

ВОРОНКИ НАЗЕМНЫХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВЗРЫВОВ

В. В. Адушкин, Б. Д. Христофоров

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, khrist@idg.chph.ras.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований воронок наземных химических и ядерных взрывов с сопоставимыми высотами центра тяжести и тротильными эквивалентами на грунтах разного типа. Использовались имеющиеся базы данных, которые применяются для прогноза экологических последствий природных и техногенных катастроф взрывного типа, разработки новых методов контроля и идентификации рассматриваемых явлений, их экспериментального и математического моделирования.

Ключевые слова: взрыв, воронка взрыва, базы данных, экология.

ВВЕДЕНИЕ

В 2004 г. исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося специалиста в области физики взрыва академика М. А. Садовского, который был научным руководителем многих программ, связанных с применением крупномасштабных взрывов [1]. Результаты проведенных исследований актуальны и в настоящее время в связи с участвовавшими природными и техногенными катастрофами [2]. Ниже представлены некоторые результаты исследований параметров воронок при крупномасштабных наземных взрывах, проведенных на различных испытательных полигонах, на основе разработанных баз данных [3, 4].

ВОРОНКИ ХИМИЧЕСКИХ И АТОМНЫХ ВЗРЫВОВ

Данные об условиях взрывов взрывчатых веществ (ВВ) и размерах воронок приведены в табл. 1. В базе данных [3] имеются геологические разрезы под эпицентрами взрывов, полученные на основе геологических изысканий и сейсмического каротажа. Грунты 1 и 2 относятся к мягким, соответственно с близким и глубоким залеганиями подстилающих скальных пород и грунтовых вод; грунты 3 — к выветренным трещиноватым горным породам плотностью $\approx 2800 \text{ кг/м}^3$ со скоростью продольных сейсмических волн $\approx 3 \text{ км/с}$ при скорости звука в отдельных блоках $\approx 5,5 \text{ км/с}$. Обычно для грунтов типа 2 и 3 воронки образованы целиком в пределах указанного слоя горных пород. Воронки крупных взрывов в грун-

те 1 захватывают и подстилающий скальный грунт.

Геологические разрезы под эпицентром взрыва № 4 массой 1000 т в условиях вечной мерзлоты в мягком грунте типа 1 и взрыва № 6 массой 1152 т в мягком грунте типа 2 с глубоким залеганием скальных пород и грунтовых вод показаны в табл. 2 и 3. Для условий взрыва № 6 геологический разрез до глубины 350 ÷ 400 м представляет собой пеструю толщу осадочных отложений. Далее залегает скальный грунт. Отложения представляют собой чередующиеся пласты плотных, цементированных глин, песков, песчаников, алевролитов и аргиллитов мелового возраста.

На рис. 1 и 2 показаны фотография и характерный профиль воронки наземного взрыва ВВ с тротильным эквивалентом $q = 5000 \text{ т}$, на рис. 3 — зависимости размеров воронок (объема V , м^3 ; радиуса R , м; глубины H , м) от параметра q в диапазоне $1 \leq q \leq 5000 \text{ т}$ для взрывов ВВ на мягких (1, 2) и твердых (3) грунтах (см. табл. 1). Не учтены значения H и V взрыва № 3, который был в воронке предыдущего. Статистической обработкой для степенных линий тренда получены эмпирические зависимости объемов, радиусов и глубин воронок от тротильного эквивалента взрыва для разных грунтов:

грунты 1, 2:

$$V = 26,72q^{0,999}, \quad r^2 = 0,963; \quad R = 3,36q^{0,336}, \\ r^2 = 0,979; \quad H = 1,78q^{0,316}, \quad r^2 = 0,907;$$

грунт 3:

$$V = 16,40q^{0,937}, \quad r^2 = 0,973; \quad R = 2,76q^{0,335}, \\ r^2 = 0,958; \quad H = 1,25q^{0,305}, \quad r^2 = 0,821; \quad (1)$$

