

ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОЙ СРЕДЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА

А. А. Спивак

(Москва)

В связи со сложностью явления изучение взрыва в твердой среде объединяет в себе большое количество задач, одни из которых непосредственно связаны с динамикой взрывного источника, другие — более общие — с последствиями взрывного возмущения и поведением среды в условиях кратковременных нагрузок большой амплитуды. Среди основных проявлений взрывного воздействия в твердой среде особо выделяется образование и распространение волны сжатия. Существующий интерес к исследованию волнового процесса при взрывном деформировании можно объяснить двумя причинами: 1) необходимостью предварительной оценки сейсмического эффекта для обеспечения безопасности различного рода сооружений при крупномасштабных взрывах и 2) желанием расшифровать имеющуюся в волне сжатия информацию об источнике взрыва и свойствах взрывающей среды. Задача изучения взрывной волны сжатия не ограничивается только установлением параметров механического движения среды, поскольку в процессах формирования и распространения волны существенную роль играет поведение самой среды, находящейся в области, охваченной фронтом движения.

Особый интерес при изучении взрывного движения среды представляет установление степени влияния параметров источника взрыва на характеристики механического движения. Установление качественных зависимостей и в какой-то мере количественных пространственно-временных характеристик волнового процесса при взрыве заряда в воздушной полости и вблизи свободной поверхности и явилось целью настоящей работы, основой для которой послужили экспериментально полученные параметры волны сжатия при взрыве в соответствующих условиях [1—3].

В свете имеющихся аналитических описаний взрывного сейсмического источника (см., в частности [4]) амплитуда волны на больших расстояниях от взрыва пропорциональна объему, вытесненному источником во внешнюю область. Как правило, в качестве сейсмического источника при взрыве рассматривают сферическую поверхность, отделяющую область неупругого деформирования материала среды от упругого [4, 5]. Трудность практического осуществления оценок сейсмического сигнала заключается в этом случае в определении самих размеров зоны неупругого деформирования. Однако в качестве размеров источника a , как будет показано ниже, можно выбрать размер характерной области r_* , полученный в модельных экспериментах [1—3].

Что касается самой величины r_* , оцененной для различных условий взрывания по изменению в зависимостях параметров движения с расстоянием, то нельзя с уверенностью утверждать, что граница $r=r_*$ есть точный размер окончательно сформированной при взрыве зоны разрушения. Скорее ее существование связано с изменением скорости диссипативных процессов в среде. Можно считать, что r_* определяет размер области, внутри которой происходит интенсивная диссипация в самой волне сжатия, т. е. области всеобъемного разрушения. Окончательный размер зоны разрушения, определяемый в основном «медленным» процессом периферийного трещинообразования, вероятнее всего, нельзя отождествлять с размером сейсмического источ-

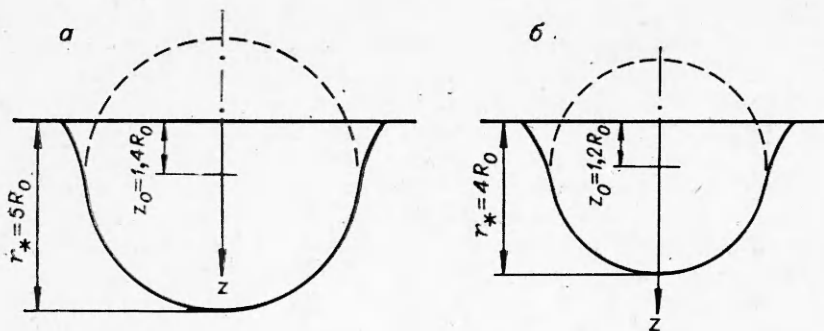


Рис. 1.

ника. Чтобы не усложнять дальнейшие рассуждения, будем называть область, заключенную внутри поверхности $r=r_*$, зоной разрушения [1—3].

Если в случае связанного камуфлетного взрыва и взрыва в воздушной полости, расположенной в твердой среде, поверхность излучателя представляет собой сферу радиуса r_* , то при рассмотрении взрыва малоуглубленного заряда вопрос стоит сложнее; при взрыве в прочной среде, в которой размер зоны разрушения сравним с отклонением формы поверхности разрушения от полусферы, необходим дополнительный анализ.

