0,5$ ;  $W_B$  – энергия электровзрыва, кДж.

Приравнявая правые части выражений (10) и (11), получаем соотношение

$$W_B = \frac{\sigma_p h_{шп} R_{тр}^2}{\eta} \cdot 10^{-3}. \quad (12)$$

Если в результате взрыва образуется  $k$  трещин, то

$$W_B = \frac{k}{\eta} \cdot 10^{-3} \sigma_p h_{шп} R_{тр}^2. \quad (13)$$

Из (13) найдем радиус зоны рыхления с учетом радиуса образования трещин:

$$R_{тр} = \sqrt{\left( \frac{10^3 \cdot \eta}{k} \right) \cdot \frac{W_B}{\sigma_p h_{шп}}}. \quad (14)$$

Обычно для прочных пород количество трещин, перекрывающих зону трещинообразования,  $k = 20$  [5]. Тогда выражение (14) примет вид

$$R_{тр} = \sqrt{B_3 \cdot \frac{W_B}{\sigma_p h_{шп}}}, \quad (15)$$

где  $B_3$  – коэффициент энергоучета электровзрыва.

$$B_3 = \frac{10^3 \cdot \eta}{k}. \quad (16)$$

Коэффициент  $B_3$  будет принимать значение 25.

Величина  $\eta$  при электровзрыве учитывает потери тепла на нагрев конструкции электродной системы и самого вещества в канале разряда.

Полученная зависимость (15) определяет величину радиусов трещинообразования донного грунта, то есть степень его разупрочнения для дальнейшей механической разработки.

Для оценки зон разрушения донного грунта учитывается предел прочности грунта на сжатие, и по аналогии с зависимостью (15) радиус зон разрушения можно определить из соотношения

$$R_p = \sqrt{B_3 \frac{W_B}{\sigma_{сж} h_{шп}}}, \quad (17)$$

где  $R_p$  – радиус зоны разрушения, м;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности грунта на сжатие, МПа.

Таблица 1. Расчетные значения объемов зон разрушения

10 г ПЭМ - 40				20 г ПЭМ - 40				30 г ПЭМ - 40			
W, кДж	V, м <sup>3</sup> /ч			W, кДж	V, м <sup>3</sup> /ч			W, кДж	V, м <sup>3</sup> /ч		
	30 МПа	40 МПа	60 МПа		30 МПа	40 МПа	60 МПа		30 МПа	40 МПа	60 МПа
82,50	0,84	0,64	0,44	152,5	1,56	1,2	0,8	222,5	2,28	1,72	1,16
95,00	0,96	0,72	0,48	165,0	1,68	1,28	0,84	235,0	2,44	1,8	1,2
107,50	1,12	0,84	0,56	177,5	1,84	1,4	0,92	247,5	2,6	1,96	1,38
120,00	1,28	0,96	0,64	190,0	1,96	1,52	1,0	260,0	2,72	2,0	1,32
132,50	1,38	1,04	0,68	202,5	2,12	1,56	1,04	272,5	2,88	2,12	1,44
145,00	1,52	1,16	0,76	215,0	2,28	1,68	1,12	285,0	3,0	2,2	1,48
157,50	1,64	1,2	0,8	227,5	2,32	1,76	1,2	297,5	3,08	2,36	1,52
170,00	1,76	1,32	0,92	240,0	2,48	1,88	1,28	310,0	3,28	2,44	1,6

Поскольку электровзрыв характеризуется как взрыв уменьшенного выброса, то есть отношение радиуса зоны разрушения меньше глубины шпура (глубины разрушения), объем зоны разрушения можно в приближенной форме оценить по формуле

$$V = \pi R_p^2 h_{шп}, \quad (18)$$

где  $V$  – объем разрушения от каждого разряда, м<sup>3</sup>;  $h_{шп}$  – глубина шпура для электровзрывов уменьшенного выброса равна 0,6 м.

В табл. 1 приведены расчетные значения объемов разрушений одноэлектродной системой в зависимости от суммарной энергии электроразряда, изменяющейся от 12,5 до 100 кДж, и энерговыделяющих композиций (ЭК) массой 10; 20; 30 г.

