

При возрастании магнитного поля ширина зоны устойчивости также возрастает. Это указывает на возможность полной стабилизации пламени для «медленного» горения в продольном магнитном поле при достаточно больших значениях поля. Аналогичный результат получим при рассмотрении разрывного фронта, где критерием устойчивости будет неравенство $N_{x1} > V\bar{\alpha} + \frac{1}{2}$. Отметим, что случай «медленного горения» не является предельным к обычной газодинамике.

Поступила в редакцию
24/VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. С. К. Асланов, ФГВ, 1965, 1, 3.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред, М., ГИТТЛ, 1954.
3. С. И. Сыроватский. ЖЭТФ, 1954, 27, 1.

УДК 550.348.425+624.131.551

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛЬНЫХ ВОРОНОК

B. B. Адушкин, L. M. Перник
(Москва)

Опыт проведения крупных подземных взрывов [1] показывает, что в слабосвязанных грунтах при глубине заложения заряда больше оптимальной, т. е. свыше $40 \div 50 \text{ м}/\text{кт}^{1/3}$ (кт — килотонн), и вплоть до приведенной глубины $200 \text{ м}/\text{кт}^{1/3,4}$ в подавляющем большинстве случаев происходит оседание поверхности с образованием воронки. Воронки, которые образуются в этой области глубин заложения в результате обрушения грунта в камуфлетную полость, обычно называют провальными. Факт образования провальных воронок зависит главным образом от прочностных характеристик грунта, степени разрыхления при обрушении, а также от геологических особенностей массива, его трещиноватости и неоднородности. При фиксированном типе грунта возможность образования провальной воронки определяется масштабом взрыва. Так, например, в аллювии [1] взрывы зарядов весом около 100 кг образуют провальные воронки лишь до глубины заложения примерно $100 \text{ м}/\text{кт}^{1/3,4}$, тогда как при взрывах мощностью порядка 1 кт эта область расширяется до $200 \text{ м}/\text{кт}^{1/3,4}$. Т. е. при увеличении мощности взрыва на четыре порядка высота столба обрушения в аллювии возрастает от 6 до 14 радиусов камуфлетной полости. В туфе взрывы порядка 1 кт вызывают образование столба обрушения высотой $5 \div 6$ радиусов полости, и при увеличении мощности, как правило, образуются провальные воронки, например, взрывы «Бланка», «Симмарон» и «Хузик» [2], у которых глубина заложения достигала соответственно 6,8; 7,2 и 9,3 радиуса полости. В скальных породах при мощности взрыва порядка 1 кт высота столба обрушения достигает $3 \div 5$ радиусов полости, и провальная воронка не образуется. Однако наблюдения показывают, что при увеличении масштаба взрыва отношение высоты столба обрушения к радиусу полости растет, следовательно, и в скальной породе следует ожидать образования провальных воронок.

Целью данной работы является выяснение общих закономерностей процесса образования провальных воронок. Методом моделирования [3] исследован характер движения грунта и установлены размеры воронок в такой области глубин заложения заряда, которая располагается между взрывами на выброс и предельной глубиной заложения. Определены критические значения параметров взрыва (глубина заложения, радиус и энергия газа полости), при которых наблюдается переход от воронок выброса к воронкам провального типа. Эксперименты показали, что в этой области движение грунта имеет сложный характер: часть грунта вблизи полости обрушается и полость как бы «всплывает», грунт же, расположавшийся вблизи свободной поверхности, оказывается выброшенным. Прослежена трансформация формы воронки. Интересно, что в некоторых случаях радиус воронки характеризуется двумя значениями на первоначальном уровне поверхности грунта. Получены зависимости высоты подъема купола и размеров воронок (радиуса, глубины и объема) от энергии газа в полости и отношения глубины заложения к радиусу полости. Измерены времена прорыва газа из полости в атмосферу и времена обрушения грунта в полость.

Сопоставление с результатами реальных взрывов показало, что зависимости, полученные в модельных опытах, следует рассматривать в качестве крайней оценки механического действия (размеры воронки и параметры разлета или обрушения грунта) при взрывах в слабосвязанных грунтах или достаточно крупного масштаба, когда свойства разрушенного волной грунта находятся в соответствии с условиями модели (незначительное сцепление, равный коэффициент внутреннего трения). Из-за специфики методики исследования вопрос о том, при каком масштабе взрыва и в какой среде происходит оседание поверхности, не рассматривается. Не исследовано влияние физико-механических свойств обрушающегося грунта. Представляется, что свойства грунта могут существенно повлиять как на размеры провальной воронки, так и на времена прорыва газа и обрушения грунта.

Постановка эксперимента

Примененный в работе метод моделирования [3, 4] содержит ряд целесообразных упрощений и позволяет проводить исследование процесса образования воронок при подземных взрывах в таких условиях, при которых безразмерные параметры, определяющие этот процесс, совпадают с натурными. Так, при моделировании считается завершенной первоначальная стадия взрыва, в течение которой образуется камуфлетная полость, и волна сжатия разрушает окружающую среду. Поэтому в модели размер камуфлетной полости, а следовательно, давление и энергия продуктов взрыва в конце камуфлетной стадии выступают в качестве начальных параметров. Исключение из рассмотрения волны сжатия означает, что, во-первых, отколы не рассматриваются и учитываются лишь в том смысле, что откол ведет к дополнительному разрушению среды, и, во-вторых, не учитывается кинетическая энергия, приобретаемая грунтом при прохождении волны сжатия. В результате модельные эксперименты проводятся следующим образом.

