

ПРОВАЛЬНЫЕ ВОРОНКИ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВАХ В СЛАБОСВЯЗАННЫХ ГРУНТАХ

В. В. Адушкин, Л. М. Перник

(Москва)

Провальные воронки на дневной поверхности образуются главным образом при подземных взрывах в слабосвязных грунтах. Иногда провальные воронки образуются при взрывах в скальных грунтах. Обычно это происходит при крупномасштабных подземных взрывах. Провальная воронка в этом случае располагается внутри холма, образованного в эпицентральной области из вспученной и разрыхленной породы. Объем провальной воронки примерно в четыре раза меньше объема воронки выброса при равных энергиях взрыва. Однако в ряде случаев, например для получения выемки на свободной поверхности при помощи ядерного взрыва, когда выход радиоактивных газов в атмосферу недопустим, образование провальной воронки может оказаться целесообразным.

В [1] методом моделирования исследованы общие закономерности процесса образования провальных воронок. В настоящей работе излагаются новые результаты модельных исследований.

Результаты исследований на модели

Моделирование процесса образования провальных воронок при подземных взрывах проводилось аналогично работе [1]. Внутри массива из сухого кварцевого песка объемным весом $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ на глубине $W = 5 \div 50 \text{ см}$ размещался в эластичной оболочке объем сжатого воздуха сферической формы. Этот объем имитировал котловую полость, заполненную продуктами взрыва, песок представлял грунт, разрушенный взрывными волнами. Атмосфера над поверхностью песка вакуумировалась до давления $p_0 \sim 10^{-3} \text{ кГ/см}^2$. Радиус полости $r_0 = 3 \div 5 \text{ см}$, $p = 10^{-2} \div 1 \text{ кГ/см}^2$, энергия сжатого газа $E = 10^7 \div 10^9 \text{ эрг}$. Величина литостатического давления $\rho g W = 10^{-1} \div 10^{-2} \text{ кГ/см}^2$, где g — ускорение силы тяжести. В результате соотношение действующих в модели сил соответствовало условиям натурального взрыва.

В опытах не изменялись коэффициенты внутреннего трения $K = 0,84$ и показатель адиабаты газа в полости $\gamma = 1,4$. Величина сцепления сухого песка ($c = 10^{-4} \text{ кГ/см}^2$) не учитывалась. В связи с низкой скоростью движения частиц песка в модели ($0,1 \div 10 \text{ м/с}$) сжимаемостью грунта также можно было пренебречь.

В опытах устанавливалась зависимость основных размеров провальной воронки — радиуса R , глубины H и объема V — от безразмерных комбинаций переменных параметров

$$E^0 = E / (\rho g W + p_0) W^3, \quad W^0 = W / r_0. \quad (1)$$

Опыты проводились сериями: при фиксированном значении параметра W^0 варьировалась величина E^0 за счет изменения энергии газа в рабочем объеме. В зависимости от величины параметров (1) выявлены три характерные области, различающиеся механизмом образования воронок (рис. 1). Границы между областями отмечены кривыми I и II. Величину E^0 вдоль кривой I обозначим $E_{ж}^0$, вдоль кривой II — E_0^0 . Тогда при $E^0 \geq E_{ж}^0$ располагается область воронок выброса, в которой движение грунта типично для взрывов на выброс — высота подъема купола монотонно возрастает до максимальной величины и затем уменьшается в поле силы тяжести. При $E^0 \leq E_0^0$ расположена область провальных воронок, в которой движение грунта происходит только вниз за счет непрерывного обрушения свода полости.

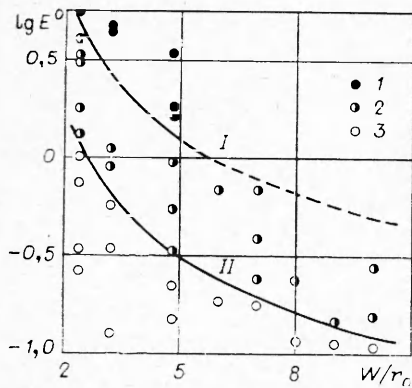


Рис. 1. Энергетические границы между взрывами на выброс (1), рыхления (2) и с образованием провальных воронок (3).

