УДК 550.34

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНОМ ГОРНОМ МАССИВЕ

А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк, кандидаты техн. наук, О. Н. Чала, асп. (ИГМ НАН Украины)

З використанням параметрів сейсмічного осередку вибуху розв'язано пряму і зворотну задачі по поширенню сейсмовибухової хвилі у багатошаровому масиві гірських порід. Наведено методику визначення стійкості уступу кар'єру при масових вибухах.

Ключові слова: осередок вибуху, сейсмовибухова хвиля, масова швидкість, шар, грунт.

С использованием параметров сейсмического очага взрыва решена прямая и обратная задачи по распространению сейсмовзрывной волны в многослойном массиве горных пород. Представлена методика определения устойчивости успута карьера при массовых взрывах.

Ключевые слова: очаг взрыва, сейсмовзрывная волна, массовая скорость, слой, грунт.

Solution of direct and inverse problems on seismoblast wave propagation in multilayered rock mass is shown using parameters of the seismic center of explosion. The methodology for definition of bench stability at mass explosion is presented.

Key words: explosion center, seismoblast wave, mass speed, layer, ground.

Введение. Важным условием при определении сейсмобезопасности обьектов, находящихся на поверхности многослойного массива горных пород или внутри его, является правильное определение пути распространения сейсмической волны и степени поглощения ее интенсивности горными породами.

Среди литературных источников имеются работы, посвященные данному вопросу, но связанные с землетрясениями или с исследованиями отдельного слоя [1–4]. Поэтому исследования закономерностей распространения взрывной волны в многослойном массиве являются актуальными.

Цель работы – обосновать решение прямой и обратной задачи по распространению сейсмовзрывной волны в многослойном массиве горных пород.

Отправной точкой исследования распространения сейсмовзрывной волны (СВВ) удобнее всего взять границу сейсмического очага взрыва (СОВ), где массовая скорость в волне является постоянной величиной для определенного типа грунта независимо от массы заряда.

Границу СОВ можно определить на сейсмограммах по характерным признакам колебаний, на графиках – по изменению степени затухания амплитуд и периодов колебаний в волновом процессе с расстоянием, по зависимости интенсивности колебаний в волне от глубины заложения заряда, по деформациям грунта на свободной поверхности при глубинной серии взрывов, по взаимодействию линейно рассредоточенных зарядов.

Работами ведущих ученых в области инженерной сейсмологии показано, что СОВ отождествляется с зоной необратимых деформаций грунта, а граница его разделяет зоны неупругих и упругих колебаний.

Известно, что каждая неоднородность в массиве грунта может быть источником зарождения СВВ. Расстояние этого источника от заряда ВВ называется радиусом сейсмоизлучателя. Таким образом, граница между СОВ и упругой зоной колебаний грунта является зоной зарождения определенной волны упругих колебаний, а ее расстояние до заряда ВВ – радиусом сейсмоизлучателя *R*.

Результатами исследований, в том числе [5–12], установлено, что СОВ пропорционален массе взрываемого заряда:

$$R_0 = K_0 Q^{1/3}, \qquad (1)$$

где K_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа пород. Для мягких грунтов K_0 = 2,5 м/кг$^{1/3}$, для пород угольных месторождений K_0 = 4 м/кг$^{1/3}$, для большинства скальных ненарушенных пород K_0 = 5,0…5,5 м/кг$^{1/3}$, для глин K_0 = 7,5…8,0 м/кг$^{1/3}$, для суглинков K_0 = 8,0…9,0 м/кг$^{1/3}$; Q – масса мгновенно взрываемого заряда, кг (по данным японских ученых $R_0 = 5{,}8\ Q^{0{,}38}$).

Решение поставленной задачи по определению интенсивности колебаний грунта в многослойной среде выполнено на примере массовых взрывов в железорудном карьере Полтавского ГОКа на основе проведенных измерений параметров СВВ (рисунок).

