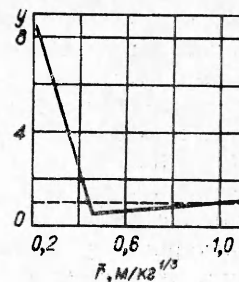


до $\bar{r} \approx 0,1$ м/кг^{1/3}. За пределами расстояний $\bar{r} \approx \approx 1,0$ м/кг^{1/3} лежит зона слабого улучшения фильтрационных параметров коллектора. Размеры этой третьей зоны и характер изменения фильтрации в ней в проведенных опытах специально не изучались.

Обработка опытных данных методом наименьших квадратов дает следующие зависимости изменения фильтрационных свойств высокопористого насыщенного коллектора от приведенного расстояния. Для первой зоны $y = -31,7\bar{r} + 15$, $0,22 \leq \bar{r} \leq 0,45$; для второй области $y = 0,96\bar{r} - 0,01$, $0,45 \leq \bar{r} \leq 1$, где $y = (Q/\Delta p)/(Q/\Delta p)_0$.

Таким образом, изменения фильтрационных свойств при камуфлетном взрыве носят немонотонный характер, кардинальным образом отличающийся от изменений гидропроводности монолитных горных пород и воздушно-сухих пористых сред.



Ф и г. 3

Поступила 25 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. McKee C. R., Hanson M. E. Explosively created permeability from single charges. — Soc. Petrol. Eng. J., 1975, N 12.
2. Родионов В. Н., Спивак А. А., Цветков В. М. Метод определения фильтрационных свойств горных пород в массиве. — ФТПРПИ, 1976, № 5.
3. Butkovich T. R., Burton D. E., Bryan J. B. Calculational modeling of explosive fracture and permeability enhancement. — J. Energy Resources Techn., 1979, vol. 101, p. 28.
4. Бовт А. Н., Кобец В. И. и др. О зонах уплотнения и разуплотнения при камуфлетном взрыве в пористой среде. — Изв. АН СССР. МТТ, 1979, № 6.
5. Николаевский В. Н., Басниев К. С. и др. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
6. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.
7. Кривцов В. А. Кинематика развития камуфлетной полости в водонасыщенном песке. Применение энергии взрыва на земляных работах. М.: Недра, 1979.
8. Knox J. B., Rawson D. E., Kower J. A. Analysis of a ground water anomaly created by an underground nuclear explosion. — J. Geophys. Res., 1965, vol. 70, N 4.
9. Banister J. A., Ellet D. M. Pore pressure enhancements observed on Rio Blanco. — Nuclear Technology, 1975, vol. 27, p. 660.
10. Оберт Л. Хрупкое разрушение горных пород. — В кн.: Разрушение. Т. 7, ч. 1/ Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1976.
11. Шрейнер Л. А. и др. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Недра, 1968.
12. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977.
13. Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.

УДК 533+539

О МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ОБЪЕМНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЗРЫВЕ

В. Н. Родионов

(Москва)

Подземный взрыв как источник сейсмических волн хорошо изучен [1]. Механизм формирования упругой волны, которая затем трансформируется в сейсмические волны разных видов, состоит в следующем. Энер-

гия взрыва передается окружающей среде посредством волны сжатия, которая вытесняет некоторый объем, пропорциональный энергии взрыва, в упругую область за пределы зоны разрушения. Линейные размеры этой зоны зависят от свойств среды, в частности от ее сжимаемости и прочности. Приблизительно для взрыва в каменной соли радиус зоны разрушения $R_p = 100q^{1/3}$, если R_p измерять в метрах, а q — вес эквивалентного по энергии тротилового заряда — в килотоннах. Время радиального смещения частиц от взрыва в упругой волне, которое определяет частотную характеристику сигнала, приблизительно равно диаметру зоны разрушения, деленному на скорость продольных волн. Амплитуда радиального смещения u и скорость смещения на фронте волны сжатия могут быть определены с помощью эмпирических соотношений. Например, при взрыве в каменной соли

$$u = 0,435q^{1/3} \left(\frac{100q^{1/3}}{R} \right)^{1,6}, \quad v = 10 \left(\frac{100q^{1/3}}{R} \right)^{1,6},$$

где u — амплитуда смещения в волне, м; v — скорость смещения на фронте волны сжатия, м/с; q — вес эквивалентного по энергии тротилового заряда, кт.

Из-за роста скорости упругих волн с глубиной волны на большие расстояния распространяются по глубоко погруженным в мантию криволинейным лучам. От взрыва эти лучи выходят под большими углами к поверхности, так что параметры продольной сейсмической волны определяются упругой волной, сформированной под взрывом [2]. При взрыве у дневной поверхности амплитуда волны сжатия, а вместе с ней амплитуда продольной сейсмической волны монотонно уменьшаются с уменьшением глубины взрыва w , начиная с $w \simeq R_p$.