В диапазоне изменения $E_{ж}^0 > E^0 > E_0^0$ расположена переходная область взрывов рыхления. Высота подъема купола здесь меньше глубины заложения заряда. Характерная черта этой области — «взрыв» купола, происходящий вскоре после его образования и вызванный прорывом газов из котловой полости. Время прорыва и масса выбрасываемого при этом грунта зави-

сят от соотношения параметров E^0 и W . В частности, когда величина E^0 приближается к E_0^0 , прорыв газов происходит уже внутри образовавшейся провальной воронки.

Зависимость граничных значений $E_{ж}^0$ и E_0^0 от параметра W^0 можно представить следующими эмпирическими формулами

$$E_{ж}^0 = 0,056 \exp\left(\frac{6,91}{\sqrt{W^0}}\right), \quad (2)$$

$$E_0^0 = 0,014 \exp\left(\frac{6,91}{\sqrt{W^0}}\right). \quad (3)$$

Изменение радиуса воронок в модельных опытах в зависимости от E^0 показано на рис. 2 для ряда фиксированных значений W^0 . Через граничные значения параметров $E_{ж}^0$ и E_0^0 на рис. 2 проведены линии I и II, показывающие положение отмеченных выше трех областей на этом графике. Зависимость радиуса воронки от основных определяющих параметров (1) для всех трех типов взрыва можно представить эмпирической формулой

$$\frac{R}{W} = 0,5 + 0,45 \lg \left[(E^0)^2 + \exp 5,116 \left(\frac{0,58}{\sqrt{W^0} - 0,77} - 0,5 \right) \right]. \quad (4)$$

При $E^0 > E_{ж}^0$, т. е. в области воронок выброса, радиус воронки не зависит от величины W^0 и зависимость (4) переходит в формулу для показателя выброса $n = R/W$ [2]:

$$n = 0,5 + 0,9 \lg E^0. \quad (5)$$

С другой стороны, при $E^0 < E_0^0$, т. е. в области провальных воронок, влияние E^0 становится несущественным, и радиус воронки зависит только от W^0 . В этой области формула (4) может быть записана в виде

$$R/W = 0,58 / (\sqrt{W^0} - 0,77). \quad (6)$$

Вокруг провальной воронки обычно образуется обширная зона проседания [1], радиус которой определяется по формуле

$$R_0/W = 5,9 / (W^0 + 3,48). \quad (7)$$

Глубина провальной воронки H также зависит только от параметра W^0 :

$$H/W = 1,1 / W^0 - 0,069. \quad (8)$$

Зависимости (6) — (8), полученные в модельных экспериментах, определяют размеры провальной воронки и зоны проседания свободной поверхности в широком диапазоне изменения относительной глубины заложения W^0 .