Используя расчетные формулы (15) и (17), устанавливаются зоны разрушения и зоны трещинообразования. Для сплошного рыхления дна с последующей механической разработкой устанавливаются расстояния между шпурами: шаг  $L_{ш} = R_p + R_{тр}$  и интервал  $L_{и} = 0,86(R_p + R_{тр})$ . Схема размещения шпуров основана на перекрытии зон трещинообразования от разряда к разряду с целью критического завершения образовавшихся в грунте трещин. В табл. 2 приведены расчетные значения шага и интервала, а на рис. 2 показана схема силового нагружения электровзрыва на донные грунты при проведении электроразрядного рыхления.

Таблица 2. Расстояния между шпурами при рыхлении прочных грунтов

Энергия, кДж	Прочность грунта на сжатие									
	$\sigma = 20$ МПа		$\sigma = 30$ МПа		$\sigma = 40$ МПа		$\sigma = 60$ МПа		$\sigma = 80$ МПа	
	$L_{ш}$	$L_{и}$	$L_{ш}$	$L_{и}$	$L_{ш}$	$L_{и}$	$L_{ш}$	$L_{и}$	$L_{ш}$	$L_{и}$
82	1,43	1,23	1,21	1,04	0,99	0,85	0,83	0,71	0,72	0,61
120	1,76	1,51	1,43	1,23	1,21	1,04	0,99	0,85	0,87	0,75
170	2,07	1,78	1,68	1,45	1,46	1,26	1,24	1,07	1,03	0,89
200	2,2	1,89	1,87	1,61	1,54	1,32	1,32	1,14	1,1	0,95
250	2,53	2,18	2,09	1,8	1,76	1,51	1,43	1,23	1,21	1,04
300	2,65	2,27	2,2	1,89	1,87	1,61	1,54	1,32	1,32	1,14
350	2,97	2,55	2,42	2,08	2,09	1,8	1,76	1,51	1,43	1,23
400	3,19	2,74	2,64	2,27	2,2	1,89	1,87	1,61	1,54	1,32
450	3,52	2,74	2,86	2,46	2,53	2,18	2,09	1,8	1,76	1,51

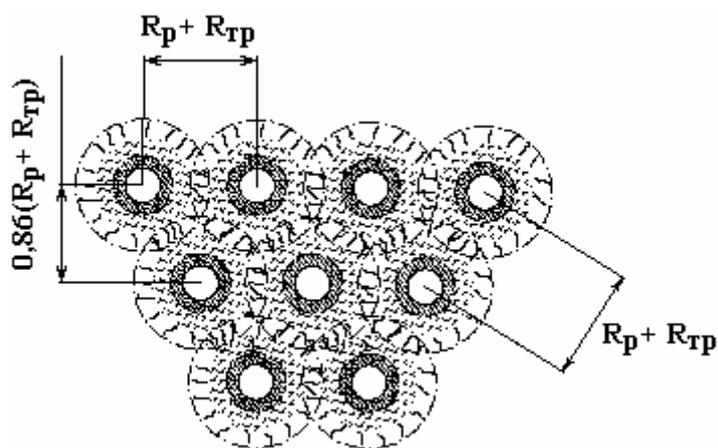


Рис. 2. Схема расположения шпуров для процесса рыхления.  
 $R_p$  – радиус разрушения;  $R_{Tp}$  – радиус трещинообразования

Для определения общего объема затрат времени на процесс рыхления грунта необходимо учитывать весь цикл подготовительных работ, то есть время бурения шпура, технологические операции укладки и снятия электрода.

Время бурения шпура зависит от прочности донного грунта, диаметра шпура, типа и мощности перфоратора. В табл. 3 представлена циклограмма работы технологического комплекса для грунтов различной прочности.