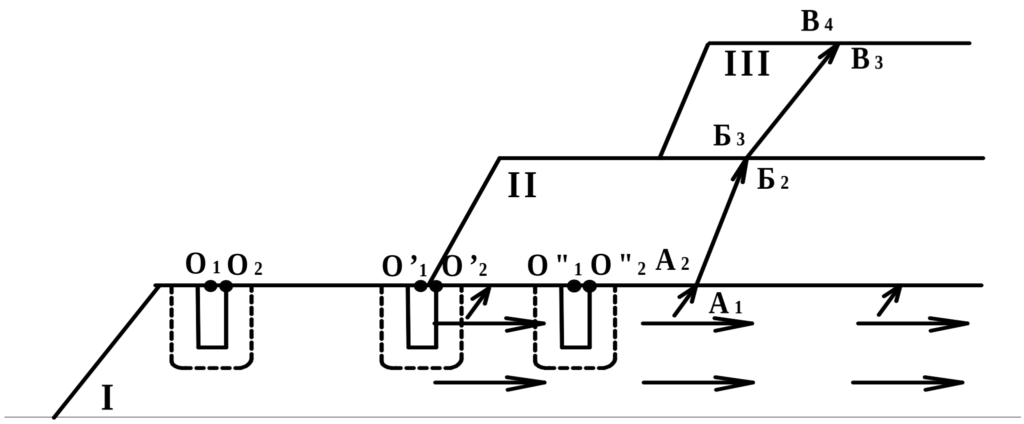

Схема к расчету параметров СВВ: I – подстилающий слой скальных пород (акустическая жесткость $N_1 = 2{,}01 \cdot 10^7$ кг/м^2·с); II – слой скальных пород ($N_2 = 1{,}51 \cdot 10^7$ кг/м^2·с); III – слой рыхлых пород ($N_3 = 1{,}8 \cdot 10^6$ кг/м^2·с); O_1, O'_1, O''_1 – места заложения зарядов ВВ; O_2, O'_2, O''_2 – границы зоны СОВ

Рассмотрим распространение поперечной волны *S* как наиболее интенсивной от точки *O* (граница СОВ) до точки B_4 (свободная поверхность).

Размер СОВ на основании формулы (1) будет $R_0 = 5{,}5 \cdot 3945^{1/3} = 85$ м.

В точке О скорость смещения грунта (см/с):

$$U_0 = \sqrt{\frac{V_P}{\gamma}\left(1 - \frac{4}{3}\cdot\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)^2} \cdot K_0^{-2} = 12{,}5, \quad (2)$$

где V_P и V_S – скорости распространения соответственно продольных (5,9 км/с) и поперечных (3,54 км/с) волн; γ – обьемная масса породы, т/м^3,
а в точке A_1

$$U_1 = U_0 \exp[-\alpha_1(f)\cdot r_1] = 0{,}314, \quad (3)$$

где $\alpha_1(f)$ = 4,03·10^{-3} – поглощение энергии волны в зависимости от частоты колебаний на участке подстилающего слоя скальных пород O–A$_1$; r – расстояние между точками O и A$_1$ (r_1 = 915 м).

При преломлении волны в слой II коэффициент преломления будет равным

$$K_1 = \frac{2N_1}{N_1 + N_2} = 1{,}14. \quad (4)$$

Таким образом, скорость колебания грунта в точке A_2 равна 0,375 см/с, а в точке Б$_2$

$$U_2 = 0{,}357\exp[-\alpha_2(f)\cdot r_2] = 0{,}184 \text{ см/с}, \quad (5)$$

где $\alpha_2(f)$ = 4,34·10^{-3} – поглощение энергии волны в слое II; r_2 – толщина слоя II (r_2 = 150 м).

При преломлении волны в слой III коэффициент преломления K_2, вычисленный по формуле, аналогичной (4), будет равным 1,79, а скорость колебания грунта в точке $Б_3$ составляет 0,329 см/с.

В рыхлом слое III СВВ будет распространяться согласно зависимости

$$U_3 = 0{,}329\exp[-\alpha_3(f)\cdot r_3] = 0{,}21 \text{ см/с}, \quad (6)$$

где $\alpha_3(f)$ = 0,465 – поглощение энергии волны в зависимости от частоты колебаний в рыхлом слое; r_3 – толщина слоя III (r_3 = 50 м). Коэффициент поглощения энергии волны α_3 получен из экспериментальных исследований по распространению СВВ в рыхлых породах Еристовского карьера, имеющих такие же физико-механические свойства, как рыхлые породы действующего карьера Полтавского ГОКа.

Как известно, при отражении волны от свободной поверхности амплитуда ее удваивается, поэтому в точке В$_4$ на свободной поверхности слоя рыхлых пород скорость колебаний грунта будет составлять 0,42 см/с, что практически совпадает с результатом сейсмометрических измерений при проведении экспериментальных работ (0,4 см/с).

Таким образом, показано решение прямой задачи в промышленной сейсмике по известным энергетическим показателям источника излучения взрывных волн и закономерностям их распространения. Определена интенсивность колебаний на свободной поверхности многослойного массива горных пород.

Аналогичным образом можно решить и обратную задачу.

Кстати, при решении обратной задачи можно решить практические вопросы, например, определение устойчивости уступа карьера.

Продемонстрируем решение данного вопроса на следующем примере.

Необходимо определить сейсмобезопасную массу заряда при массовом взрыве в карьере для обеспечения сейсмоустойчивости уступа, сложенного наносными рыхлыми породами (слой III на рисунке). Для решения этой задачи используем те же расчетные данные, что и для прямой задачи.

Согласно нормативным данным уступ карьера со сроком эксплуатации более 5–10 лет, сложенный наносными породами, относится ко второму классу сооружений, а допустимая скорость его смещения составляет 8,2 см/с.

