

ВЗРЫВНЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ СЕЙСМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ

О. А. Вовк, асп. (НТУУ “КПИ”)

Розглянуто технологію влаштування сейсмозахисних екранів вибуховим методом шляхом утворення порожнин вибухами вертикальних свердловинних зарядів, розташованих на певній відстані один від одного. Отримані порожнини заповнюються поглинальним пористим матеріалом. Наведено розрахункові залежності для визначення коефіцієнта екранування при проходженні сейсмічної хвилі крізь сейсмозахисну перешкоду.

При ликвидации просадочных свойств лессовых грунтов взрывным способом в городских условиях, а также в результате горных ударов на предприятиях горнодобывающей промышленности возбуждаются сейсмические колебания, представляющие опасность для объектов, окружающих источник этих колебаний. В ряде случаев для снижения интенсивности сейсмических волн требуется проведение комплекса технических мероприятий, одним из которых является устройство на пути распространения волн противосейсмических экранов в виде глубоких щелей, заполненных пористым звукопоглощающим материалом. В мягких сжимаемых породах такие щели могут создаваться взрывным способом. Они могут быть непрерывными (рис. 1, а), прерывистыми (пунктирными) одно- или двухрядными (рис. 1, б, 1, в). Технология их получения заключается в бурении цепочки сближенных вертикальных скважин (рис. 1, з, 1, е), их заряджании и взрывании. Образовавшиеся вокруг зарядов полости в зависимости от расстояния между скважинами могут создавать сплошную щель постоянного сечения (при расстоянии $l = r_n$) или состоящую из отдельных полостей, соединенных более узкими щелями (рис. 1, е). Эти щели, заполненные материалом с меньшей акустической жесткостью, чем окружающая среда, по которой движется сейсмическая волна, отражают и преломляют падающую волну. Это объясняется тем, что на границе раздела двух сред с разными акустическими жесткостями пород падающая волна вызывает два рода преломленных и отраженных волн: поперечные и продольные, подчиняющиеся следующей закономерности

$$\sin \varphi / v_{p_1} = \sin \beta_p / v_{p_2} = \sin \beta_s / v_{s_2} = \sin \varphi_p / v_{p_1} = \sin \varphi_s / v_{s_1}, \quad (1)$$

где v_{p_1} , v_{p_2} – скорости падающей и преломленной продольных волн; v_{s_1} , v_{s_2} – скорости падающей и преломленной поперечных волн; β_s – угол, образуемый с нормалью к границе раздела лучом поперечной преломленной волны.