Внутри массива сухого песка на глубине W в эластичной оболочке помещается сферический объем воздуха, имеющий радиус r_0 и давление p . Песок является моделью разрушенной среды, сферический объем имитирует камуфлетную полость, заполненную газообразными продуктами взрыва. Атмосфера над поверхностью песка вакуумируется.

При такой постановке эксперимента система определяющих параметров будет включать свойства среды, разрушенной волной сжатия: ρ — плотность, k — коэффициент внутреннего трения, σ — сцепление; характеристики источника взрыва и воронки: W — глубина заложения, r_0 — радиус полости, γ — показатель адиабаты, p — давление газа в полости, R — радиус воронки, а также g — ускорение силы тяжести и p_0 — атмосферное давление над поверхностью грунта.

В соответствии с теорией подобия в общем случае можно записать зависимость показателя выброса n от безразмерных комбинаций указанных параметров в виде:

$$n = F_1 \left(\frac{p}{p_0}; \frac{p}{\rho g W}; \frac{\rho}{\sigma}; \frac{W}{r_0}; \gamma; k \right); n = \frac{R}{W}. \quad (1)$$

Вакуумирование атмосферы над свободной поверхностью и применение сухого песка, у которого величина $\sigma = 10^{-4}$ кг/см² и $k = 0,78$ [5] приводит к тому, что отношение действующих в модели сил по порядку величины равно:

$$\frac{p}{p_0} \sim 10^2; \frac{p}{\rho g W} \sim 10; \frac{\rho g W}{p_0} \sim 10; \frac{\sigma}{p_0} \sim 10^{-1}.$$

Это соответствует ситуации при реальных взрывах на выброс, масштаб которых характеризуется величиной W в несколько десятков метров и когда наблюдается достаточное измельчение грунта волной сжатия, так что его сцепление можно пренебречь по сравнению с атмосферным давлением $p_0 = 1$ кг/см². В таком случае безразмерные комбинации, определяющие процесс выброса, в модели и натуре совпадают.

Чтобы исследовать экспериментально зависимость (1), являющуюся функцией нескольких переменных, такие параметры, как γ и k , не менялись в опытах; параметр, содержащий σ , опущен из рассмотрения, поскольку $\sigma \sim 0,1 p_0$. Противодействующие выбросу вес грунта и давление атмосферы суммируются [4]. Вводя вместо p в качестве определяющего параметра энергию газа в полости $E = pV_0/(\gamma - 1)$, где $V_0 = 4\pi r_0^3 / 3$, можно представить зависимость (1) в виде функции двух переменных:

$$n = F_2 \left(E^0; \frac{W}{r_0} \right),$$

где

$$E^0 = \frac{E}{(\rho g W + p_0) W^3}. \quad (2)$$

Для исследования функции (2) проведено две серии экспериментов при фиксированных отношениях $W/r_0 = 2,4$ и $4,8$ в широком диапазоне изменения параметра E^0 .

Движение грунта и прорыв газа из полости

Опыты показали, что оптимальная глубина заложения, при которой образуется воронка с наибольшим объемом выброса, соответствует величине параметра $E^0 = 4 \div 8$ ($n = 1,1 \div 1,3$). При постепенном уменьшении E^0 наблюдается переход от воронок выброса к воронкам провального типа. На рис. 1, а приведены зависимости высоты подъема поверхности грунта в эпицентре от времени для отношения $\frac{W}{r_0} = 4,8$. Кривая 1 является типичной для области выброса и соответствует оптимальной глубине заложения. Наблюдается монотонное нарастание высоты подъема

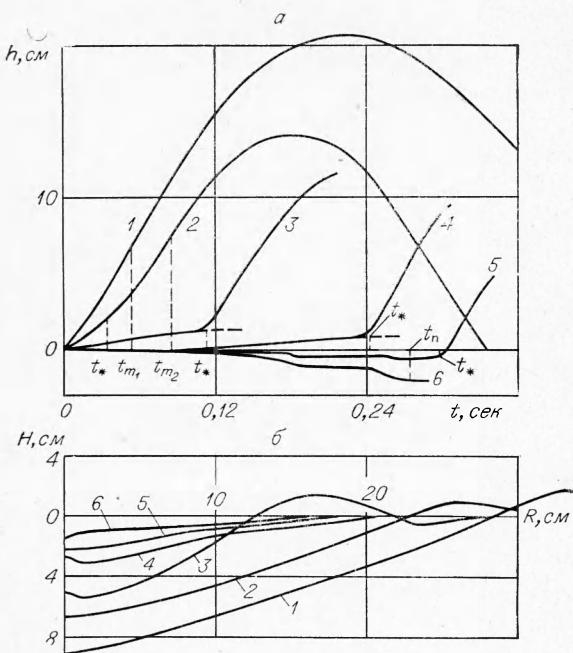


Рис. 1. Движение эпицентральной части грунта в зависимости от времени (а) и соответствующие профили воронок (б) для различных значений параметра E^0 .

