

УДК 550.348.425.4

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТАКТНОГО ВЗРЫВА И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА

Н. И. Шишкин

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, 456770 Снежинск
E-mail: sva@sva.ch70.chel.su

Приведена оценка сейсмической энергии, передаваемой в упругое полупространство при контактном взрыве и при ударе метеорита о планету. Получены значения сейсмической эффективности взрыва и удара — отношения энергии генерируемых сейсмических волн к энергии взрыва либо к кинетической энергии метеорита. В случае контактного взрыва это отношение находится в диапазоне $10^{-4} \div 10^{-3}$. В случае крупномасштабного ударного воздействия, при котором кратер в коре планеты образуется в гравитационном режиме, получена формула, связывающая сейсмическую эффективность удара с определяющими его параметрами.

Ключевые слова: контактный взрыв, удар, сейсмическая эффективность.

Введение. Оценка сейсмической энергии, передаваемой среде при подземных взрывах и ударах космических тел о Землю, важна для прогноза сейсмического воздействия на инженерные сооружения, биоту, земную кору и планету в целом.

Энергия сейсмического движения при подземном ядерном взрыве определена в работе [1], в которой показано, что сейсмическая эффективность (СЭ) $k_s \equiv E_s/E_0$ (E_s — энергия сейсмических волн; E_0 — энергия взрыва) имеет следующие значения: в аллювии — 0,1 %, в туфе — 1,2 %, в каменной соли — 4,9 %, в граните — 3,7 %. Эти данные получены для достаточно больших глубин заложения зарядов. При уменьшении глубины заложения значение k_s возрастает. Как показано в [2], уменьшение глубины заложения приводит к увеличению СЭ до значения, близкого к 10 %.

Сейсмическая эффективность высокоскоростного удара оценивалась в работах [3–8]. Из указанных работ следует, что оценка величины k_s выполнена с большой неопределенностью ($k_s = E_s/E_0 = 10^{-6} \div 10^{-2}$, где E_0 — кинетическая энергия). Неясна также зависимость ее от параметров, определяющих сейсмический эффект удара. Значение k_s контактного взрыва неизвестно.

Целью данной работы является получение функциональной зависимости сейсмической эффективности от определяющих параметров в случаях контактного взрыва и высокоскоростного удара.

1. Камуфлетный взрыв. Для описания сейсмического эффекта камуфлетного подземного взрыва в скальной породе использовалась модель Хаскелла [1]. Излучаемая при взрыве продольная P -волна характеризуется потенциалом $\varphi(t, r)$ поля смещений $u(t, r)$ следующего вида:

$$u(t, r) = \frac{\partial \varphi(t, r)}{\partial r}, \quad \varphi(t, r) = -\frac{\Phi(\infty)}{r} f(\tau), \quad \tau = \frac{1}{t_0} \left(t - \frac{r}{c_P} \right),$$

$$f(\tau) = 1 - e^{-\tau} (1 + \tau + \tau^2/2 + \tau^3/6 - B\tau^4). \quad (1.1)$$

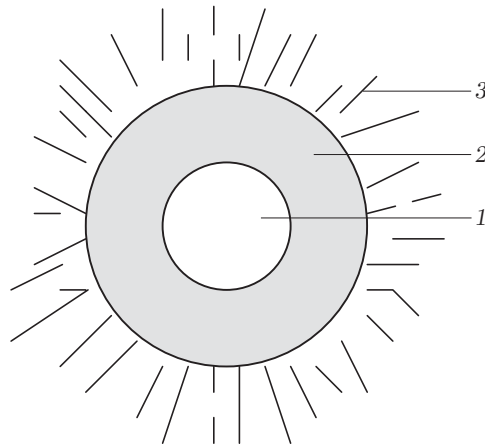


Рис. 1. Схема разрушения скальной породы при камуфлетном взрыве (по В. Н. Родионову [9]):

1 — камуфлетная полость; 2 — зона дробления; 3 — зона радиальных трещин

Здесь t — время, отсчитываемое с момента взрыва; r — расстояние от центра взрыва; c_P — скорость распространения продольных волн; $f(\tau)$ — функция источника, эквивалентного взрыву по излучаемой P -волне. Соотношение (1.1) содержит три свободных параметра: t_0 , $\Phi(\infty)$, B , которые подбираются из эксперимента. Физическая интерпретация этих параметров заключается в следующем. Параметр t_0 определяет временной масштаб сейсмического движения. При этом характерная длина, определяющая размеры сейсмического источника (очага взрыва) $c_P t_0$, приблизительно равна радиусу зоны дробления породы, окружающей центральную область взрыва (рис. 1). В случае глубокого заложения $c_P t_0 \approx r_e$ (r_e — упругий радиус очага взрыва). При неглубоком заложении упругий радиус близок к радиусу зоны радиальных трещин [9].

Параметр $\Phi(\infty)$ с точностью до сомножителя 4π равен объему, вытесняемому в область упругих деформаций среды:

$$V_\infty = 4\pi\Phi(\infty) \quad (1.2)$$

(V_∞ — вытесняемый объем). В тех случаях, когда отсутствует зона радиальных трещин (взрывы глубокого заложения) и можно не учитывать уплотнение и разрыхление породы в очаге взрыва, объем V_∞ равен объему камуфлетной полости:

$$V_\infty \approx (4/3)\pi r_n^3 \quad (1.3)$$

(r_n — радиус камуфлетной полости). Из (1.2) и (1.3) следует приближенное соотношение $\Phi(\infty) \approx r_n^3/3$. Радиус камуфлетной полости можно найти по известным эмпирическим формулам, приведенным в работах [10, 11].

