И.И.ДРОЗД
Военно-инженерный университет, Москва,
Россия

РАСЧЕТ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ВЫЕМОК ЗАДАННЫХ РАЗМЕРОВ

Введение. Объемы строительных работ гражданских, промышленных, транспортных и военных объектов в сезонномерзлых и вечномерзлых грунтах значительны и с каждым годом увеличиваются, в том числе и с взрывными способами рыхления этих грунтов.

Противоречие рекомендаций по параметрам БВР, предлагаемых в разных работах для взрывного рыхления мерзлых грунтов, обусловлено тем, что ни один из предлагаемых способов расчета не основан ни на физике разрушения мерзлых грунтов взрывом зарядов, ни на требованиях к качеству их дробления. Точнее эти требования учитываются при корректировке параметров БВР для конкретного случая работ и как определяющие внешние факторы в методики расчета не входят. Вместе с тем наверняка каждый из предлагаемых методов расчета параметров БВР основан на большом объеме теоретических и экспериментальных исследований, и полученные в результате этих исследований зависимости были справедливы для тех условий, в которых они проводились.

Учитывая все эти обстоятельства, была поставлена научная задача установить для условий взрывного формирования выемок в мерзлых грунтах с глубиной промерзания от 0,5 до 2,0 м применительно к устройству фортификационных сооружений обобщающие закономерности изменения параметров зон разрушения с изменением длин зарядов $l_{зар}$, расстояний между зарядами в ряду a, расстояний между рядами зарядов b, расстояний рядов зарядов до дополнительной свободной поверхности w и времени замедления взрыва зарядов τ. Имея в виду практическую целенаправленность работы, основной объем экспериментальных исследований в натурных условиях предполагалось проводить с применением в качестве основного типа ВВ – тротиловых шашек диаметром 30 мм, длиною 70 мм и массой 75 г, размещаемых в разных количествах в шпурах диаметром 40 мм.

Лабораторные исследования. В лаборатории МГГУ были проведены две серии опытов. В первой изучалось влияние теплоты взрывчатого превращения ВВ (Q), расстояния между

зарядами (a), расстояния между рядами и дополнительной свободной поверхностью (W) и времени замедления (τ) их взрыва на формирование радиального трещинообразования. В качестве модели мерзлого грунта использовались блоки органического стекла (плексигласа) размером 95 × 120 × 80 мм, скорость распространения продольных волн $C_p = 2{,}6$ км/с. В качестве ВВ использовался пиротехнический состав (ПС) с теплотой взрывчатого превращения $Q_1 = 2514$ кДж/кг; $Q_2 = 3771$ кДж/кг. Шпур в плексигласе бурился глубиною 70 мм диаметром 2 мм. В основном применялись заряды длиною $l_{зар} = 60$ мм и массой $m = 0{,}2$ г при насыпной плотности ПС $\rho_{ВВ} = 0{,}95$ г/см^3 и скорости детонации $D = 2{,}0$ км/с.

В результате этих опытов было установлено, что при камуфлетном взрыве удлиненных зарядов по всей их длине формируются семейства радиальных трещин, группирующихся вдоль некоторых образующих плоскостей, угол между которыми составляет 40-50°. В каждом семействе плоскости отдельных трещин, располагающихся друг за другом по длине заряда, могут не совпадать, но угол между ними, как правило, незначителен. Между образующими плоскостями разрушений практически не наблюдается (рис.1).

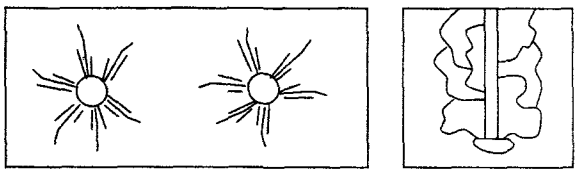


Рис.1. Схема разрушения взрывом заряда ПС органического стекла

Для рассматриваемых условий число радиальных трещин составляет 35-42 шт. и их средняя длина равна $\bar{b}_0$. Трещины имеют вид вытянутых полуэллипсов, причем их ширина составляет порядка $0{,}8\bar{b}_0$. При повторных опытах среднее значение длин трещин $\bar{b}_0$ и их дисперсии $Д$ статистически одинаковы (табл.1, 2).