1 — 4; 2 — 2,3; 3 — 1,2; 4 — 0,7; 5 — 0,5; 6 — 0,3.

грунт. После этого верхний контур купола рассеивается, причем скорость движения отдельных частей купола может на порядок превосходить скорость подъема до прорыва. Прорыв газа не всегда происходит через эпицентр и зачастую симметричное развитие купола нарушается. На рис. 2 приведена фотография купола, наблюдавшегося в одном из таких опытов. Можно выделить две характерные высоты подъема грунта: высоту h_* , на которую поднимается основная масса грунта за время t_* , и максимальную высоту подъема h_m незначительной части грунта после прорыва газа из полости.

При дальнейшем уменьшении E^0 (например, $E^0 = 0,5$) подъема поверхности грунта уже не наблюдается. Тем не менее через время t_* происходит прорыв газа, но внутри образовавшейся воронки. Кинокадры такого опыта, представляющие вертикальный разрез по оси симметрии, приведены на рис. 3. Внизу на фото виден контур исходной полости, горизонтальные линии — слои окрашенного песка. Наблюдаются сложная картина движения внутри массива: песок обрушается в полость, весь массив начинает проседать и полость как бы «всплывает». Этот процесс продолжается до тех пор, пока толщина слоя грунта над полостью не уменьшится до такой степени, что энергии газа всплывающей полости будет достаточно для прорыва в атмосферу через время t_* .

купола до максимальной величины h_m и последующее ее уменьшение в поле силы тяжести. Скорость подъема максимальна в момент времени t_m . Кривые 2—5 показывают движение эпицентра поверхности грунта в переходной области. Видно, что характер подъема грунта качественно меняется — кривая $h=f(t)$ имеет перегиб в момент времени t_* . Пока E^0 достаточно велико (например, $E^0=2,3$), купол после момента t_* сохраняет четкое очертание и наибольшая скорость его подъема достигается при $t_m > t_*$. При уменьшении E^0 (кривые 3 и 4) фаза вторичного ускорения все более соответствует моменту прорыва газа из полости, который разрывает верхний тонкий слой купола и увлекает за собой

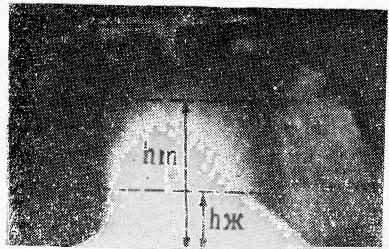


Рис. 2. Купол после прорыва газов.

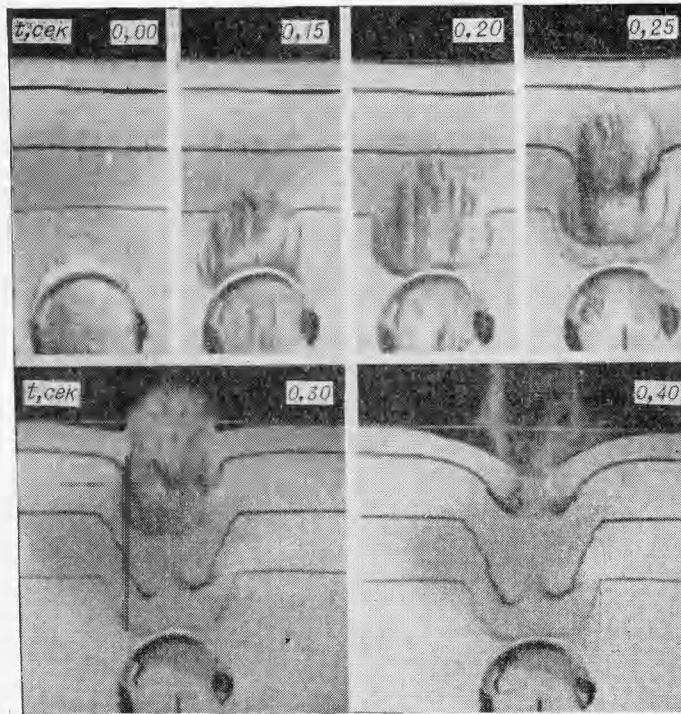


Рис. 3. Кинокадры всплытия полости при $E^0=0,5$ и $W/r_0=4,8$.

Из сопоставления кривых 2—5 на рис. 1, следует, что при уменьшении E^0 время прорыва t_* возрастает и полость «всплывает» все ближе к поверхности. Кривая 5 соответствует опыту с наименьшей энергией, при которой еще наблюдается прорыв газа. При дальнейшем уменьшении энергии в полости прорыв газа в атмосферу отсутствует (кривая 6 на рис. 1, а). Это область воронок проседания. В этом случае время всплытия полости достаточно велико и из-за фильтрации в массиве прорыв газа отсутствует. В подобных случаях может быть измерено только время проседания t_p песка в полость. Причем песок проседает неравномерно, рывками. Такой характер проседания является типичным и, по-видимому, в его основе лежит явление арочного эффекта.