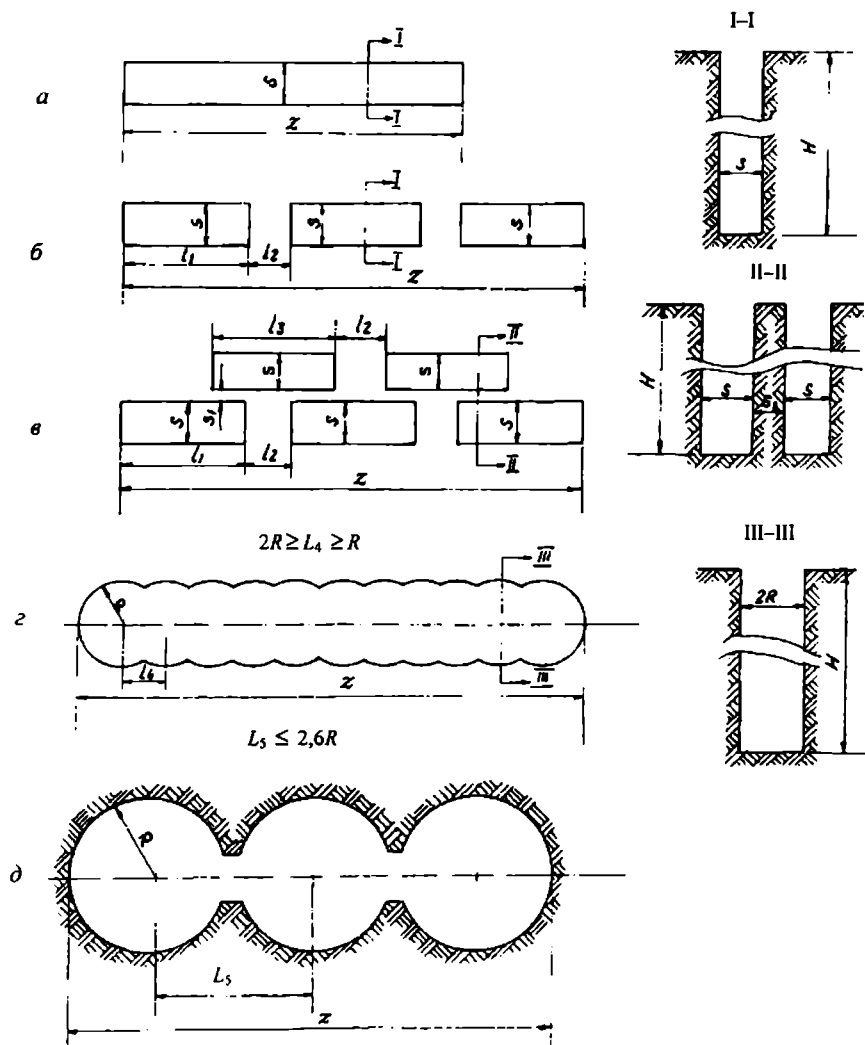


Рис. 1. Конструкции сейсмозащитных экранов: *a* – сплошная щель; *б* – пунктирный однорядный экран; *в* – пунктирный двухрядный экран; *г* – экран постоянного сечения, полученный взрывным способом; *д* – экран переменного сечения, полученный взрывом скважинных зарядов с увеличенным расстоянием между ними

Поскольку поперечные колебания обычно по интенсивности уступают продольным, рассмотрим только параметры продольных волн и уравнение (1) перепишем в виде

$$\sin \varphi / v_{p_1} = \sin \beta_p / v_{p_2} = \sin \varphi_p / v_{p_1}. \quad (2)$$

Здесь φ – угол между лучом распространения падающей волны и нормалью к границе раздела двух сред; φ_p – угол, образуемый с нормалью к границе раздела лучом отраженной волны; β_p – угол, образуемый с нормалью к границе раздела лучом продольной преломленной волны; β_s – угол, образуемый с нормалью к границе раздела лучом поперечной преломленной волны.

$$v_{p_2} = v_{p_1} \sin \beta_p / \sin \varphi. \quad (3)$$

Оценку степени экранизации можно осуществлять по двум параметрам: по отношению скоростей падающей волны до и после прохождения ею преграды, и по соотношению давления (напряжения) в волне до и после прохождения экрана. Коэффициент прохождения волны K_{np} при нормальном падении на вертикальную преграду будет равным [6]

$$K_{np} = 2\rho_1 v_{p_1} / (\rho_2 v_{p_2}) + \rho_1 v_{p_1}, \quad (4)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности соответственно первой и второй среды.

Коэффициент экранизации K_s может быть определен из выражения

$$K_s = \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{(Z_1 + Z_2)^2}{4Z_1 Z_2}, \quad (5)$$

где K_1, K_2 – коэффициент преломления на границах различных сред (среда–преграда, преграда–среда); Z_1, Z_2 – акустическая жесткость массива и экрана.

В данной работе за коэффициент снижения интенсивности сейсмических колебаний принимаем величину отношения скорости смещения частиц грунта в волне после прохождения экрана (U_3) и до экрана (U_1). В ряде случаев целесообразно оценивать снижение интенсивности волны по фактору напряжения на фронте.

Предлагаемый способ создания сейсмозащитных экранов имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при оценке его эффективности. Он характеризуется наличием по обе стороны ряда полостей, заполненных пористым материалом, уплотненной зоны грунта с акустическими свойствами, отличающимися от свойств грунта в естественном состоянии. Кроме того, создание одинаковой по ширине щели в ряде случаев невозможно, и чаще всего она выполняется по схеме, представленной на рис. 1, е), то есть поперечные размеры материала, заполняющего экран, имеют максимум и минимум. Аналогично изменяется и толщина уплотненной зоны впереди и позади экрана.

В недостаточно устойчивых грунтах, склонных к обвалу боковых стенок, практикуется применение так называемых “пунктирных” прерывистых конструкций (см. рис. 1, б, в), каждый из “пунктиров” которых представляет

собой полость овального сечения, полученную взрывом двух–трех сближенных скважин. Эти обстоятельства приносят специфику в методику расчетов, которую необходимо учитывать.

Известно [1], что амплитуда сейсмической волны за вертикальной преградой является функцией ряда параметров, а именно:

$$A = A_0 f_1(Z_1, Z_2) f_2(d_n / \lambda_n) f_3(\varphi) f_4(\sigma), \quad (6)$$

где d_n – толщина щели; λ_n – длина волны; φ – угол падения волны на преграду; σ – напряжение на фронте волны.

Как видим, помимо свойств материала заполнителя, важными факторами, влияющими на искомый коэффициент экранирования, являются геометрические размеры экрана и их соотношение с длиной падающей волны.