Таблица 1

Результаты измерения длины трещин

Номер опыта	b_0, мм	Номер опыта	b_0, мм	Номер опыта	b_0, мм
1	27	15	17	29	14
2	19	16	28	30	15
3	22	17	20	31	21
4	20	18	23	32	20
5	17	19	18	33	17
6	20	20	16	34	14
7	27	21	21	35	21
8	20	22	22	36	25
9	24	23	22	37	26
10	25	24	17	38	22
11	11	25	21	39	18
12	10	26	25	40	21
13	14	27	19	41	22
14	40	28	24	42	30

Таблица 2

Статистические показатели при различных значениях Q в двух сериях опытов

Параметр	$Q = 3771$ кДж/кг		$Q = 2514$ кДж/кг	
	1	2	1	2
$\bar{b}_0$	20,65	22,86	19,03	18,33
D	29,49	50,51	41,64	33,22
σ	5,43	7,12	6,45	5,76
R	0,26	0,31	0,34	0,31

При среднем значении $b_0 = 22$ мм для $Q = 3771$ кДж/кг (эквивалент тротила) ему соответствует первое критическое значение

$$a_1^* = 2\sqrt{2}\,\bar{b}_0, \qquad (1)$$

формирование одной трещины по плоскости расположения двух зарядов наблюдалось при их одновременном камуфлетном взрыве только при $a \le 60$ мм. При $a = 80$ мм второе критическое значение

$$a_2^* < 4{,}2\bar{b}_0, \qquad (2)$$

взаимное влияние взрывов двух зарядов на процесс разрушения породы – формирование трещин, не зафиксировано.

Критическая глубина заложения зарядов, при котором дополнительная свободная поверхность будет влиять на процесс разрушения породы взрывом удлиненного заряда, $W_1^* \le 2{,}1\bar{b}_0 = 45$ мм. Действительно, при $W < W_1^*$ средняя величина b_0 и дисперсия D для взрыва удлиненного заряда были статистически одинаковы с величинами b_0 и D, полученными при камуфлетном взрыве удлиненных зарядов. Однако в этом случае обнаружено новое явление – формирование магистральных трещин при 30 мм $\le W \le$ 40 мм. Плоскости магистральных трещин проходят по всей длине заряда, направлены в сторону дополнительной свободной поверхности и имеют длину порядка $2{,}5b_0$. Это те трещины, которые при $W_2^* < 45$ мм формируют воронки выкола по всей длине заряда в сторону дополнительной свободной поверхности.

Установлено, что при $a \ge 40$ мм и разновременном камуфлетном взрыве нескольких удлиненных зарядов взаимного влияния на процесс формирования трещин в плексигласе не наблюдается. Следовательно, интерференция волн напряжений на поверхностях трещин, образовавшихся в результате предыдущих взрывов соседних зарядов, несущественно влияет на процесс разрушения породы взрывом данного заряда, т.е. если время замедления последующего взрыва больше времени действия взрыва предыдущего заряда, то каждый последующий взрыв заряда разрушает породы самостоятельно, словно и не было взрыва рядом расположенных зарядов. Подчеркнем, это имеет место при $a \ge 40$ мм $\approx$ $\approx 2\bar{b}_0$. Конечно, в этом случае наблюдается пересечение или ограничение роста трещин, формирующихся при последующем взрыве заряда, и только.

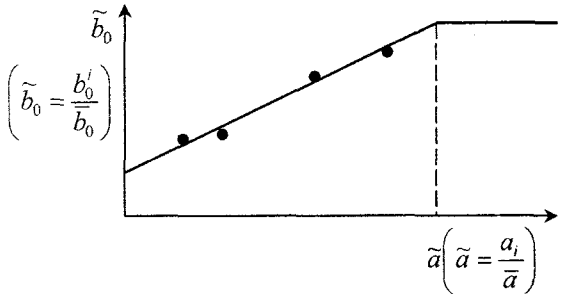


Рис.2. Влияние расстояния между зарядами a на длину трещин при одновременном взрыве нескольких зарядов

Установлено, что при одновременном камуфлетном взрыве нескольких (пять и более) удлиненных зарядов при $a < 2\sqrt{2}\,\bar{b}_0$ имеет место взаимное влияние, приводящее к резкому уменьшению числа трещин в сторону от плоскости расположения зарядов (рис.2). Причем длина этих трещин может быть рассчитана по формуле

$$b_0^i = a\frac{0{,}4C_p z}{\sqrt{\left(C_p + 0{,}5V_{\text{м.ч}}^{\text{ср}}\right)^2 - 0{,}16C_p^2 z^2}}. \qquad (3)$$

Кроме того, в этих исследованиях было установлено, что при одновременном взрыве пяти-шести и более удлиненных зарядов имеет место существенное усиление разрушения породы в зоне между зарядами при $a < a_1^*$, выражающееся в существенном увеличении ширины трещины по плоскости расположения зарядов, и формирование дополнительных трещин, приводящих к выколу кусков и т.д.