Таблица 1

Параметры воронок наземных взрывов ВВ

№	П	q , т	Г	R , м	H , м	V , м ³	№	П	q , т	Г	R , м	H , м	V , м ³
5	2	5 000	1	55	21,4	120 000	52	2	50	3	10,8	3,4	600
6	7	1 152	2	34,2	12	23 500	56	2	20	1	7,5	4,5	380
7	2	1 013	2	34,4	14	25 900	55	2	15	3	6,6	2,28	140
4	1	1 000	1	26,7	16,5	—	16	3	12	1	8	—	—
1	3	901	1	35	12	11 600	17	2	10	1	6,75	3,25	209
3	2	501	3	21	14,1	7 791	18	2	10	1	7,53	3,5	308
2	2	500	3	20,9	7,9	5 540	19	2	10	1	7	4,75	304
27	2	500	3	22,5	7,5	6 000	20	2	10	1	8,28	5,1	394
31	2	330	1	22,2	9,4	—	33	2	10	2	7,3	4	223
24	2	300	3	25,8	9,6	4 470	34	2	10	2	8,8	4,4	—
12	2	280	2	26,7	14,1	13 100	35	2	10	2	7,35	4,53	—
22	2	250	1	19,3	8,5	5 020	36	2	10	2	7,28	3,9	278
28	2	200	3	13,5	3,5	1 250	37	2	10	2	7,02	3,03	218
30	2	155	1	17,2	8,9	—	38	2	10	2	7,3	3,2	203
29	2	150	2	21,3	10	6 170	42	2	10	2	7	3,95	—
10	2	100	2	16,5	11	3 150	43	2	10	3	6,85	3,25	190
11	2	100	2	17,5	10	3 200	45	2	10	3	5,1	1,9	85,5
13	2	100	2	16,2	9	3 565	46	7	10	2	6,8	2,5	173
14	2	100	2	17	10,8	4 325	47	2	10	2	7	3,2	—
15	2	100	2	17,4	10,7	4 430	51	2	10	3	4,9	—	—
21	2	100	1	15,2	7,2	2 140	58	2	10	1	7,25	4,28	—
23	2	100	1	18,2	7,6	4 200	49	2	5	3	5	2,5	—
25	7	100	2	14,2	6,62	1 820	40	2	1	2	3,4	1,55	—
26	2	100	2	15,2	7	2 600	41	2	1	2	2,75	1,3	—
32	2	100	1	18	6,6	3 440	44	2	1	3	3	1,3	20,7
57	2	80	1	16	7,4	—	48	2	1	2	3,5	1,5	—
39	2	50	1	11,9	5,5	940	53	2	1	3	3,65	0,86	12
50	2	50	3	10	3,85	—	54	2	1	3	3	0,96	12,5

Примечание. R , H , V — радиус, глубина и объем воронки, отсчитанные от свободной поверхности; № — номер взрыва в базе данных [3]; q — тротильный эквивалент взрыва; П — код полигона (2, 7 — площадки Семипалатинского полигона); Г — код грунта.

Таблица 2
Геологический разрез под эпицентром взрыва № 4 (табл. 1)

Глубина, м	Порода	Плотность, т/м ³	c, км/с
0 ÷ 2	Дресвяно-щебенистая	1,75	—
2 ÷ 6	Галька с гравием	1,62	2,92
6 ÷ 7	Галька с гравием	1,85	1,0 ÷ 1,1
7 ÷ 9	Супесь с галькой и гравием	1,9	3,27
9 ÷ 13	Песок	—	—
Ниже 13	Супесь с галькой и гравием	—	—

Примечание. c — скорость продольных сейсмических волн.

Таблица 3
Геологический разрез под эпицентром взрыва № 6 (табл. 1)

Глубина, м	Порода	Плотность, т/м ³	c, км/с
0 ÷ 3	Пески, супески	1,6	0,2 ÷ 0,4
3 ÷ 20	Песчаники	1,7 ÷ 1,8	0,7
20 ÷ 50	Суглинки, глины с включением песка	1,8 ÷ 1,9	1,0 ÷ 1,1
50 ÷ 400	Глины, песчаники	1,9 ÷ 2,0	2,0 ÷ 2,1
Ниже 400	Сланцы	—	4,5



Рис. 1. Фотография наземного взрыва ВВ с тротильным эквивалентом 5 000 т

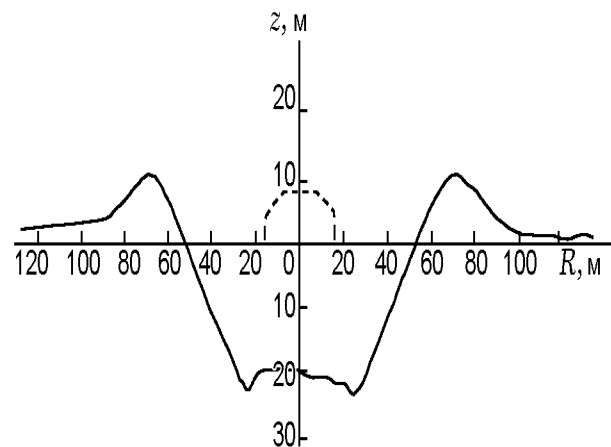


Рис. 2. Характерный профиль воронки наземного взрыва ВВ с тротильным эквивалентом 5 000 т:

радиус воронки по свободной поверхности 55 м, радиус воронки по навалу 70 м, радиус навала грунта 360 м, радиус разлета кусков породы 1 500 м, глубина воронки от свободной поверхности 21,4 м, объем воронки по свободной поверхности 120 000 м³, штриховая линия — заряд