На рис. 4 схематически показаны основные зоны движения грунта при образовании воронок в отмеченных выше трех областях: при выбросе, в переходной области и при проседании. Границы выделенных зон определены при помощи слоев окрашенного песка. Стрелками показано направление движения грунта в процессе образования воронки. При выбросе выделяются две основные зоны: выталкивание конуса грунта газом и последующее оползание крутых бортов. В переходной области можно выделить три зоны: 1 — нижняя часть грунта обрушается, верхняя — выбрасывается (эта зона смещений грунта порядка размера полости), кривая 2 ограничивает зоны проседания грунта порядка 0,1 радиуса полости, 3 — область «всплытия» полости. В области проседания можно отметить те же зоны, однако весь грунт движется только к полости.

Отметим некоторые зависимости высоты подъема грунта h и характерных моментов времени t_m , t_* и t_p от глубины заложения W , энергии

газа в полости E и отношения W/r_0 . Введем безразмерные параметры:

$$h^0 = \frac{h}{W}; \quad W^0 = \frac{W(\rho g W + p_0)^{1/3}}{E^{1/3}}; \quad t_0 = \frac{t}{W} \left(g W + \frac{p_0}{\rho} \right)^{1/2}.$$

На рис. 5 приведена зависимость h^0 от W^0 . В области выброса максимальная высота подъема купола (кривая 1) не зависит от величины отношения W/r_0 . При $W^0 \geq W_*^0$ наступает переходная область (на кривых $h=f(t)$ появляется перегиб в момент времени t_*). На рис. 5 пока-

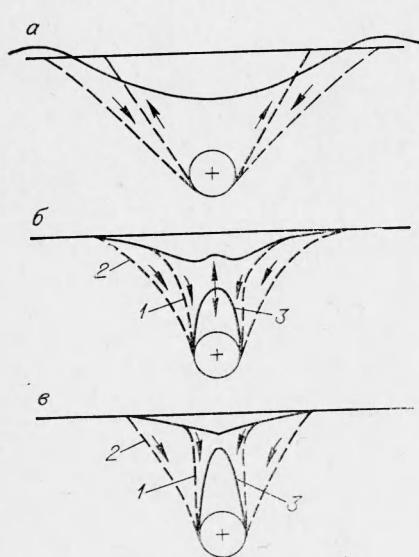


Рис. 4. Зоны движения грунта при образовании воронок.
а — область выброса; б — переходная область; в — область проседания.

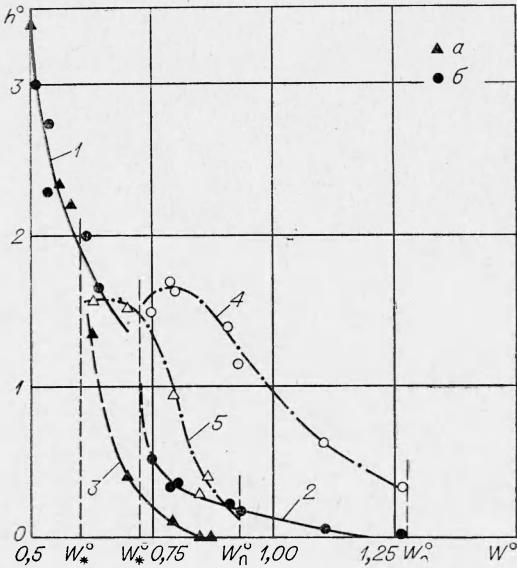


Рис. 5. Зависимость высоты подъема грунта от глубины заложения.
а — $W/r_0=2,4$; б — $W/r_0=4,8$.

заны результаты измерений двух характерных высот: подъем основной массы грунта к моменту t_* (черные точки, кривые 2 и 3 соответственно для $W/r_0=2,4$ и $4,8$) и максимальной высоты подъема в результате прорыва газов из полости (светлые точки, кривые 4 и 5 для $W/r_0=2,4$ и $4,8$). Видно, что иногда величина h_m в переходной области может пре- восходить высоту подъема грунта в области выброса. Кроме того, из результатов измерений следует, что высота подъема купола и значения границ переходной области W_* и W_n зависят от отношения W/r_0 . Так, при $W/r_0=2,4$ $W_*=0,6$ (соответственно $E_*=4,7$) и при $W/r_0=4,8$ $W_*=0,72$ ($E_*=2,6$). При $W^0 > W_n$ отсутствует какой-либо выброс грунта, это область проседания. Причем в случае $W/r_0=2,4$ $W_n=0,93$ ($E_n=1,2$), при $W/r_0=4,8$ $W_n=1,28$ ($E_n=0,48$).

Зависимости t_m , t_* , t_n от величины E^0 приведены на рис. 6. В области выброса при $E \geq E_*$ по величинам t_m построена кривая 1. Приведены также результаты измерений t_m при $W/r_0=1,6$ и $3,2$. Видно, что время достижения максимальной скорости не зависит от отношения W/r_0 и определяется только величиной параметра E^0 . Экспериментальные данные можно описать эмпирической формулой:

$$t_m = 1,12 - 0,46 \lg E \text{ при } E \geq E_*. \quad (3)$$

Времена достижения максимальной скорости подъема купола при таких взрывах, как «Седан» и «Скутер» [2], соответствуют полученной зависимости (см. рис. 6).