Во второй серии лабораторных экспериментов изучался процесс интенсивного мелкодисперсного дробления хрупких силикатных блоков размером 60 × 60 × 60 мм. В нем пробури-

вался шпур диаметром 2 мм и глубиною 45 мм, в шпуре размещался заряд ПС длиною 35 мм и массой 0,25 г. В силикатных блоках размер зерен не превышал 2 мм.

Теплота взрывчатого превращения ПС составляла 1257; 2514; 3771 и 5028 кДж/кг. С каждым значением Q производили четыре взрыва. После взрыва раздробленную массу сортировали, находили средний размер куска и определяли массу фракции с $d < 2$ мм, которая и соответствовала интенсивному мелкодисперсному дроблению породы. В результате взрывов были получены опытные данные, в частности, значения $\overline{m}_7$, имеющие прямо пропорциональную зависимость от Q:

Q, кДж/кг	2514	3771	5028	6285
m_7, г	178	186	198	218

Экспериментальные исследования в натурных условиях. Эти исследования проводились для корректировки установленных в лабораторных условиях зависимостей, применительно к реальному процессу разрушения мерзлого грунта взрывом удлиненных зарядов с целью формирования в нем выемок при устройстве фортификационных сооружений (ФС).

Исследования проводились с 14 по 24 марта 2000 г. на взрывном поле учебного центра Тюменского филиала ВИУ (ТФВИУ) в пос. Андреевском вблизи г. Тюмени .

В результате выполненных исследований было установлено следующее:

1. Для обеспечения надежного разрушения мерзлого грунта необходимо, чтобы $\ell_з/\ell_{шп} = 0{,}25 \div 0{,}4$, с дальнейшим увеличением $\ell_з$ происходит уменьшение размеров воронки выброса.

2. Заряд должен располагаться на глубине 2/3 глубины промерзания грунта. При расположении заряда на границе с мерзлым грунтом или в талом подстилающем слое для обеспечения надежного рыхления грунта необходимо увеличивать его массу и тем самым $\ell_з$.

3. При взрыве одиночных зарядов и одновременном взрыве двух зарядов образуется воронка разрушения, состоящая из двух явно различаемых частей. Нижняя часть почти цилиндрическая, среднее значение диаметра $d_н = 35{,}5$ см, а верхняя часть воронки соответствует отколу (разрушению) растительного слоя грунта и имеет диаметр $d_в \approx 104$ см. Таким образом, воронка разрушения напоминает по форме обычную бытовую воронку. С учетом двойственности характера разрушения грунта необходимо различать $b_0^н$ $(d_н/2)$ – радиус зоны регулируемого дробления в нижней части и $b_0^в$ $(d_в/2)$ – радиус воронки поверху при оптимальном отношении $\ell_з/\ell_{шп}$ – $b_0^н \approx 18$ см, $b_0^в \approx 52$ см.

4. Получили подтверждение соотношения (1) и (2) для процессов разрушения мерзлого грунта при одновременном взрыве двух зарядов. Установлено, что если $a < a_1^* = \sqrt{2}\,\overline{b}_0$, то имеет место полная проработка забоя. Если же $a_1^* \le a \le a_2^*$ (здесь $a_2^* = 4{,}2\,\overline{b}_0$), то формируется общая воронка разрушения в верхней части с образованием выступов (порогов) по подошве между зарядами. Если $a > a_2^*$, то взаимного влияния взрывов на процесс разрушения мерзлого грунта не происходит.

5. При одновременном взрыве комплекта пяти-шести и более зарядов происходит существенное увеличение размеров зоны разрушения по подошве (при $a < 2{,}8d_н$) по сравнению с размерами зоны разрушения, возникающей при взрыве одиночных и спаренных зарядов. При этом ширина зоны рыхления по подошве достигает значений $3{,}6d_н$ и составляет 72 % от теоретической оценки размеров зоны разрушения при взрыве удлиненного заряда ($b_0 \approx 5d_н$). Влияние одновременного взрыва комплекта зарядов практически не сказывается на ширине (диаметре) и длине общей выемки.

