УДК 622.235.535.2

А.Н.ХОЛОДИЛОВ, С.Г.ГЕНДЛЕР, Е.Ю.ВИНОГРАДОВА, А.С.ШИЛЯЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Охарактеризованы проблемы сейсмического действия взрыва на тоннель. Предложена методика определения параметров в формуле М.А.Садовского для скорости смещения сейсмических волн по результатам измерений в одной точке велосиграмм сейсмических колебаний от последовательных короткозамедленных взрывов. Установлена корреляция между параметрами. Оценено влияние ошибок определения параметров на вычисление сейсмобезопасной массы заряда взрывчатого вещества.

Problems of seismic action of explosion on a tunnel are characterised. The technique of definition of parameters in Sadovsky's formula for velocities of displacement of seismic waves by results of measurements in one point velocity time histories seismic fluctuations from the consecutive shortly slowed down explosions is offered. Correlation between parameters is established. Influence of mistakes of definition of parameters on calculation seismically safe weight of a charge of explosive is estimated.

Реконструкция и возведение железнодорожных тоннелей приводят к необходимости учета ряда дополнительных условий. К ним можно отнести сейсмические эффекты от взрывных работ в строящемся тоннеле, и от массовых взрывов на карьерах горных предприятий.

Практически сейсмическую безопасность при строительстве тоннелей оценивают по ряду инструментальных измерений скорости смещения грунта вблизи обделки, а также самой обделки. Результаты этих измерений лежат в основе прогноза кинематических и динамических параметров колебаний для каждого элемента тоннеля.

Следует отметить еще одну проблему, связанную с прогнозом остаточного ресурса тоннеля с учетом сейсмических воздействий малой интенсивности на обделку тоннеля. Так, снижение прочности бетона может происходить при воздействии на него допредельных нагрузок (в том числе обусловленных прохождением поездов в тоннеле) в результате генерации новых микротрещин и развития старых.

Таким образом, можно выделить следующие проблемы, связанные с воздействием взрывных работ на тоннель:

– повышение достоверности прогнозного значения скорости смещения;

– установление связи между скоростью смещения и напряжениями для конкретной геометрии обделки;

– прогноз остаточного ресурса тоннеля.

В настоящей работе рассматривается один из путей решения первой проблемы на примере анализа сейсмического воздействия на тоннель массового взрыва, проводимого на карьере.

Прогноз значения скорости смещения основан на формуле М.А.Садовского, устанавливающей связь между скоростью смещения грунта в точке наблюдения, массой заряда m и расстоянием r в виде

$$u = K\left(\frac{r}{\sqrt[3]{m}}\right)^{-n}, \qquad (1)$$

где K и n – параметры сейсмического действия взрыва, K – коэффициент, зависящий от условий взрывания и распространения колебаний (коэффициент сейсмичности); n – показатель затухания скорости смещения.

Инструментальной оценкой скорости смещения в уравнении (1) служит максимальное значение модуля полного вектора смещения

$$u_m = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}\ , \qquad (2)$$

где u_z – максимальная скорость в вертикальном направлении; u_x, u_y – то же по направлениям: вдоль прямой от точки взрыва до точки наблюдения и перпендикулярно прямой; компоненты полного вектора смещения соответствуют одному и тому же моменту времени.

Для определения параметров K и n в случае проведения экспериментального взрыва требуется, как минимум, две точки регистрации. Для получения более надежных значений параметров желательно иметь набор значений u_m для разных масс зарядов, расстояний, отвечающих реальным условиям взрывания.

В случае массового взрыва на карьере для одной точки регистрации определяется лишь одно значение u_m. При этом в качестве m в уравнении (1) принимается эффективная масса заряда, определяемая массой заряда, приходящегося на одну ступень замедления, с учетом интервала замедления, например, по правилу «двух третей» [1, 3]. Ввиду того, что информация о временн□м изменении компонент полного вектора скорости смещения практически не используется, для надежного определения параметров K и n требуется большой объем инструментальных измерений.

Будем рассматривать массовый взрыв как последовательность частично взаимодействующих с точки зрения наложения сейсмовзрывных волн мгновенных взрывов, характеризующихся своими массами заряда m_i и средними расстояниями до точки регистрации сейсмовзрывных колебаний r_i. Таким образом, для текущей ступени замедления сумма масс зарядов всех скважин есть m_i, а среднее арифметическое расстояний от скважин до точки регистрации – r_i.