По результатам измерений времен t_* в переходной области $E_\pi^0 \leq E^0 \leq E_*^0$ проведены кривые 2 и 3 соответственно для $W/r_0=4,8$ (при этом $E_*^0=2,6$ и $E_\pi^0=0,48$) и для $W/r_0=2,4$ ($E_*^0=4,7$ и $E_\pi^0=1,2$). Отличительной особенностью развития процесса выброса в этой области является «взрыв» купола: так выглядит прорыв газа из полости в момент

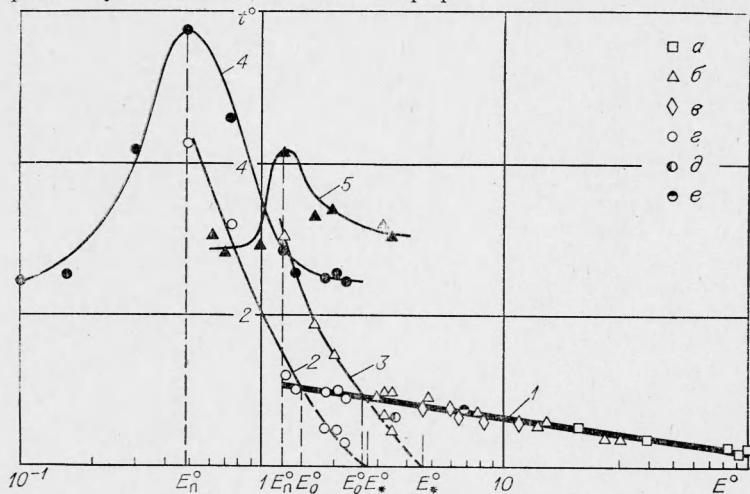


Рис. 6. Зависимость времени прорыва газов из полости (1, 2, 3)

и времени проседания (4, 5) от параметра E^0 .

$a - W/r_0 = 1,6; b - W/r_0 = 2,4; c - W/r_0 = 3,2; d - W/r_0 = 4,8; e -$ взрыв «Седан»;

времени t_* на фоне медленно растущего купола. При некотором значении $E^0=E_0^0$ времена t_* совпадают с t_m , т. е. при $E^0>E_0^0$, спустя время t_* , купол вновь начинает двигаться с ускорением, достигает к t_m максимальной скорости и лишь затем разрушается прорывающимся газом. (Такое развитие выброса в модели показывает, что при соответствующем натурном взрыве в стадии газового ускорения могут иметь место две фазы ускорения.) При $E^0=E_0^0$ «взрыв» купола происходит без предварительного ускорения, после некоторого снижения скорости подъема. Время t_* при этом в точности соответствует моменту прорыва газа. Величина E_0^0 , при которой меняется характер «взрыва» купола, зависит от отношения W/r_0 и с увеличением W/r_0 уменьшается: при $W/r_0=2,4$ $E_0^0=2,6$, при $W/r_0=4,8$ $E_0^0=1,4$.

Опыт проведения крупномасштабных взрывов, например «Седан» и «Скутер», показывает, что момент достижения куполом максимальной скорости соответствует времени выхода продуктов взрыва. В модельных опытах во всех случаях после максимума скорости купол также теряет четкое очертание, что свидетельствует о прорыве газа. Поэтому можно полагать, что кривая 1 и верхняя часть кривых 2 и 3 на рис. 6 представляют зависимость времени прорыва газа из полости в атмосферу от энергии и глубины заложения, а при $E^0<E_0^0$ и от отношения W/r_0 .

Величина E_0^0 , ниже которой время прорыва резко возрастает, обладает еще одной интересной особенностью. Специальные опыты с окрашенным слоем песка вокруг полости (толщина слоя $\sim 0,1 r_0$) показа-

ли, что при $E^0 > E_0^*$ окрашенные песчинки обнаруживались после выброса на дневной поверхности в воронке, при $E^0 < E_0^*$ окрашенных песчинок на поверхности уже не появлялось. Эти факты свидетельствуют о том, что при $E^0 < E_0^*$ выброс происходит после того, как часть грунта обрушится в полость. Поэтому параметр E_0^* можно принять за фактическую границу между процессами выброса и проседания.

Зависимость времени проседания t_p от E^0 на рис. 6 показывают кривые 4 и 5 соответственно для $W/r_0 = 4,8$ и $2,4$. При $E^0 = E_p^*$ полость «всплывает» почти до свободной поверхности, и временные характеристики процесса t_* и t_p становятся наибольшими. При $E^0 < E_p^*$ происходит только проседание песка и время t_p убывает с уменьшением E^0 стремясь к постоянному значению.

Размеры воронки

Изменение профиля воронки в зависимости от величины E^0 показано на рис. 1, б для отношения $W/r_0 = 4,8$. Профиль 1 соответствует воронке выброса при оптимальной глубине заложения $/n = 1,1/$. Радиус раз渲ла основной массы выброшенного грунта составляет в среднем $2,5 R$. В переходной области при уменьшении E^0 наблюдается постепенный переход от воронки выброса к воронке проседания (рис. 1, 2—5). Радиус воронки уменьшается, существенно сокращается радиус раз渲ла грунта (например, до $1,5 R$ при $E^0 = 2,3$). При некоторых значениях E^0 (например, при $E^0 = 1,2$) воронка и навал располагаются внутри зоны просевшего грунта и на первоначальном уровне свободной поверхности радиус воронки имеет два значения: радиусы воронки выброса и воронки проседания. В центре воронки из-за повторного прорыва газа образуется возвышение, составляющее до 20% глубины воронки. Отметим, что в подобных случаях навал редко получается симметричным и небольшая часть поверхности на краю воронки оказывается свободной от выброшенного грунта.