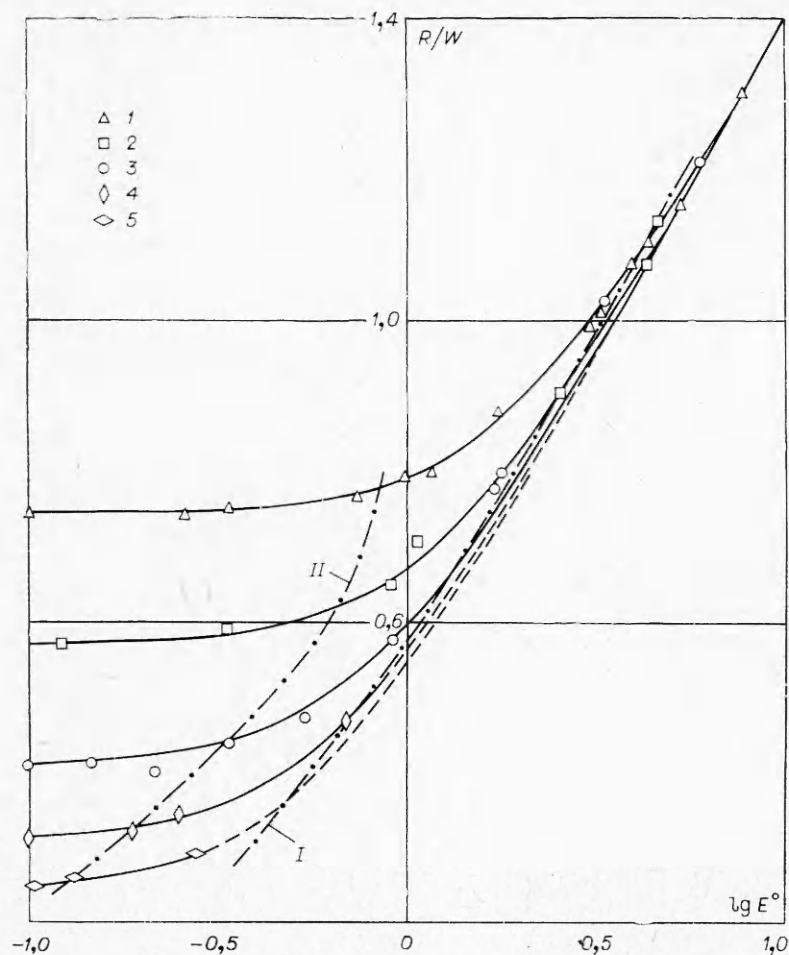


Рис. 2. Зависимость отношения радиуса воронки к глубине заложения от параметра E^0 для $W^0=2,4$ (1), 3,2 (2), 4,8 (3), 7,0 (4), 10,0 (5).

Анализ натуральных данных

В таблице собраны опубликованные материалы [3, 4] по размерам провалных воронок, образовавшихся при проведении подземных ядерных взрывов в США на полигоне в штате Невада и на о. Амчатка. Условия проведения подземных ядерных взрывов в аллювиальных отложениях Невады наиболее близки к модельным. Действительно, физико-механические свойства аллювия, представляющего собой слабосвязную смесь песка и гравия плотностью $1,5 \div 1,9$ г/см³ и пористостью $20 \div 40\%$, практически совпадают со свойствами модельного грунта. Условия взрывов в туфе также близки к условиям модели, тем более, что массив туфа располагается под мощным слоем аллювиальных отложений.

Для сопоставления результатов модельных экспериментов с натурными данными необходимы сведения о размерах котловых полостей. Для некоторых взрывов такие данные получены при помощи бурения массива после взрыва [5] и приведены в таблице. При отсутствии измерений величина радиуса котловой полости (r_0 , м) вычислена по формуле из работы [6]

$$r_0 = aq^{1/3}, \quad (9)$$

Грунт на глубине заложения	Название взрыва	q , кт	W , м	R , м	H , м	V , м ³	r_0 , м
Аллювий	Fisher	13,0	364	78,6	15,25	$1,65 \cdot 10^5$	37,5
	Stoat	4,7	302,6	58	2,1	$6,9 \cdot 10^3$	24,4
	Agouti	5,8	261,1	69	12,8	$7,6 \cdot 10^4$	36,0
	Stillwater	3,1	181,5	61,9	12,2	$5,6 \cdot 10^4$	24,7
	Armadillo	6,5	240	68	11,3	$6,1 \cdot 10^4$	23,8
	Chinchilla I	1,8	150	47,9	12,8	$2,3 \cdot 10^4$	17,1
	Cimarron	12	305	70,75	11	$5,64 \cdot 10^4$	32,6
	Brazos	8,4	256,5	53,35	9,5	$3,3 \cdot 10^4$	27,7
	Dormouse I	11	261,1	79,3	29,6	$2,3 \cdot 10^5$	34,7
	Haymaker	46	408,7	136,5	31,4	$6 \cdot 10^5$	49,7—56,1
	Par	38	406	72,45	22	$3 \cdot 10^4$	48,8
	Parrot	1,2	180	39,7	5,5	$1,1 \cdot 10^4$	14,6
	Merlin	10	296	77,8	16,8	$1,3 \cdot 10^5$	32,4*
	Petrel	1,2	180,9	44,2	5,2	$7,3 \cdot 10^3$	18
	Cyclamen	13	305	83,55	16,8	$1,22 \cdot 10^5$	28
	Vulcan	25	322,4	80	23,5	$1,84 \cdot 10^5$	43,8*
Pommard	1,4	209	44,2	2,1	$3,7 \cdot 10^3$	16,8*	
Туф	Hoosic	3,4	187,3	44,85	6,1	$2 \cdot 10^4$	25,9
	Aardvark	36	434,3	125	22,9	$3 \cdot 10^5$	47,8
	Bilby	235	715	244	26,5	—	100*
	Mudpack	2,7	152	38,75	6,4	$1,45 \cdot 10^4$	23,2
	Discus Thrower	21	337,3	145,5	20,4	$3 \cdot 10^5$	32,6
	Blanca	19	285	150	—	—	39,6—44,3
Риолит	Halfbeak	300	820	198	10,7	—	76,2
Лава	Milrow	1200	1200	420	4,6	$8,5 \cdot 10^5$	128*
	Cannikin	3500	1800	800	18	—	182*