Принимаем в точке $Б_3$ скорость смещения грунта U_3 = 8,2 см/с, а в точке $Б_2$ в слое II скальных пород скорость смещения грунта будет равна

$$U_2' = U_3' \frac{2N_3}{N_3 + N_2} = 1{,}75 \text{ см/с}. \qquad (7)$$

В точке $А_2$ слоя II скорость смещения грунта (см/с) равняется

$$U_2'' = U_2' \cdot \exp\left[\alpha_2(f) \cdot r_2\right]. \qquad (8)$$

В точке $А_1$ подстилающего слоя скальных пород I скорость смещения грунта

$$U_1' = U_2'' \cdot \frac{2N_2}{N_2 + N_1} = 2{,}92 \text{ см/с}. \qquad (9)$$

Зная значения скорости колебания в точке $А_1$ и на границе СОВ (U_0 = 12,5 см/с, так как масса заряда ВВ Q_1 остается неизменной – 3945 кг), определяем расстояние r_1' = 365 м между точкой $А_1$ и новой границей СОВ (точка O_2'), решая зависимость

$$U_0 = U_1' \cdot \exp\left[\alpha_1(f) \cdot r_1'\right]. \qquad (10)$$

Таким образом, при сохранении неизменной массы зарядов в группе 3945 кг минимальное сейсмобезопасное эпицентральное расстояние на горизонте –138 м (между точками A_1 и O_1') по отношению к устойчивости уступа рыхлых пород будет составлять 365 + 85 = 450 м.

Для вычисления других сейсмобезопасных расстояний (м) или масс зарядов (кг) при ведении ВР на горизонте –138 м можно воспользоваться формулой М. А. Садовского (для данных условий коэффициент K = 450) и вычислить интересующий параметр по одной из формул

$$Q_{\text{доп}} = \left(\frac{U_{доп}}{K}\right)^{3/n} \cdot r^3 \quad \text{или} \quad r_c = \left(\frac{K}{U_{\text{доп}}}\right)^{2/3} \cdot Q^{1/3}, \qquad (11)$$

где $U_{\text{доп}}$ – скорость смещения грунта в точке A_1(U_1' = 2,92 см/с); n – показатель степени затухания (n = 1,5).

Необходимо учесть важное обстоятельство, связанное с изменением технологии ВР при массовых взрывах в связи с применением в настоящее время инициирующих средств типа Nonel и зачастую поскважинного инициирования зарядов, что ведет к одновременному взрыванию массы заряда только одной скважины (не считая еще внутрискважинного замедления). Если исходить из этой технологии, то максимальный заряд одной скважины при отработке горизонта –138 м составляет 400 кг. В этом случае минимальное сейсмобезопасное эпицентральное расстояние на рассматриваемом горизонте по отношению к устойчивости уступа рыхлых пород по формуле (11) будет составлять 205 м.

Выводы

1. Приведены формула и размеры сейсмического очага взрыва и радиуса сейсмоизлучателя для различных горных пород.

2. Показано в реальных условиях и на конкретном примере решение прямой и обратной задачи по распространению сейсмовзрывной волны в многослойном массиве горных пород.

3. Приведен пример определения сейсмобезопасных параметров массового взрыва в карьере, гарантирующих устойчивость карьерного уступа.

1. *Ершов И. А.* Сопоставление колебаний разной интенсивности, записанных на лессах разной мощности / И. А. Ершов // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1975. – № 17. – С. 4–8.

2. *Салганик М. П.* Об эмпирических моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях / М. П. Салганик // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1982. – № 23. – С. 12–15.

3. *Berzon J. S.* Experimental Investigation of Dynamic Parameters of Seismic Waves in Real Media / J. S. Berzon // Studia geoph. et geodet. – 1959. – № 3. – С. 6–9.

4. *Епинатьева А. М.* Изучение продольных сейсмических волн, распространяющихся в некоторых реальных средах / А. М. Епинатьева // Тр. ИФЗ Ан СССР. – 1960. – 382 с.

5. *Андреев С. Г.* Физика взрыва / С. Г. Андреев, А. В. Бабкин // Перераб. под ред. Л. П. Орленко – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.

6. *Грибанова Л. П.* Исследование параметров взрывов и сейсмобезопасных расстояний на карьерах Кривбасса: дис. … канд. техн. наук: 05.15.03 / Л. П. Грибанова – ИФЗ АН СССР. – М., 1975. – 153 с.

7. *Аптикаев Ф. Ф.* Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах / Аптикаев Ф. Ф. – М.: Наука, 1969. – 104 с.

8. *Гурвич И. И.* Экспериментальные амплитудные характеристики взрыва / И. И. Гурвич и др. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1966. – № 3. – С. 23–27.

9. *Рулев Б. Г.* Динамические характеристики сейсмических волн при подземных взрывах / Б. Г. Рулев // Взрывное дело. – 1968. – № 64/21. – С. 19–26.

10. *Ромашов А. Н.* О природе некоторых волн в грунте, возбуждаемых подземным взрывом / А. Н. Ромашов // Взрывное дело. – 1968. – № 64/21. – С. 26–30.

11. *Сейсмическое действие взрыва* в горных породах /[А. А. Кузьменко, В. Д. Воробьев, И. И. Денисюк, А. А. Дауетас]. – М.: Недра, 1990. – 173 с.

12. *Сейсмический эффект взрывов* на выброс в нескальных связных грунтах / Н. В. Кузьмина, А. Н. Ромашов, Б. Г. Рулев [и др.] // Тр. ИФЗ АН СССР. – 1962. – № 6. – С. 3–72.