Таблица 3. Циклограмма работы технологического комплекса

Прочность грунта, МПа	Технологические операции	Время технологической операции, мин												Кол-во циклов в час
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
20	Бурение, подъем перфоратора	■	■	■										10
	Поворот фермы				■									
	Постановка электрода и разряд					■								
40	Бурение, подъем перфоратора	■	■	■	■									4,5
	Поворот фермы					■								
	Постановка электрода и разряд						■							
60	Бурение, подъем перфоратора	■	■	■	■	■								4
	Поворот фермы						■							
	Постановка электрода и разряд							■						
80	Бурение, подъем перфоратора	■	■	■	■	■	■							3
	Поворот фермы								■					
	Постановка электрода и разряд									■				
100	Бурение, подъем перфоратора	■	■	■	■	■	■	■	■	■				2,5
	Поворот фермы										■			
	Постановка электрода и разряд											■		

В зависимости от продолжительности цикла в табл. 4 представлен расчет производительности процесса одноэлектродной системы для грунтов различной прочности и энергии разрушения. В процессе проведения работ по разрушению донных грунтов установлено, что объем рыхления от одновременной работы двух электродов в 1,2 раза выше, чем при двух электродах, работающих по очереди. На этом основании в табл. 5 приведены расчетные зависимости производительности процесса двухэлектродной системы для грунтов различной прочности от энергии, выделяемой в шпуре при одновременной работе двух электродов.

Таблица 4. Зависимость производительности электроразрядного рыхления от прочности грунта и энергии

Энергия W, кДж	20 МПа		30 МПа		40 МПа		60 МПа		80 МПа		100 МПа	
	R, м	V, м <sup>3</sup> /ч	R, м	V, м <sup>3</sup> /ч								
82,5	0,65	0,8	0,55	0,56	0,45	0,4	0,37	0,24	0,33	0,20	0,3	0,16
120,0	0,8	1,2	0,65	0,8	0,55	0,56	0,45	0,4	0,38	0,28	0,35	0,24
170,0	0,94	1,68	0,77	1,12	0,65	0,8	0,504	0,48	0,47	0,4	0,42	0,32
200,0	1,0	1,88	0,85	1,36	0,7	0,92	0,6	0,68	0,5	0,48	0,45	0,4
250,0	1,15	2,48	0,95	1,72	0,8	1,2	0,65	0,8	0,55	0,56	0,5	0,48
300,0	1,2	2,72	1,0	1,88	0,85	1,36	0,7	0,92	0,6	0,68	0,55	0,56
350,0	1,35	3,44	1,1	2,16	0,95	1,72	0,8	1,2	0,65	0,8	0,6	0,68
400,0	1,45	3,96	1,2	2,72	1,0	1,88	0,85	1,44	0,72	0,96	1,15	0,82
500,0	1,6	4,84	1,3	3,2	1,15	2,48	0,95	1,72	0,8	1,2	0,7	0,92

Таблица 5. Зависимость производительности электроразрядного рыхления от прочности грунта и энергии для двухэлектродной системы

Энергия W, кДж	Производительность, м <sup>3</sup> /ч					
	20МПа	30МПа	40МПа	60МПа	80МПа	100 МПа
82,5	1,9	1,3	1	0,6	0,5	0,4
120	2,9	1,9	1,3	1	0,7	0,6
170	4	2,7	1,9	1,2	1	0,8
200	4,5	3,3	2,2	1,6	1,2	1
250	5,9	4,1	2,9	1,9	1,3	1,2
300	6,5	4,5	3,3	2,2	1,6	1,3
350	8,2	5,2	4,1	2,9	2	1,6
400	9,5	6,5	4,5	3,5	2,3	2
500	11,6	7,7	6	4,1	2,9	2,2

Таким образом, электроразряд в комплексе с ЭК обеспечивает требуемую производительность разрушения прочных грунтов – от 5 до 8 м<sup>3</sup>/ч, что позволяет ему конкурировать со взрывом ВВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Яцюк С.А. Электроразрядное разрушение донных грунтов // Электронная обработка материалов. 2006. № 1. С. 70–72.
2. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Муштатный Г.П. Экспериментальные исследования электроразрядного разрушения высокопрочных донных грунтов // Электронная обработка материалов. 2006. № 2. С. 20–22.
3. Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
4. Вовк А.А., Черный Г.И., Кравец В.Г. Действие взрыва в грунтах. Киев: Наукова думка, 1974. 207 с.
5. Кушнарев Д.М., Беликов М.П. Взрывные работы в гидромелиоративном и сельском строительстве. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 223 с.

Поступила 21.03.07

## Summary

Technological modes are developed and power expenses are established, circuits of power influence, efficiency destruction by the electric category strong ground is established. Destruction by the electric category answers the entire requirement of the safety precautions and norm of efficiency in conditions of reconstruction of working sea and river ports and other constructions.