На рис. 1 приведена конфигурация зоны разрушения в плексигласе, полученная при взрыве зарядов с относительным заглублением $\eta = h/R_0 = -0,5$ (накладной полусферический заряд, рис. 1, б) и $\eta = 0$ (рис. 1, а, где h — глубина взрыва, R_0 — радиус заряда). Оказывается, что, несмотря на симметричное расположение заряда относительно свободной поверхности, поверхность зоны разрушения отличается от полусферической. Наблюдения, проведенные в динамике с помощью аппаратуры, описанной в [6], подтвердили, что по мере формирования зоны разрушения центр кривизны фронта разрушения, обращенного в глубь материала ($z=z_0$ на рис. 1), смещается вдоль оси z и к концу развития зоны занимает положение, указанное на рис. 1. Величина максимального внедрения зоны разрушения в материал среды, полученная оптическим способом, согласуется с r_* , полученной на основе измерения массовых скоростей [3]. При увеличении глубины взрыва (начиная с $\eta \approx 2-3$) форма зоны разрушения приближается к полусферической ($z_0=0$). Поскольку форма зоны разрушения при малоуглубленном взрыве существенно несферическая, для волны, распространяющейся в глубь вещества, в качестве излучающей поверхности, на которой задаются параметры сейсмического излучателя, следует принять поверхность сферы радиуса $r = z_0$ с центром в точке z_0 .

Для проверки возможности выбора величины r_* ($r_* = z_0$ в случае малоуглубленного взрыва) в качестве размера излучателя воспользуемся тем, что длительность порождаемой им волны τ должна быть пропорциональной размеру излучающей области: $\tau = ka/c$, где k — коэффициент источника. В табл. 1 приведено значение коэффициента k , оцененное по величине длительности волны τ и размеру характерной области r_* (см. [1—3]) для малоуглубленного взрыва и для взрыва в воздушной полости различного относительного размера $\eta = R_n/R_0$ (R_n — радиус полости).

Таблица 1

| η | k | | ξ | k |
|----------|-------------------|------------|-------|------------|
| | тиосульфат натрия | плексиглас | | |
| -0,5 | 2,0 | 2,2 | 1,0 | 2,0 |
| 0 | 1,8 | 2,0 | 1,5 | 2,5 |
| 1 | 1,8 | — | 2,0 | 2,1 |
| ∞ | 2,0 | 2,1 | 3,0 | 1,8 |

Случай $\xi=1$, $\eta \rightarrow \infty$ соответствует взрыву связанного заряда-камуфлета. Поскольку при взрыве с $\eta < \infty$ в тиосульфате натрия центр кривизны z_0 определить не удалось, при вычислениях было положено $a=r_*$. Как видно из табл. 1, это не оказало сильного влияния на конечный результат. Объяснение этому можно найти в том, что в тиосульфате натрия зона разрушения r_* существенно больше зоны разрушения в плексигласе, для которого величина z_0 сравнима с r_* . Таким образом, приходим к выводу, что с хорошей точностью выбранный размер излучателя пропорционален длительности взрывного сигнала с одним и тем же коэффициентом источника $k \approx 2$ вне зависимости от условий взрывания.

Представляет определенный интерес связать размер взрывного сейсмического источника a с какой-либо энергетической характеристикой взрыва. Падение интенсивности волны сжатия в твердой среде при увеличении относительного размера воздушной полости и уменьшении заглубления непосредственно связано с перераспределением энергии заряда между продуктами детонации и средой. Так, с увеличением объема полости оставшаяся в продуктах детонации энергия E увеличивается и, следовательно, энергия ϵ , переданная твердой среде, уменьшается. С помощью адиабаты продуктов детонации [7] проводилась оценка величины E для полостей различного относительного размера. Оказалось, что для полостей с $\xi=1,0; 1,5; 2$ и 3 величина E составляет соответственно 20, 67, 85 и 90% от энергии взрыва E_0 . Указанные значения E соответствуют смещению стенки воздушной полости [2].