При дальнейшем уменьшении E^0 навал исчезает (см. рис. 1, 4, 5) и воронка конусообразной формы располагается внутри просевшей зоны, радиус которой также уменьшился. Откос внутренней воронки более крутой. В области проседания внутренняя воронка исчезает (профиль 6). В центре воронки появляется дополнительное углубление.

На рис. 7 представлены результаты измерений относительного радиуса R/W (кривые 1 и 2) и глубины H/W воронок (кривая 3) в зависимости от E^0 . В области выброса ($E^0 \geq E_*^*$) R и H воронки не зависят от величины отношения W/r_0 и определяются только величиной E^0 . Для показателя выброса в этой области была получена зависимость [4]:

$$n = 0,5 + 0,9 \lg E^0 \text{ при } E^0 \geq E_*^*. \quad (4)$$

При $E^0 < E_*^*$ будем характеризовать радиус воронки двумя размерами: радиусом зоны проседания (кривая 2) и радиусом внутренней воронки (кривая 1). В случае, когда у внутренней воронки навал не образуется, за эффективный радиус принята величина $R_{\text{эфф}} = (3V_b/\pi H)^{1/2}$, полагая, что воронка имеет форму конуса, V_b — полный объем воронки. Видно, что при $E^0 < E_*^*$ размеры воронок как внутренних, так и проседания, а также граничные значения E_*^* и E_p^* зависят не только от E^0 , но и от величины отношения W/r_0 . Этот факт отмечался ранее для кинематических параметров движения купола и является характерной особенностью.

ностьюю переходной области ($E_{\text{п}} \leq E^0 \leq E^*$). На рис. 7 эта область показана для $W/r_0 = 2,4$ (I) и для $W/r_0 = 4,8$ (II).

В области проседания ($E^0 < E^*$), как показывает опыт, размеры воронки не зависят от параметра E^0 и определяются только величиной отношения W/r_0 . Так, для $W/r_0 = 2,4$ $R_{\text{эф}}/W = 0,74$, для $W/r_0 = 4,8$ $R_{\text{эф}}/W = 0,41$. Аналогичная зависимость получена и для радиуса зоны проседания, однако величина этой зоны в $1,5 \div 2$ раза превосходит $R_{\text{эф}}$. При $E^0 < E_{\text{п}}$ было проведено измерение размеров воронок в зависимости от отношения W/r_0 . В этих опытах давление в полости незначительно превышало давление атмосферы над поверхностью грунта. Результаты измерений представлены на рис. 8. Кривая 1 показывает изменение эффективного радиуса воронки. Зависимость $R_{\text{эф}}/W$ от W/r_0 может быть представлена эмпирической формулой

$$\frac{R_{\text{эф}}}{W} = \frac{0,58}{\sqrt{W/r_0 - 0,77}}$$

при $15 \geq W/r_0 \geq 1$. (5)

Кривые 2—4 показывают соответственно изменение радиуса зоны проседания, глубины и объема воронки $V_{\text{в}}$ в зависимости от отношения W/r_0 . Видно, что при увеличении W/r_0 все размеры воронки уменьшаются, особенно сильно глубина воронки. Объем воронки при $W/r_0 = 11$ становится вдвое меньше начального объема полости. Уменьшение объема воронки происходит из-за разрыхления песка при обрушении

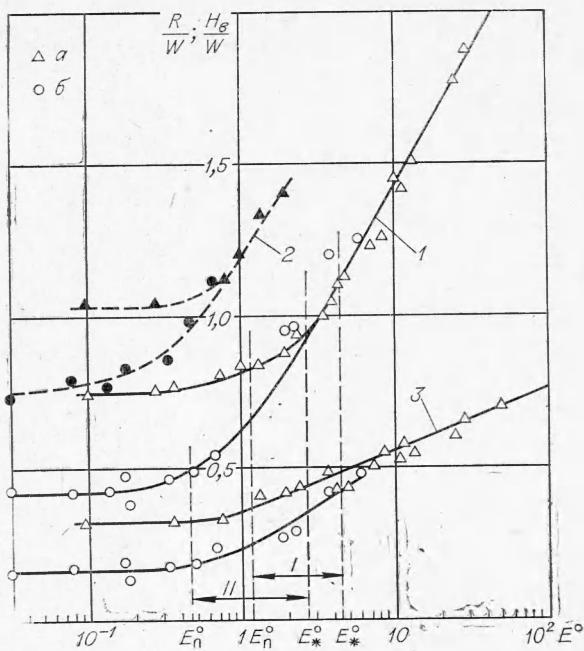


Рис. 7. Зависимость показателя действия взрыва и глубины воронки от параметра E^0 .
а — $W/r_0 = 2,4$; б — $W/r_0 = 4,8$.