где q — энергия взрыва, кт; $a=15$ для аллювия и туфа, $a=12$ для риолита. Вычисленные значения r_0 отмечены в таблице звездочкой. В американской литературе по подземным ядерным взрывам приводят также другие зависимости радиуса котловой полости от энергии взрыва и свойств окружающей породы. Так, в [7] эта зависимость имеет вид

$$r_0 = C \cdot q^{1/3} / (\rho W)^{1/4}, \quad (10)$$

где $C=70$ для аллювия и туфа, а в [8]

$$r_0 = 21 \cdot q^{0,306} E^{0,514} / \rho^{0,244} \mu^{0,576} W^{0,161}, \quad (11)$$

где E — модуль Юнга; μ — модуль сдвига.

Свойства аллювия и туфа таковы, что для них формула (11) может быть представлена в виде

$$r_0 = 37,8 \cdot q^{0,306} / W^{0,161}. \quad (12)$$

Зависимости (9) — (12) приведены на рис. 3 наряду с результатами фактических измерений котловых полостей в аллювии и туфе. При построении кривых на рис. 3 по формулам (10) — (12) была принята средняя глубина заложения для взрывов (см. таблицу) $W=135 q^{1/3}$.

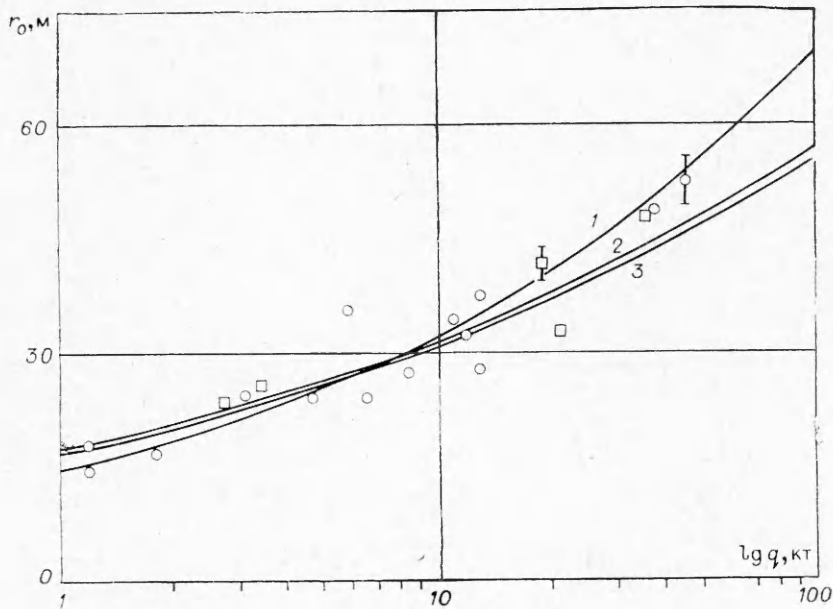


Рис. 3. Зависимость радиуса котловой полости от энергии взрыва, определенная по (9) (1), (10) (2) и по (11) (3).
 □ — туф; ○ — алюминий.