В настоящее время используется аналого-цифровое преобразование компонент u_x, u_y, u_z, измеряемых в процессе массового взрыва с заданным временем дискретизации. Это позволяет провести предварительную фильтрацию компонент методами низкочастотной цифровой фильтрации. При этом частота среза фильтра должна выбираться не выше 50 Гц, что позволяет уменьшить шумы, не искажая сейсмический сигнал. Далее производится восстановление последовательности значений полного модуля скорости смещения по формуле (2). Затем эта последовательность разбивается на интервалы, количество которых равно числу ступеней замедления за вычетом единицы. Внутри каждого интервала находится максимальное значение полного вектора скорости смещения, принимаемое за верхнюю оценку u_{mi}. Очевидно, что совокупность u_{mi} представляет собой огибающую полного вектора скорости смещения.

В качестве низкочастотного фильтра может быть применен цифровой фильтр, использующий z-преобразование. Теория таких фильтров описана во многих руководствах по обработке дискретных сигналов, например [2], а сам фильтр реализован в виде стандартных функций в ряде программных пакетах, например в пакете MatLab. Применение методов цифровой фильтрации позволяет удовлетворить условию частично взаимодействующих мгновенных взрывов, так как каждая текущая реализация сигнала, полученная после фильтрации, содержит информацию о предыдущих состояниях сигнала.

Зная значения u_{mi}, m_i, r_i, аппроксимирующую функцию вида (1), можно найти параметры K и n путем решения нелинейной задачи методом наименьших квадратов. Однако ближайшие значения полных векторов скорости смещения в совокупности u_{mi} могут резко отличаться друг от друга, что приведет к увеличению среднеквадратичной ошибки метода и невозможности удовлетворительного определения параметров K и n. Подобную ситуацию можно устранить, если произвести предварительную фильтрацию совокупности u_{mi}, используя низкочастотный фильтр с частотой среза $f_{\text{ср}}$, не превышающей обратного значения интервала времени замедления.

Проиллюстрируем вышеизложенную методику на конкретном примере. Для определения уровня сейсмовзрывного воздействия на строящийся железнодорожный тоннель вблизи границ карьера Коршунов-

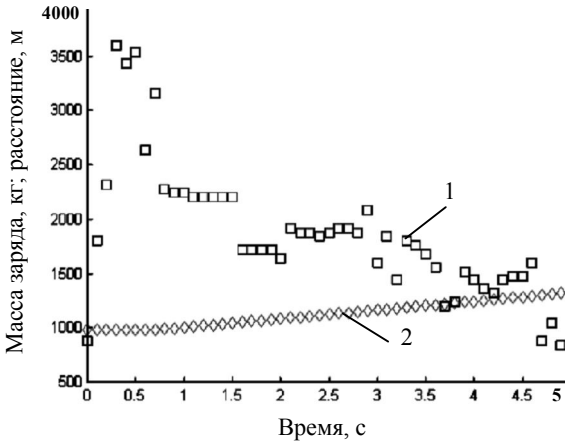


Рис.1.Изменение массы зарядов (1) и средних расстояний (2) в процессе массового взрыва

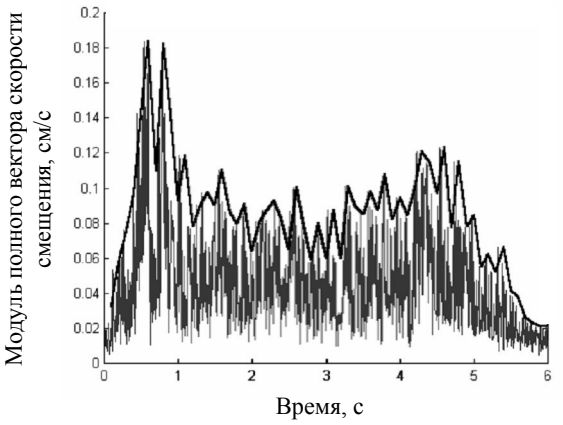


Рис.2. Изменение модуля полного вектора смещения в процессе массового взрыва по результатам измерений компонент вектора (тонкая линия), огибающая (жирная линия)

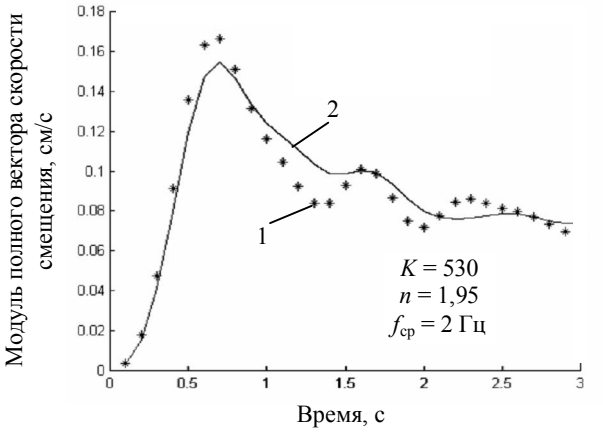


Рис.3. Сглаженная зависимость модуля полного вектора скорости смещения (1) и ее аппроксимация (2)