В связи с тем, что при малогазуглубленном взрыве часть энергии заряда ВВ получает возможность уходить вместе с продуктами детонации в воздух через некоторое время после взрыва, переданная твердой среде энергия уменьшается при приближении центра взрыва к свободной поверхности. По приведенной в работе [3] эффективности малогазуглубленного взрыва можно оценить величину ϵ . Поскольку ни максимальная массовая скорость, ни длительность волны по отдельности не определяют работу, совершенную продуктами детонации над твердой средой, для оценок воспользуемся эффективностью малогазуглубленного взрыва по перемещениям (w_2) [3]. С учетом размеров камуфлетной полости и данных работы [7] получаем, что величина ϵ_0 при связанном камуфлетном взрыве составляет $0,8 E_0$ для тиосульфата и $0,7 E_0$ для плексигласа. Теперь с использованием величины «камуфлетного эквивалента» w_2 [3] получаем искомые значения ϵ (табл. 2). Для сравнения в табл. 2 приведены данные для песка ($\rho_0 = 1,6$), полученные в работе [8].

Далее можно связать размер излучателя a с величиной энергии ϵ . В табл. 3 приведены значения a/a_0 (a_0 — размер излучателя при связанном камуфлетном взрыве) совместно с величиной $b = (\epsilon/\epsilon_0)^{1/3}$. Видно, что с удовлетворительной точностью выбранный размер взрывного сейсмического источника пропорционален энергии, переданной твердой среде при взрыве.

Таблица 2

| η | $\epsilon/E_0, \%$ | | |
|----------|--------------------|------------|-------|
| | тиосульфат натрия | плексиглас | песок |
| -0,5 | 21 | 18 | 22 |
| 0 | 42 | 36 | 35 |
| 1 | 60 | — | 47 |
| ∞ | 80 | 70 | — |

При камуфлетном взрыве, в том числе при взрыве в воздушной полости в области, непосредственно прилегающей к границе R_n , в волне сжатия не фиксируется возвратного движения среды (в отличие от малогазуглубленного взрыва [3]), и увеличение объема полости легко оценить по величине остаточных перемещений. В этой связи представляет определенный интерес проследить за изменением вытесненного на поверхность излучателя объема ΔV_1 совместно с увеличением объе-

Таблица 3

| η | Тиосульфат натрия | | Плексиглас | | Воздушная полость | | |
|--------|-------------------|------|------------|------|-------------------|---------|------|
| | a/a_0 | b | a/a_0 | b | ξ | a/a_0 | b |
| -0,5 | 0,72 | 0,63 | 0,51 | 0,61 | 1,5 | 0,70 | 0,74 |
| 0 | 0,84 | 0,80 | 0,66 | 0,79 | 2 | 0,54 | 0,58 |
| 1 | 0,92 | 0,91 | — | — | 3 | 0,50 | 0,50 |

ма полости в результате взрыва ΔV . Результаты обработки данных работы [2]:

| ξ | α | β |
|-------|----------|---------|
| 1,0 | 0,64 | 1 |
| 1,5 | 0,79 | 0,75 |
| 2,0 | 0,88 | 0,32 |
| 3,0 | ~1 | ~0,1 |

Здесь $\alpha = \Delta V_1 / \Delta V$, $\beta = \Delta V_1 / \Delta V_0$, $\Delta V_0 = \Delta V_1$ ($\xi = 1$). Видно, что по мере увеличения размеров воздушной полости объем, вытесненный излучающей поверхностью, приближается к изменению объема полости (см. изменение величины α). При этом можно ожидать падения сейсмического воздействия взрыва по сравнению со связанным взрывом ($\xi = 1$) на порядок при использовании полости радиусом $3R_0$. Используемая при оценках величина ΔV получена аппроксимацией экспериментальных данных по перемещению частиц среды на стенку полости, в связи с чем величина α здесь должна рассматриваться как относительная характеристика взрыва при изменении радиуса полости.