Видно, что в диапазоне энергий взрыва до 100 кт все зависимости практически с одинаковой точностью соответствуют экспериментальным точкам. Это дает возможность в дальнейшем при анализе натуральных данных пользоваться наиболее простой зависимостью (9). Однако в области больших энергий взрыва ($q > 100$ кт), (10) и (11), вероятно, будут давать более точные значения радиуса котловых полостей. Сопоставление натуральных данных по радиусам провальных воронок с модельными экспериментами приведены на рис. 4. Сплошные линии показывают результат модельных экспериментов, нижняя кривая соответствует зависимости (6) для радиуса провальной воронки, верхняя — для радиуса зоны проседания (7). Видно, что точки натуральных взрывов группируются в основном вокруг нижней кривой и соответствуют характеру изменения радиуса провальной воронки от глубины заложения в модели. Поэтому формулу для вычисления радиуса провальной воронки по известной энергии взрыва q и глубине заложения W можно получить, подставив зависимости (9) в выражение (6):

$$R = 0,58W / (\sqrt[3]{W/ag} - 0,77). \quad (13)$$

Среднее отклонение вычисленных по формуле (13) радиусов провальных воронок от их действительного значения составляет $\sigma = 1,2$. Здесь в расчет не принимались взрывы: Blanca, Cannikin и Discus Thrower. Точки этих взрывов также представлены на рис. 4, однако лежат они вблизи верхней кривой. Видно, что радиусы воронок этих взрывов соответствуют модельной зависимости (7) для радиусов зоны проседания. Это обстоятельство позволяет предположить, что в указанных трех экспериментах замерен именно радиус зоны проседания грунта. К тому же в американской литературе имеются сообщения, указывающие на наличие зоны проседания при образовании провальных воронок на Невадском полигоне. Так, в [9] отмечено наличие обширной зоны проседания вокруг провальных воронок, причем ее объем достигает иногда 50% объема самой воронки. В связи с этим в качестве максимально

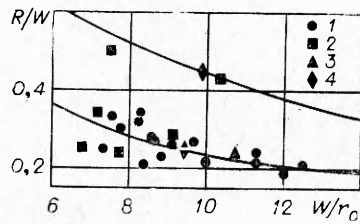


Рис. 4. Сравнение модельной зависимости радиуса провальной воронки от глубины заложения с натурными данными.
1 — аллювий; 2 — туф; 3 — риолит; 4 — лава.

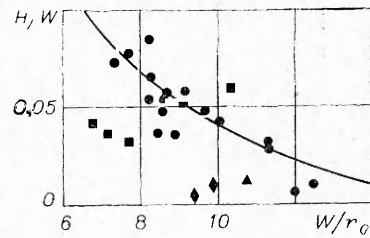


Рис. 5. Сравнение модельной зависимости глубины провальных воронок от глубины заложения с натурными данными (обозначения аналогичны рис. 3.)

возможного радиуса провальной воронки целесообразно использовать зависимость (6) в виде

$$R_0 = 5,9W / (W/aq^{1/3} + 3,48). \quad (14)$$

Рассмотрим результаты сопоставления натуральных данных с модельными экспериментами для глубины H и объема провальных воронок. Изменение H в модельных опытах описывается формулой (8) и показано на рис. 5 кривой, точки — данные из таблицы. По сравнению с предыдущей зависимостью разброс точек увеличился. Подставляя (9) в (8), получим зависимость глубины воронки от энергии взрыва и глубины заложения заряда:

$$H = 1,1 aq^{1/3} - 0,069W. \quad (15)$$

Среднее отношение вычисленных по этой формуле глубин к действительным значениям составляет $\sigma = 1,53$ по взрывам в аллювии и туфе.

Еще большее отклонение натуральных данных от результатов модельных исследований наблюдается при сопоставлении объемов провальных воронок. На рис. 6 показана зависимость относительного объема провальной воронки V_v/V_n , где V_n — объем котловой полости, от параметра W^0 . Сплошная линия соответствует результатам модельных опытов.