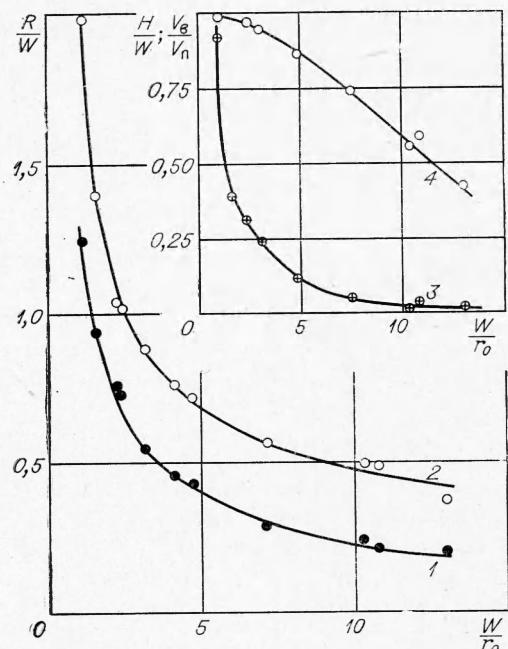


Рис. 8. Зависимость параметров провальной воронки от соотношения W/r_0 .
1, 2 — показатель действия взрыва; 3 — глубина воронки; 4 — объем воронки.

нии. По этой причине в условиях данной модели (объемный вес песка $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$ степень разрыхления 3%) видимая воронка на поверхности исчезнет примерно при $W/r_0 = 25$.

Отметим, что наличие зон небольших смещений, а следовательно, зоны проседания, является специфичным для сухого песка, у которого практически отсутствует сцепление. Поэтому для прогнозирования размера провальной воронки в реальных условиях предпочтительнее пользоваться измерениями $R_{\text{вр}}$. Однако есть сведения [6], что и в реальных условиях при подземных ядерных взрывах в аллювии на плато Юкка после точных топографических измерений было обнаружено некоторое понижение поверхности в довольно обширной области вокруг образовавшихся провальных воронок.

Сравнение с натурными взрывами

Проведенное выше формальное исследование зависимости (2) как функции двух переменных позволило установить связь временных характеристик и размеров воронки от основных безразмерных параметров E^0 и W/r_0 . Выделены области, где эти зависимости различны. Однако полученных результатов недостаточно для проведения оценок в практически интересных случаях, особенно в переходной области, где отмечено влияние как E^0 , так и W/r_0 . Поэтому была проведена серия модельных экспериментов, подобных по основным параметрам взрыву заряда 1 кт при изменении глубины его заложения. Поскольку на параметры камуфлетной полости существенное влияние оказывают свойства грунта, был исследован вариант взрыва в слабом грунте типа аллювия, объемный вес которого в среднем $1,8 \text{ г}/\text{см}^3$. Показано [2], что радиус камуфлетной полости в этом грунте соответствует эмпирической формуле

$$r_0 = 15C^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

$[r_0]$ в м, $[C]$ в кт. В этом случае энергия газообразных продуктов взрыва составляет 17% полной энергии взрыва, т. е. $E = 0,17 C$. Результаты модельных опытов, в которых изменялась только глубина заложения W , а энергия E и радиус r_0 сферического объема оставались фиксированными, представлены на рис. 9. Диапазон изменения $1 \leq W/r_0 \leq 12$ соответствует $0,12 \leq W^0 \leq 1,64$ или $0,23 \leq E^0 \leq 580$. Показатель выброса n уменьшается по мере увеличения глубины заложения. Отношение объема воронки $V_{\text{в}}$ к объему полости V_0 возрастает с увеличением W/r_0 , достигает максимальной величины при $W/r_0 = 3,2$, затем убывает и в области проседания становится меньше объема полости.

Характер изменения времени прорыва наиболее отчетливо показывает, как по мере увеличения W/r_0 область выброса сменяется переходной областью и наступает область проседания, когда при $W/r_0 \geq 9$ видимый прорыв газа исчезает. Таким образом, из модели следует, что при взрыве 1 кт в аллювии оптимальная глубина взрыва равна 48 м. При этом $t_m = 1,25 \text{ сек}$, $n = 1,25$, $V_{\text{в}} = 7,8 V_0$. В переходной области, которая наступает примерно при $W = 75 \text{ м}$, с увеличением глубины заложения до 110 м время прорыва изменяется от 2,7 до 13 сек. При глубине взрыва $W = 150 \text{ м}$ время обрушения грунта в полость составит 9 сек.

Сопоставим измерения на модели и, в частности, рассмотренный вариант с результатами реальных взрывов. По данным [1] на рис. 10 изображена зависимость радиуса воронки до глубины и мощности при

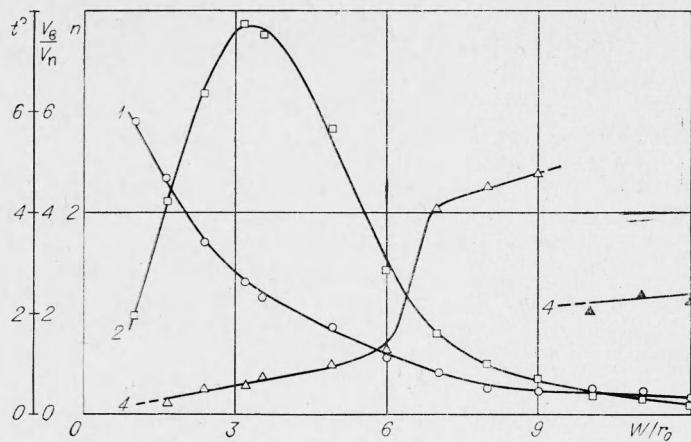


Рис. 9. Изменение показателя взрыва (1), отношения объема воронки к объему полости (2), времени прорыва (3) и времени обрушения (4) в зависимости от соотношения W/r_0 для взрыва в аллювии мощностью 1 кт.