Рассмотрим теперь другой механизм возбуждения сейсмических волн. Если подземный взрыв настолько близок к поверхности, что образуется воронка выброса или горный массив в результате больших деформаций теряет связность в объеме воронки рыхления, то появляются новые силы, действующие на упругое полупространство. Инерциальное движение больших масс горной породы в пределах воронки выброса или рыхления порождает медленно меняющиеся силы. В работе [3] показано, что при взрывах на выброс отрываемый от массива объем горной породы порождает действием сил сцепления и трения низкочастотную волну разрежения в окружающем пространстве. Подброшенный взрывом объем горной породы на некоторое время разгружает от своей тяжести упругое полупространство и тем самым порождает упругую волну разгрузки, которая вблизи оси симметрии под взрывом, очевидно, является продольной волной.

Оценим максимальную амплитуду продольной упругой волны, формирующейся при разгрузке упругого полупространства. Если считать, что весь объем горной породы, заключенный в перевернутом конусе с вершиной в центре взрыва и радиусом, равным глубине взрыва (воронка выброса или рыхления), одновременно отделяется от массива, то действие на упругое полупространство можно представить как действие сосредоточенной силы $F = \rho g w^3$, где g — ускорение силы тяжести; ρ — плотность горной породы; w^3 — объем воронки.

С увеличением глубины взрыва сила F растет. Этот рост прекращается тогда, когда действие взрыва недостаточно сильно для отделения указанного объема от массива или когда время падения в поле силы тяжести отделенного от массива объема горной породы станет слишком малым. Можно полагать, что взрыв на глубине $w = R_p$ даст наибольшую амплитуду волны разгрузки. Действительно, как показывают оценки, в этом случае начальная скорость v_0 подброшенной горной породы будет достаточна

(~ 10 м/с), чтобы обеспечить значительную длительность действия силы ($2v_0/g = 2c$).

Если иметь в виду, что время установления равновесия после включения сосредоточенной силы связано с перестройкой полей упругих деформаций в объеме, линейные размеры которого много больше радиуса площади приложения «сосредоточенной» силы, то необходимое минимальное время действия силы равно

$$\Theta \simeq 10R_p/c = 10w/c,$$

где c — скорость продольных волн.

Таким образом, условие эффективного возбуждения волны разгрузки определяется соотношением $2v_0/g \geq \Theta$.

На границе волновой области (расстояние от поверхности по вертикали $z = \Theta c$) смещение вдоль оси симметрии от действия на поверхности сосредоточенной силы F может быть вычислено по формулам для статического равновесия:

$$u_z = - \frac{(1-\sigma)(3-2\sigma)}{(1-2\sigma)2\pi\rho c^2} \frac{F}{z},$$

где σ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды; z — расстояние по вертикали от поверхности.

Подставляя $F = \rho g w^3$, $w = R_p = 100 q^{1/3}$, $z = 10w$, для взрыва в каменной соли ($c = 4,5$ км/с, $\sigma = 0,25$) получим

$$u_z = -0,3 \cdot 10^{-3} q^{2/3}.$$

Если $q = 150$ кт, то $u_z = -0,85$ см. Отметим, что на этом же расстоянии при взрыве $q = 150$ кт смещение в волне сжатия, определяемое формулой

$$u = 0,135 q^{1/3} \left(\frac{100 q^{1/3}}{z} \right)^{1,6},$$

имеет тот же порядок величины, $u = 2,1$ см.

Однако если время смещения в волне сжатия составляет примерно $2R_p/c = 2w/c$, то время смещения в волне разгрузки будет равно $\Theta = 10w/c$. Вследствие этого на больших расстояниях (~ 5000 км) из-за существенно меньшего поглощения энергии упругой волны в длинноволновой части спектра определяющую роль будет играть сейсмическая волна, возбужденная по механизму разгрузки.

Важно отметить, что на больших расстояниях амплитуда сейсмических колебаний, имеющих разную природу возбуждения, различно зависят как от энергии взрыва, так и от глубины взрыва. В частности, зависимость амплитуды колебаний, вызванных волной разгрузки, от глубины взрыва имеет максимум при $w = R_p = 100 q^{1/3}$.

Поступила 10 IX 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. Н., Адушкин В. В. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.
2. Ромни К. Амплитуда объемных сейсмических волн при подземных ядерных взрывах. — В сб.: Подземные ядерные взрывы. М.: ИЛ, 1962.
3. Ромашов А. Н. О природе некоторых волн в грунте, возбуждаемых подземным взрывом. — В сб.: Взрывное дело 64/21. М.: Недра, 1968.