6. При взрыве комплекта зарядов вблизи дополнительной открытой поверхности усиливается разрушение грунта по подошве и по верхней части выемки разрушения, причем и в этом случае наблюдается подтверждение теоретической оценки по влиянию дополнительной открытой поверхности на формирование воронки разрушения. При этом установлено, что при $a \le 2{,}5a_1^*$ имеет место полное разрушения грунта в сторону свободной поверхности. Для обес-

печения надежного, гарантированного разрушения грунта между рядами расстояние ($b = W$) между ними следует принимать меньше $3d_н$.

Перед тем как проводить взрывы по опытному формированию выемок, был проведен опытный взрыв с параметрами БВР, рассчитанными по руководству по подрывным работам РПР-69*, для выемки размером 0,9 × 4 × 5 м с $z_м$ = 0,9 м: $\ell_{шп}$ = 0,7 м; $\ell_з$ = 0,21 м (три тротиловые шашки); a = 1,0 м; b = 0,75 м; всего пять рядов по пять зарядов с общей массой 5,625 кг, при этом удельный расход q составлял 0,3 кг/м^3.

В результате взрыва с этими параметрами получилось неудовлетворительное рыхление грунта, практически не разбираемого вручную, поскольку имел место почти камуфлетный взрыв без выброса с формированием магистральных трещин на площади 3,7 × 4,9 м.

Учитывая результаты лабораторных и натурных экспериментальных исследований, а также исследования других авторов было предусмотрено проведение двух различных способов формирования выемок с предварительным щелеобразованием по центру и по ее контуру.

В первом случае параметры БВР с $z_м$ = 0,8÷0,85 м были следующими: $\ell_{шп}$ = 0,64 м; $\ell_з$ = 0,21 м (три тротиловые шашки). В центральном ряду расстояние между зарядами a = 0,7 м и в нем было семь зарядов. Кроме того, на расстоянии 1,5 м в обе стороны от центрального располагались два соседних ряда, в которых a = 1,0 м и было пять зарядов. Эти ряды взрывались примерно через 10 мин после 1-го взрыва. Всего было 17 зарядов общей массой 3,825 кг, при этом удельный расход составлял 0,22 кг/м^3.

Результаты взрывов:

1. После взрыва зарядов 1-го ряда была видна хорошо сформировавшаяся зона разрыхленного грунта, приподнявшегося на высоту приблизительно 20 см, имел место частичный выброс грунта.

2. При одновременном взрыве двух соседних рядов сформировались две зоны с разрыхленным грунтом шириною 0,9-1,2 м и с частичным выбросом грунта. Между центральным и левым рядом образовался целик неразрушенного грунта шириною 20-25 см поверху, а между центральным и правым рядом – целик шириною 40-45 см. Каждая из трех зон разрушения хорошо разбиралась лопатами, но выемка не препарировалась.

В этом опыте было получено подтверждение результатов, полученных при предыдущих взрывах, а именно:

– при одновременном взрыва пяти и более зарядов, расположенных вдоль одной плоскости, имеет место интенсивное разрушение грунта, когда a = 1,0 м, т.е. превышающее размер зоны при одиночном взрыве в 3 раза;

– при $W/d_н$ = 4,2 (в данном случае W = 1,5 м) не происходит полного разрушения грунта между рядами.

Во втором случае при формировании щели по контуру выемки размером 0,7 × 4 × 5 м при $z_м$ = 0,7 м параметры БВР были следующими: $\ell_{шп}$ = 0,52 м; $\ell_з$ = 0,21 м (три тротиловые шашки); a = 0,6 м. Заряды размещались внутрь от контура выработки на расстоянии 0,5 м. Всего было 26 зарядов – 8 шт. по длине, включая угловые, и 5 шт. по ширине (без угловых зарядов).

В результате взрыва контурных зарядов была сформирована «рамка» хорошо разрыхленного грунта с частичным его выбросом, ширина зоны разрушения 0,8-1,1 м, в среднем 0,95 м. Одна сторона «рамки» длиною 5 м была полностью препарирована на глубину 70-80 см – до границы с талым грунтом. Внешние размеры «рамки» составляли 4,6 × 5,1 м. Внутри «рамки» остался целик размером 3,0 × 3,4 м. Целик было решено разрушить одновременным взрывом двух рядов аналогичных зарядов по 3 шт. в ряду при a = 1,0 м. Ряды располагались следующим образом. Ряд зарядов, примыкающий к раскопанной стороне «рамки», был на расстоянии W_1 = 1,5 м от плоскости расположения зарядов в контуре, крайние заряды находились от плоскости расположения зарядов в торце на расстоянии 1,2 м. Второй ряд зарядов, примыкающий к нераскопанной стороне «рамки», располагался на расстоянии W_2 = 1,2 м до плоскости зарядов в «рамке». Крайние заряды этого ряда располагались таким же образом, как и заряды в первом ряду.