взрывах в аллювии в координатах $R/C^{1/3,4} = f(W)/C^{1/3,4}$. Ядерные взрывы показаны на кривой 1. Кривая 2 показывает результаты взрывов химического ВВ (вес большинства зарядов составлял 116 кг нескольких 1–10 т и одного 454 т). Результаты модельных опытов в координатах $1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ представлены пунктиром для трех величин энергий взрыва: 0,01 кт (кривая 3), 1 кт (кривая 4) и 100 кт (кривая 5). В области выброса модельные кривые показывают, что, несмотря на координаты с показателем подобия 3,4, наблюдается относительное уменьшение размера воронки при увеличении энергии взрыва. Причем модельные кривые располагаются вблизи кривых натуральных взрывов соответственно диапазону их мощности. (Точка при $W/C^{1/3,4} = 50$ соответствует взрыву «Седан» — 100 кт.) Поэтому результаты расчета размеров воронки выброса по кривой 1 при значительном увеличении масштаба взрыва могут оказаться завышенными. Реально это отклонение может быть не

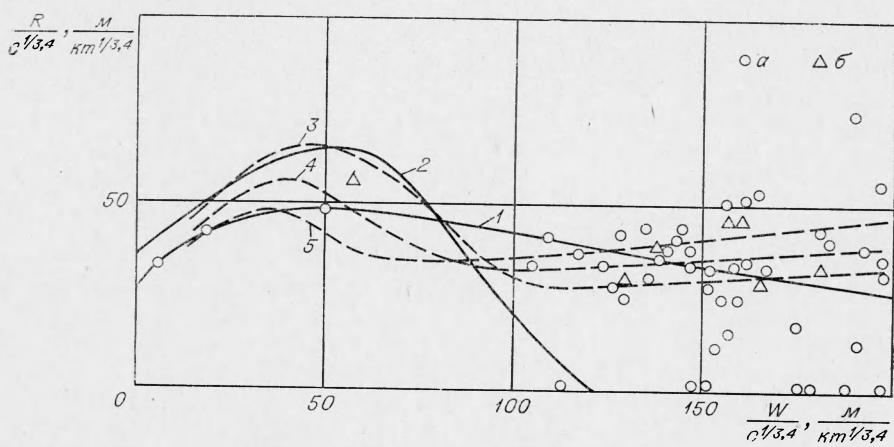


Рис. 10. Сравнение натурных опытов (1, 2) с модельными зависимостями (3, 4, 5).
а — аллювий; б — туф.

столь значительным по причине нарушения геометрического подобия в размере полости, например, из-за возрастания литостатического давления или прочности грунта с глубиной.

В области провальных воронок расположение модельных кривых, которые построены по измерениям $R_{\text{эфф}}$ меняются: радиусы воронок более мощных взрывов располагаются выше. Среди данных натурных взрывов отмечается большой разброс. Кроме того, не указано, в каких случаях образовалась зона проседания, приводятся только внутренняя воронка и размеры воронки, не указаны мощности взрывов. Это осложняет анализ. Поэтому можно лишь отметить, что модельные кривые располагаются в самой гуще натурных точек. Вероятно, что в этих случаях процессы образования провальной воронки в натуре и модели подобны.

Поступила в редакцию
24/III 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Engineering with nuclear explosives. Proc. 3-rd. Plowshare Symp., 1965.
2. G. W. Johnson, G. G. Higgen. Rev. of Geophysics, 1965, 3, 3.
3. М. А. Садовский, В. В. Адушкин, В. Н. Родионов. Докл. АН СССР, 1966, 167, 6.
4. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
5. В. В. Адушкин, Т. А. Орленко. МТТ, Изд. АН СССР, № 2, 1970.
6. Subsidence related to underground nuclear explosions. Nevada test site, Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59, 6.

УДК 550.348.425

КИНЕТИКА УТЕЧКИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ В ПОРИСТОМ ГРУНТЕ

B. I. Куликов

(Москва)

Большинство модельных исследований различных сторон подземного взрыва в лабораторных условиях выполнено в песчаном пористом грунте. Интерпретация их результатов и перенос их на природу обычно проводится в предположении, что утечкой продуктов взрыва из полости в поровое пространство грунта можно пренебречь. Однако никаких оценок на этот счет до сих пор опубликовано не было, хотя имеются экспериментальные данные, показывающие, что в ряде случаев утечка продуктов детонации влияет на эффект взрыва. Так, в работе [1] приводятся экспериментальные результаты, полученные при взрыве химических зарядов в начальных воздушных полостях, показывающие существенность утечки продуктов детонации в поровое пространство грунта в процессе расширения камуфлетной полости, показано влияние утечки на размер котловой полости и на характер затухания взрывной волны в грунте. По экспериментальным данным авторы работы [1] оценили конечную массу продуктов взрыва, остающуюся в полости к моменту ее расширения до максимального размера. В настоящей работе в рамках