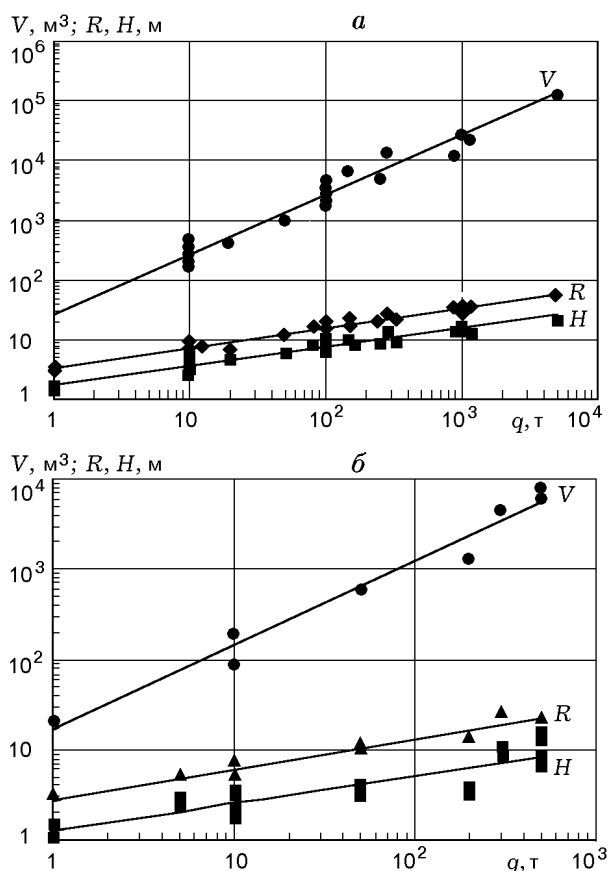


Рис. 3. Зависимости объема, радиуса и глубины воронок от тротилового эквивалента наземных взрывов:

a — на мягких грунтах типа 1 и 2, *б* — на твердых грунтах типа 3

грунты 1, 2, 3:

$$V = 19,37q^{1,021}, \quad r^2 = 0,946; \quad R = 3,21q^{0,336}, \\ r^2 = 0,961; \quad H = 1,49q^{0,332}, \quad r^2 = 0,845.$$

Здесь r^2 — статистическая функция, определяющая достоверность аппроксимации экспериментальных данных эмпирическими формулами ($r^2 = 1$ при полном их совпадении). Хуже всего согласуются с линиями тренда данные по глубине воронок. Вид формул также зависит от диапазона значений q . В мягких грунтах 1 и 2 при $1 \leq q \leq 100$ т

$$V = 18,86q^{1,104}, \quad r^2 = 0,95; \quad R = 3,20q^{0,355}, \\ r^2 = 0,973; \quad H = 1,55q^{0,355}, \quad r^2 = 0,893.$$

Данные американских исследований для контактных взрывов ВВ ($q = 1 \div 18$ т) в мягких

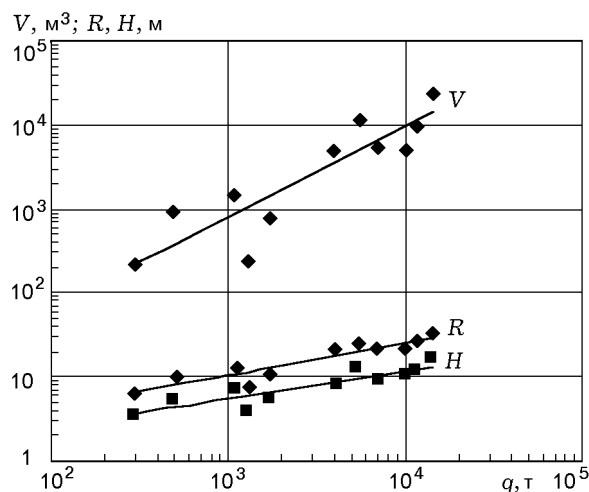


Рис. 4. Зависимости объема, радиуса и глубины воронок от тротилового эквивалента приземных ядерных взрывов

грунтах Невадского полигона представлены зависимостями [5]

$$V = 26q; \quad R = 3,6q^{1/3}; \quad H = 1,6q^{1/3}, \quad (2)$$

которые близки к приведенным выше формулам (1).

Ниже приведены эмпирические зависимости параметров воронок от тротилового эквивалента для 11 ядерных и 53 химических взрывов на различных площадках Семипалатинского полигона. По данным [3, 4] отобраны ядерные взрывы (рис. 4), сопоставимые по высотам центра тяжести и тротиловым эквивалентам со взрывами ВВ (всего было проведено 32 приземных взрыва).