* Руководство по подрывным работам. М.: Воениздат, 1996. 232 с.

После взрыва обоих зарядов было установлено следующее:

1. Для ряда с W_2 имело место удовлетворительное рыхление грунта с небольшим выбросом, при этом был получены три максимальных куска размерами 1 × 1 × 0,25 м и 12 кусков размерами 0,5 × 0,5 × 0,25 м, остальная часть разрыхленного грунта разрушена меньше и легко выбирается лопатами.

2. При взрыве ряда с W_1 между ним и свободной поверхностью (в результате извлечения грунта из соответствующей стороны «рамки») остался целик шириною 0,9 × 1,0 м и длиною 2,6 м. Причем от взрыва зарядов в этом ряду произошло разрушение грунта шириною порядка 1,0 м. В целике были обнаружены две трещины по ЛНС, образованные от взрыва центрального заряда в этом ряду.

Таким образом, еще раз было получено подтверждение, что при $W/d_н = 4{,}2$ не обеспечивается полное разрушение грунта между зарядами.

В рассматриваемом случае всего было 32 заряда, их общая масса составляла 7,2 кг, а удельный расход $q = 0{,}48$ кг/м^3.

Итак, установлено следующее:

1. Одновременный взрыв по плоскости расположения зарядов с $a = (2{,}6 \div 2{,}7)d_н$ позволяет надежно формировать в грунте зону интенсивного дробления шириною 0,9-1,1 м.

2. При взрыве последующих рядов удаление взорванного грунта от предыдущих взрывов не обязательно.

3. Для обеспечения надежного разрушения между рядами расстояние между ними должно быть меньше $3d_н$.

Таким образом, теоретические оценки, лабораторные и натурные экспериментальные исследования позволили разработать новую технологию взрывного формирования выемок заданных размеров для устройства фортификационных сооружений с возможностью удаления разрыхленного мерзлого грунта вручную.

Рекомендации по рациональным параметрам БВР для рыхления мерзлых грунтов при устройства ФС. За основу расчета приняты результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований взрывных работ в натурных условиях изложенные в докладе Г.М.Крюкова, И.В.Смагера, И.И.Дрозда (см. настоящий сборник, секция 1). При этом радиус зоны регулируемого дробления оценивается по формуле

$$b_0 = 0{,}5d\sqrt{P_0 / \sigma_{рас}}\,, \qquad (4)$$

где d – диаметр заряда, м; P_0 – давление ПД (точка Жугэ), Па; $\sigma_{рас}$ – предел прочности на одноосное растяжение, Па.

В конкретных горно-геологических условиях для устройства ФС требуется осуществить взрывное рыхление площади мерзлого грунта размерами ab.

I. Прежде чем осуществить это рыхление, проводится одновременный взрыв двух зарядов с $a = 1{,}4\,b_0^т$; $1{,}7\,b_0^т$; $2\,b_0^т$; $2{,}3\,b_0^т$ (теоретическая) и определяется величина $b_0^э$ (экспериментальная) – основной критерий, который соответствует радиусу зоны регулируемого дробления при взрыве одиночного заряда. Величина $b_0^э$ находится по результатам пробных взрывов, при которых имеет место еще формирование одной общей полости по плоскости расположения зарядов при высоте неразрушенного целика не более 10 % от длины заряда $l_з$.

II. Вдоль поперечного размера в планируемой выемке около одного из ее торцов на расстоянии $0{,}5\,b_0^э$ размещается ряд зарядов, расстояние между которыми составляет $(1{,}2\text{-}1{,}4)b_0$. Все заряды в ряду взрываются одновременно.

III. Все последующие заряды размещаются в рядах, расположенных друг от друга на расстоянии $(1{,}8\text{-}2)b_0$.

IV. В рядах предусматривается шахматное расположение зарядов.

V. Применяется КЗВ в ряду и между рядами. Причем в этом случае при расчете в формуле применяется $b_0^э$.