Параметр B ($0 \leq B < 0,5$) зависит от свойств среды взрыва (плотности, пористости, водонасыщенности, литостатического давления и др.). В рамках упругой модели этот параметр является функцией лишь коэффициента Пуассона ν . Между B и ν имеется слабая корреляционная связь. В грубом приближении можно полагать $B \approx \nu$.

Источник (1.1) создает поля смещений и напряжений, описываемые формулами

$$\begin{aligned} \frac{u}{c_P t_0} &= \kappa \left(\frac{f(\tau)}{R^2} + \frac{f'(\tau)}{R} \right), & \frac{\sigma_{rr}}{\rho c_P^2} &= -\kappa \left(4\gamma^2 \frac{f(\tau)}{R^3} + 4\gamma^2 \frac{f'(\tau)}{R^2} + \frac{f''(\tau)}{R} \right), \\ \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\rho c_P^2} &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\rho c_P^2} = \kappa \left(2\gamma^2 \frac{f(\tau)}{R^3} + 2\gamma^2 \frac{f'(\tau)}{R^2} - (1 - 2\gamma^2) \frac{f''(\tau)}{R} \right), \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{2\rho c_P^2} = -\varkappa \left(3\gamma^2 \frac{f(\tau)}{R^3} + 3\gamma^2 \frac{f'(\tau)}{R^2} + \gamma^2 \frac{f''(\tau)}{R} \right),$$

где σ_{ik} — компоненты тензора напряжений; $R \equiv r/(c_P t_0)$; $\gamma = c_S/c_P$; c_S — скорость распространения поперечных волн,

$$\varkappa \equiv \Phi(\infty)/(c_P t_0)^3. \quad (1.5)$$

Далее потребуются формулы, описывающие остаточные смещения и напряжения, возникающие в окрестности очага после излучения P -волны. Эти формулы следуют из (1.4) при $t \rightarrow \infty$:

$$\frac{u}{c_P t_0} = \frac{\varkappa}{R^2}, \quad \frac{\sigma_{rr}}{\rho c_P^2} = -\frac{4\gamma^2 \varkappa}{R^3}, \quad \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\rho c_P^2} = \frac{2\gamma^2 \varkappa}{R^3}, \quad \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{2\rho c_P^2} = -\frac{3\gamma^2 \varkappa}{R^3}. \quad (1.6)$$

Энергия излучаемой P -волны определяется формулой, полученной в [1]:

$$E_s = \pi \alpha(B) \varkappa \rho c_P^2 \Phi(\infty), \quad \alpha(B) = (5 + 3(1 + 24B)^2)/64. \quad (1.7)$$

Если ввести сейсмический момент взрыва $M_0 \equiv 4\pi \rho c_P^2 \Phi(\infty)$, то соотношение (1.7) можно представить в виде

$$E_s/M_0 = (1/4)\alpha(B)\varkappa. \quad (1.8)$$

Значение параметра B определено в [1] для взрывов в четырех горных породах: в аллювии $B = 0,49$, в туфе $B = 0,05$, в каменной соли $B = 0,17$, в граните $B = 0,24$. Параметр B зависит не только от свойств породы, но и от глубины заложения. При уменьшении глубины заложения параметр B увеличивается. Оценка значений B , выполненная в [2] при малых камуфлетных глубинах заложения, показала, что для прочных горных пород $B \approx 0,3$. Ограничиваясь рассмотрением сильных эффектов взрыва и удара в земной коре или в коре другой планеты, будем считать кору планет горной породой, близкой по свойствам к граниту. В этом случае $\alpha(B)/4 \approx 0,75$ и формула (1.8) принимает вид

$$E_s/M_0 = 0,75\varkappa. \quad (1.9)$$

Параметр \varkappa (через $\Phi(\infty)$) связан с вытесняемым объемом V_∞ , который определяется произведением площади S_1 поверхности зоны дробления S и величины остаточного смещения u_∞ точек этой поверхности:

$$V_\infty = S_1 u_\infty = 4\pi r_e^2 u_\infty.$$

Здесь r_e — радиус поверхности S (“упругий радиус”). Остаточное смещение u_∞ в соответствии с (1.5), (1.6) определяется формулой

$$u_\infty = \Phi(\infty)/r_e^2. \quad (1.10)$$

Если разрушение происходит вследствие сдвиговых деформаций, то на границе $r = r_e$ должно выполняться условие

$$\sigma_s = |(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})/2|_{r=r_e} = 3\gamma^2 \varkappa \rho c_P^2 (c_P t_0/r_e)^3, \quad (1.11)$$

где σ_s — сдвиговая прочность породы. Исключая \varkappa из (1.5), (1.10) и (1.11), получим

$$u_\infty = \sigma_s r_e / (3\gamma^2 \rho c_P^2). \quad (1.12)$$

Из определения параметра \varkappa и формулы (1.11) следует

$$\varkappa = \frac{\sigma_s}{3\mu} \left(\frac{r_e}{c_P t_0} \right)^3.$$