Значительный разброс данных натуральных опытов по отношению к этой линии можно объяснить изменением исходной плотности грунта в процессе образования провальной воронки. В модельных опытах, как показали измерения, плотность песка в зоне движения уменьшается и в среднем величина коэффициента разуплотнения $N = 1,03$. Изменения плотности грунта в трубе обрушения на полигоне [10] показали, что для 90% взрывов $0,96 \leq N \leq 1,1$. Так, например, при взрывах Dogmouse I и Суclamen объем провальной воронки на 30% превысил объем полости, т. е. произошло уплотнение грунта в процессе его обрушения. С другой стороны, объем провальной воронки при взрывах Stoaf и Chinchilla I составил соответственно 11 и 12% объема котловой полости, т. е. грунт разуплотнился. Легко показать, что незначительное изменение исходной плотности в процессе образования провальной воронки приводит к существенному изменению величины объема воронки в связи с вовлечением в движение большой массы грунта. Выразим объем провальной воронки V_v через объем по-

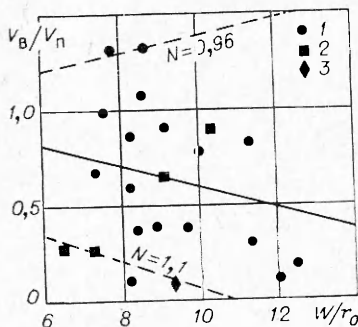


Рис. 6. Зависимость объема провальной воронки от глубины заложения.
1 — аллювий; 2 — туф; 3 — лава.

лости $V_{\text{п}}$, а также начальный $V_{\text{н}}$ и конечный $V_{\text{к}}$ объем грунта в трубе обрушения:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{п}} - \Delta V,$$

где $\Delta V = V_{\text{к}} - V_{\text{н}} = V_{\text{п}}(V_{\text{к}}/V_{\text{п}} - 1)$. Коэффициент разуплотнения $N = V_{\text{к}}/V_{\text{н}}$, тогда

$$V_{\text{в}} = V_{\text{п}} - (N - 1)V_{\text{н}}, \quad V_{\text{п}} = \frac{4}{3}\pi r_0^3, \quad V_{\text{н}} = \pi H_{\text{т}} R_{\text{т}}^2, \quad (16)$$

где $H_{\text{т}} = W - r_0$ — высота трубы обрушения; $R_{\text{т}}$ — радиус трубы обрушения. Примем $R_{\text{т}} = 1,2 r_0$, как установлено в модельных экспериментах. Разделив обе части выражения (16) на объем полости, получим

$$V_{\text{в}}/V_{\text{п}} = 1 - 1,08(N - 1)(W/r_0 - 1). \quad (17)$$

Из (17) видно, насколько чувствителен объем воронки к значению коэффициента разуплотнения. Так, при увеличении N от 1 до 1,1 V уменьшается почти в три раза — от $V_{\text{в}} = V_{\text{п}}$ до $V_{\text{в}} = 0,35 V_{\text{п}}$ (при $W^0 = 7$). На рис. 6 штриховыми линиями показаны зависимости объема воронки от параметра W/r_0 , вычисленные по формуле (17) при различных N . Как видно из рис. 6, практически все данные натуральных взрывов укладываются в этом диапазоне изменения N .

Таким образом, проведенный анализ натуральных данных показал сильное влияние коэффициента разуплотнения на глубину и объем провальных воронок. Радиус провальной воронки является более устойчивой характеристикой в этом отношении, поэтому при рассмотрении вопросов использования провальных воронок в промышленных целях необходимо наиболее точно прогнозировать величину коэффициента разуплотнения грунтов, в которых намечаются взрывы.

Провальная воронка рядного взрыва

При взрыве нескольких зарядов, расположенных в ряд, возможно образование провальной воронки в форме протяженной выемки. Глубину заложения зарядов в этом случае целесообразно выбрать из следующих соображений. Ранее было установлено, что провальная воронка образуется при $E^0 \leq E_0^0$. С другой стороны, требуется, чтобы объем провальной воронки был достаточно большим. Выполнение этих условий соответствует проведению взрывов в диапазоне $6 < W/r_0 < 7$. Выберем величину $W^0 = 6,5$. Из формул (10), (13), (15) следует, что провальная воронка от взрыва единичного заряда при $W^0 = 6,5$ имеет следующие параметры: $R = 0,33 W$, $H = 0,1 W$, $V = 0,79 V_{\text{п}}$ (при $N = 1,03$).

Для определения оптимального расстояния между зарядами, образующими провальную выемку, проведены модельные опыты, в которых три сферических объема воздуха в эластичных оболочках одинакового радиуса r_0 помещались на глубину $W = 6,5 r_0$ на расстоянии l друг от друга. На рис. 7 показана схема такого опыта.