Ядерные взрывы с тротиловым эквивалентом $q = 300 \div 14300$ т на высотах $0,5 \div 2,1$ м ($H/q^{1/3} = 0,02 \div 0,2$ м/т^{1/3}):

$$V = 0,449q^{1,084}, \quad r^2 = 0,808, \\ R = 0,707q^{0,389}, \quad r^2 = 0,855, \quad (3) \\ H = 0,563q^{0,327}, \quad r^2 = 0,754.$$

Взрывы ВВ с тротиловым эквивалентом $q = 1 \div 5000$ т:

$$V = 18,57q^{1,038}, \quad r^2 = 0,946, \\ R = 3,17q^{0,340}, \quad r^2 = 0,961, \quad (4) \\ H = 1,49q^{0,331}, \quad r^2 = 0,828.$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность аппроксимации (r^2) степенными функциями зависимостей параметров воронок от тротилового эквивалента существенно меньше при ядерных взрывах, чем при химических. Коэффициенты в выражениях для объема, радиуса и глубины соответственно в 41, 4,5 и 2,7 раза меньше для ядерных взрывов, чем для химических. С уменьшением приведенной высоты ядерных взрывов $H/q^{1/3}$ приведенные размеры воронок возрастают и приближаются при заглублинии заряда к характерным для взрывов ВВ, оставаясь при этом значительно меньше. Полученная по данным испытаний на Невадском полигоне [5] зависимость приведенного объема воронок ядерного взрыва от тротилового эквивалента в диапазоне $-0,1 < H/q^{1/3} < 2$ (при изменении q от 500 до 1 200 т и значений H от высоты 1,067 м до глубины 20,4 м) имеет вид [5]

$$V/q = -5,53(H/q^{1/3})^2 + 39,83H/q^{1/3} + 5,26. \quad (5)$$

При $H = 0$ $V/q = 5,26$ м³/т, а для полузаглубленного заряда литого тротила $V/q = 30,8$ м³/т [5].

Для исследованных взрывов зависимости параметров воронок от тротилового эквивалента в пределах погрешности измерений подчиняются принципу геометрического и энергетического подобия. Влияния силы тяжести, которое может уменьшать диаметр воронок из-за выпадения выброшенного грунта обратно и при котором $R \sim q^{1/3,4}$ согласно [5] и $R \sim q^{1/3,5}$ согласно [6], не отмечено.

Приведенные данные позволяют определять влияние объемной концентрации энергии в источнике на механическое действие и экологические последствия взрыва, а также могут применяться в работах, связанных с безопасностью населения и различных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф, включая определение критериев, методов и систем защиты потенциально опасных объектов.

ВЫВОДЫ

1. Проведен статистический анализ экспериментальных данных о размерах воронок химических и ядерных наземных взрывов с сопоставимыми высотами центра тяжести и тротиловыми эквивалентами $q = 1 \div 5\,000$ и $300 \div 14\,300$ т соответственно.

2. Показано, что коэффициенты в зависимостях объема, радиуса и глубины воронок от тротилового эквивалента в 41; 4,5 и 2,7 раза меньше для ядерных взрывов, чем для химических. С увеличением глубины взрывов различия в механическом действии ядерных и химических взрывов уменьшаются.

3. Зависимости параметров воронок от тротилового эквивалента при крупномасштабных наземных взрывах согласуются с принципами энергетического подобия и в пределах погрешности измерений не зависят от силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М. А. Геофизика и физика взрыва / Под ред. В. В. Адушкина. М.: Наука, 1999.
2. Адушкин В. В., Гарнов В. В., Христофоров Б. Д. Оценка параметров аварийного взрыва путем сравнения с опытными взрывами // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 4. С. 28–32.
3. Адушкин В. В., Христофоров Б. Д. База данных по ядерным и крупным химическим взрывам с выбросом в атмосферу. Регистр. свид-во № 2863 от 12.12.1997. Зарегистрирована за № 0229703124 в Государственном регистре; База данных «Природные и техногенные катастрофические явления взрывного типа с выбросом продуктов в атмосферу». Регистр. свид-во № 7568 от 29.12.2001. Зарегистрирована за № 0220108099 в Государственном регистре.
4. Ядерные испытания СССР. Т. 2./ Под ред. В. Н. Михайлова, В. В. Адушкина, И. А. Андрушина и др. М., 1997. С. 320. (Министерство РФ по атомной энергии).
5. Vortman L. J. Craters from surface explosions and scaling laws / J. Geophys. Res. 1968. V. 73, № 14. P. 4621–4631.
6. Ivanov B. A. The effect of gravity on crater formation: thickness of ejecta and concentric basins // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. 1976. P. 2947–2965.