Провести подобные оценки в случае малоуглубленного взрыва не удастся. Однако в этом случае существует специфичная характеристика механического движения — импульс, переданный твердой среде в положительном направлении оси z (см. рис. 1).

$$I = 2\pi \int_{R_1}^R r^2 dr \int_{\pi/2}^{\pi} \rho v \sin \theta \cos \theta d\theta. \quad (1)$$

Здесь R_1 — радиус взрывной полости (граница среда — продукты детонации), определяемый смещением среды на границе среда — заряд; R — радиус фронта волны; ρ — плотность среды.

Используя эпюры массовых скоростей, полученных при взрывах различного заглубления [3], можно построить распределение скорости среды v за фронтом волны ($v \neq v_0$) для различных моментов времени. Так же, как и в случае $\eta \rightarrow \infty$ [1], непосредственно за фронтом

$$v = v_0 (R/r)^n,$$

причем в области $R \leq r$. $n \approx 1,4$ для всех значений параметра η .

С учетом степенного распределения скорости по радиусу (2) и условия $\rho \approx \text{const}$ определяем импульс, переданный среде в различные моменты времени (рис. 2). Видно, что по мере формирования волны сжатия переданный твердой среде импульс увеличивается

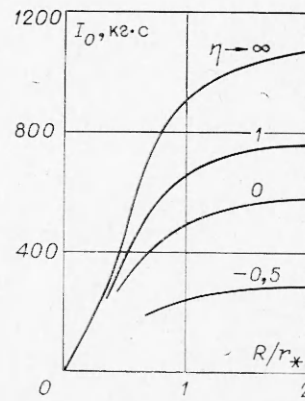


Рис. 2.

Таблица 4

| η | I_0 , кг·с | |
|----------|-------------------|------------|
| | тиосульфат натрия | плексиглас |
| -0,5 | 290 | 180 |
| 0 | 580 | 390 |
| 1 | 770 | — |
| ∞ | 1070 | 550 |

и при $R \sim r$ практически достигает своего максимума I_0 . Величина I_0 для тиосульфата натрия в пересчете на 1 кг ВВ приведена в табл. 4. Там же для сравнения дано значение I_0 , оцененное для плексигласа при $n=1$. При оценках величины I_0 не принимался во внимание импульс, переданный твердой среде в отрицательном направлении оси z , который присутствует при $\eta > 0$.

Поступила в редакцию
24/XI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Спивак, В. М. Цветков. ФТПРПИ, 1973, 5.
2. А. А. Спивак. ФГВ, 1973, 9, 2.
3. А. А. Спивак. ФГВ, 1974, 10, 3.
4. В. Н. Родионов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
5. Г. Родин. Сейсмология ядерных взрывов. М., «Мир», 1974.
6. В. В. Адушкин, А. П. Сухотин. ПМТФ, 1961, 4.
7. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 4, 2.
8. В. Д. Алексеенко. ФГВ, 1967, 4, 1.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ И РАЗГРУЗКИ

Г. И. Канель, Г. Г. Вахитова, А. Н. Дремин

(Черноголовка)

Манганиновые датчики используются для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред давно [1], однако их метрологические характеристики все еще известны недостаточно полно. Принцип использования датчиков основан на сравнительно высокой чувствительности удельного электросопротивления манганина к изменению давления в окружающей среде при очень низкой чувствительности к изменению температуры. В опубликованных работах [2—6] сообщаются результаты более или менее систематических исследований зависимости электросопротивления манганиновых датчиков от давления за фронтом ударной волны. Данные же о зависимости электросопротивления от давления в окружающей среде при разгрузке, а также сведения о влиянии на показания датчика способа сжатия образца (ударное, «ступенчатое», плавное) до одного и того же давления практически отсутствуют. Получение этих данных и является целью представляемой работы.

Чувствительные элементы датчиков готовились травлением из твердой фольги марки МНМц АЖЗ-12-0, 25-0,2 толщиной 0,03 мм, имеющей, согласно сертификату, состав: 83,6% Cu, 3,26% Ni, 12,17% Mn, 0,3% Fe, 0,22% Al и температурный коэффициент электросопротивления $1,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Чувствительный элемент имел вид зигзагообразной ленты и занимал площадь $\sim 7 \times 7$ мм². Выводы представ-