Для наглядности вертикальные размеры воронки вдвое увеличены. Минимальное сечение выемки определяется полушириной B и глубиной δ перемычки между воронками. Поэтому в опытах при изменении l между центрами сферических полостей регистрировались δ и B . Результаты измерений показаны на рис. 8 в безразмерных координатах.

Из рис. 8 видно, что при изменении l/W от 0,6 до 0,7 глубина провальной выемки в районе расположения перемычки резко уменьшается и становится вдвое меньше глубины воронки в эпицентре. Полуширина

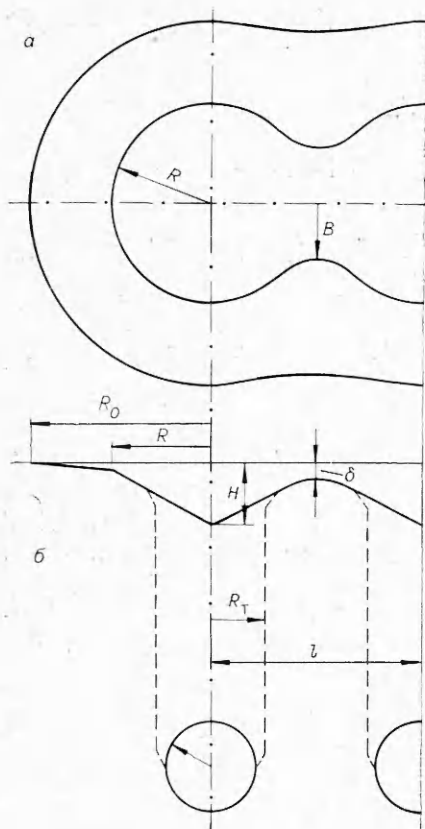


Рис. 7. Конфигурация траншеи и зоны обрушения грунта при образовании провальной воронки рядным взрывом.
а) вид сверху; б) разрез по оси выемки.

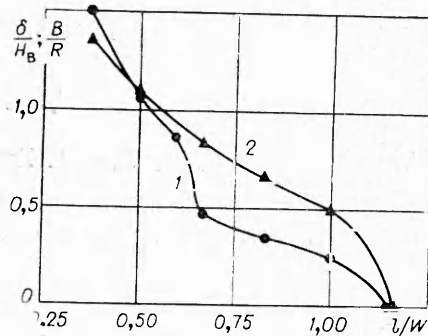


Рис. 8. Зависимость глубины (1) и полуширины (2) перемычки между воронками от расстояния между рядами.

B в этом месте уменьшается медленнее, чем глубина (кривая 2). Отношение $\delta/H_0 = 1$ выполняется, когда $l = 0,52 W$. Однако в этом случае ширина перемычки несколько больше радиуса провальной воронки. Радиус провальной воронки и полуширина перемычки равны при $l = 0,55 W$. Таким образом, оптимальное расстояние между зарядами, исходя из условия получения выемки с постоянным сечением, составляет $l = (0,525 \div 0,55) W$. Более того, зависимости размеров перемычки от расстояния между зарядами на рис. 8 дают возможность определять параметры заложения зарядов, исходя из необходимого сечения выемки.

Поступила в редакцию
18/1 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Адушкин, Л. М. Перник. ФГВ, 1972, 8, 4.
2. В. Н. Родионов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
3. D. L. Springer, R. L. Kinnaman. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61, 4.
4. Bulletin of the Seismological Society of America, 1972, 62, 6.
5. G. H. Higgins. Peaceful Nuclear Explosion Proceeding of a Panel Vienna, 1970.
6. C. W. Johnson, G. G. Higgins. Revs. Geophys., 1965, 3, 3.
7. C. R. Borchman, D. D. Rabb, R. D. McArthur. J. Geophys. Res., 1964, 69, 16.
8. P. J. Clozman. On J. Geophys. Res., 1969, 74, 15.
9. F. N. Houser. Bull. of the Seismological Society of America, 1969, 59, 6.
10. В. В. Хакала. Механика. Сб. перев., № 4, 1971.