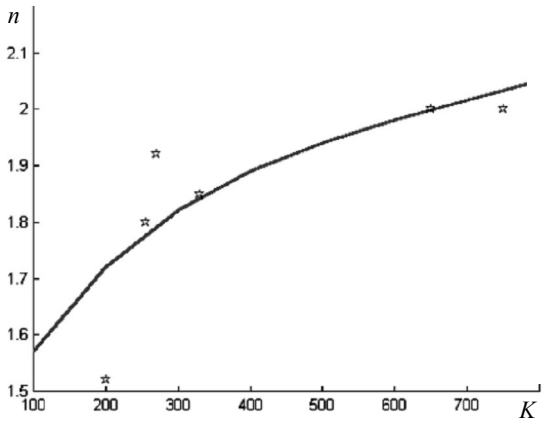


Рис.4. Пары значений коэффициента сейсмичности и коэффициента затухания [3], обеспечивающие наилучшую аппроксимацию огибающей модуля полного вектора смещения (сплошная линия)

ского ГОКа были проведены замеры компонент полного вектора скорости смещения от массового взрыва с интервалами времени замедления между ступенями 100 мс (всего было 50 ступеней). Масса зарядов и средние расстояния для каждой ступени замедления показаны в виде дискретных временны́х зависимостей на рис.1. Тоннель проходит в горных породах, представленных преимущественно алевритистыми доломитами слабой и средней крепости очень низкой и низкой прочности. Регистрация сейсмического сигнала велась с помощью электродинамических сейсмоприемников СВ-30 на цифровой осциллограф TDS3034B с временем дискретизации 1 мс.

Результаты измерений представлены на рис.2 в виде зависимостей модуля полного вектора скорости смещения и ее огибающей от времени. Как следует из рисунка, огибающая не может быть аппроксимирована функцией вида (1) с надежными параметрами K и n. Поэтому проводилось дополнительное сглаживание ее с помощью низкочастотного цифрового фильтра, результаты фильтрации представлены на рис.3.

Для широкого диапазона частот среза фильтра параметры K и n аппроксимирующей функции практически не зависят от частоты среза, в то время как среднеквадратичная ошибка растет по мере увеличения частоты среза. При задании начального

приближения для K больше 400 для каждого значения K определяется оптимальное значение n, но при этом среднеквадратичная ошибка практически не изменяется. Кроме того, относительная ошибка определения коэффициента сейсмичности существенно выше ошибки определения коэффициента затухания, что имеет место в обычной практике [4].

Данные по K и n [3] для пород с похожими скоростями распространения продольных акустических колебаний удовлетворительно ложатся на зависимость оптимальных пар K и n (рис.4), что, с одной стороны, свидетельствует о существовании корреляционной связи между K и n, с другой, – позволяет воспользоваться формулой, соответствующей скорости смещения [1], для нахождения начального приближения по K:

$$K = 1000 \sqrt[3]{\frac{\tilde{N}_p}{\rho}\left(1 - \frac{4}{3}\frac{C_s^2}{C_p^2}\right)^2}, \qquad (3)$$

где C_p и C_s – скорость продольных и поперечных волн в грунте, м/с; ρ – плотность грунта, кг/м^3.

Для условий регистрации по данным геологических изысканий алевритистые породы характеризуются следующими значениями физико-механических параметров: C_p = 2600 м/с, C_s = 1750 м/с, ρ = 2700 кг/м^3, откуда K = 530.

Практически важно знать сейсмобезопасную массу заряда одной ступени, которую можно определить по формуле

$$m_{\tilde{n}\acute{a}} = \left(\frac{u_{\tilde{i}\eth}}{K}\right)^{3/n} r^3, \qquad (4)$$

где $u_{\text{пр}}$ – предельно допустимая скорость смещения. Как видно из формулы (4), выбор различных пар K и n не приводит к значительному изменению сейсмобезопасной массы. Например, для фиксированных значений $u_{\text{пр}}$ и r отношение $\dfrac{m_{\tilde{n}\acute{a}}(K = 300;\, n = 1{,}82)}{m_{\tilde{n}\acute{a}}(K = 600;\, n = 1{,}98)} = 1{,}34$.

Таким образом, используя вышеприведенную методику, даже по результатам измерений скорости в одной точке регистрации можно давать прогнозные оценки сейсмического действия массовых взрывов с аналогичными интервалами замедления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богацкий В.Ф.* Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов // Взрывное дело. 1983. № 85/42. С.201-213.

2. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

3. *Мосинец В.Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. 271 с.

4. *Шуйфер М.И.* Исследование сейсмического эффекта взрыва на строительство гидросооружений // Взрывное дело. 1983. № 85/42. С.132-137.