При взрывании цепочки скважинных зарядов массив подвергается деформациям. Поле деформаций имеет сложный характер и его размеры (как и размеры самой полости) зависят от физико-механических свойств грунтов и параметров взрывного импульса, которые определяются свойствами ВВ, конструкцией заряда, способом взрывания и другими факторами. На параметры щели и поля деформаций влияет относительное расстояние между зарядами (рис. 2). Из рисунка следует, что при расстоянии между зарядами 1,5–2 диаметра полости формируются равномерно вдоль экрана напротив полостей и промежутков между ними (рис. 2, а). Методика расчета параметров щели изложена в работе [2], в которой дано соотношение между шириной щели, расстоянием между зарядами, линейной плотностью ВВ и сжимаемостью грунта.

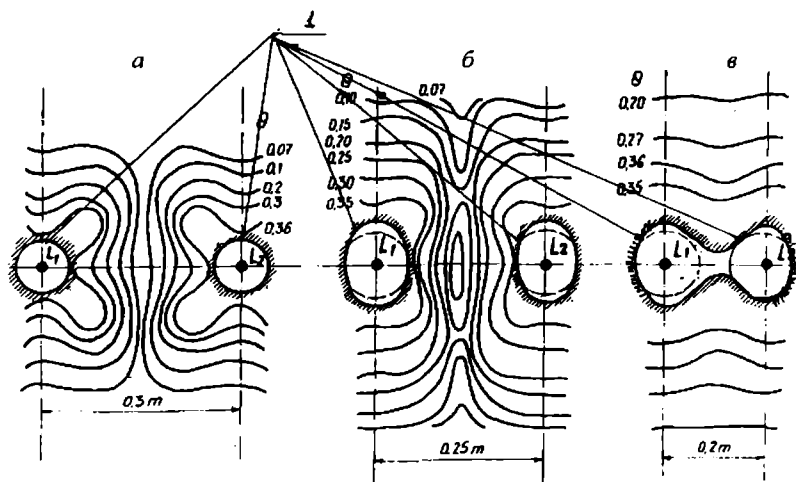


Рис. 2. Поле деформации при взрыве спаренных цилиндрических зарядов при разных коэффициентах сближения: l – полость; L_1, L_2 – заряды

Для лессовых грунтов эта зависимость запишется как

$$a_c = 1,225 \sqrt{C_n} - 0,172 B_{\min}, \quad (7)$$

где a_c – расстояние между скважинами; B_{\min} – ширина щели в самом узком месте между полостями; C_n – линейная плотность ВВ.

Расстояние между зарядами a_c , исходя из необходимости получения ширины щели между полостями не менее r_n , то есть при $B_{\min} = r_n$. В этом случае (см. рис. 2) вдоль щели образуется практически равномерная уплотненная зона. На рис. 3 приведена расчетная схема для определения параметров сейсмических волн в точке О при их движении в слоистой среде от источника возмущения до этой точки. На схеме $r_2 = r_3$ – толщина уплотненной зоны М, СД – толщина поглощающего материала. Свойства экрана зависят от относительной плотности, выражаемой через коэффициент рыхления $K_p = 1/(1 - n_p)$ и могут иметь следующие значения (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость параметров падающей и преломленной сейсмической волны от плотности материала экрана

Коэффициент разрыхления K_p	1	1,2	1,3	1,4	1,6	2
Коэффициент трещинной пустотности $n_{тр}$	1	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5
Относительная плотность материала экрана ρ_s/ρ	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Относительная скорость распространения волны в экране V_s/V_n	1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,15
Относительное волновое сопротивление $\rho_s V_s/\rho V$	1	0,63	0,32	0,21	0,12	0,075

Напряжение на фронте волны изменяется с расстоянием по закону

$$\sigma_i = \sigma_0^{-\alpha r}, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots n$; α – коэффициент поглощения в продольной волне, равный

$$\alpha = \frac{2\pi f}{v_p}. \quad (9)$$

Соотношение этих коэффициентов в продольной и поперечной волне имеет вид [4]

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_s} = \frac{4}{3} \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^3. \quad (10)$$

Используя соотношение (8), запишем согласно схеме на рис. 3:

а) на участке r_1 (от источника до границы уплотненной зоны)

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{-\alpha_1 r_1}; \quad (11)$$

б) на участке r_2 (от начала уплотненной зоны до границы полости)

$$\sigma_2 = K_1 \sigma_1 = K_1 \sigma_0 e^{-\alpha_1 r_1}; \quad (12)$$

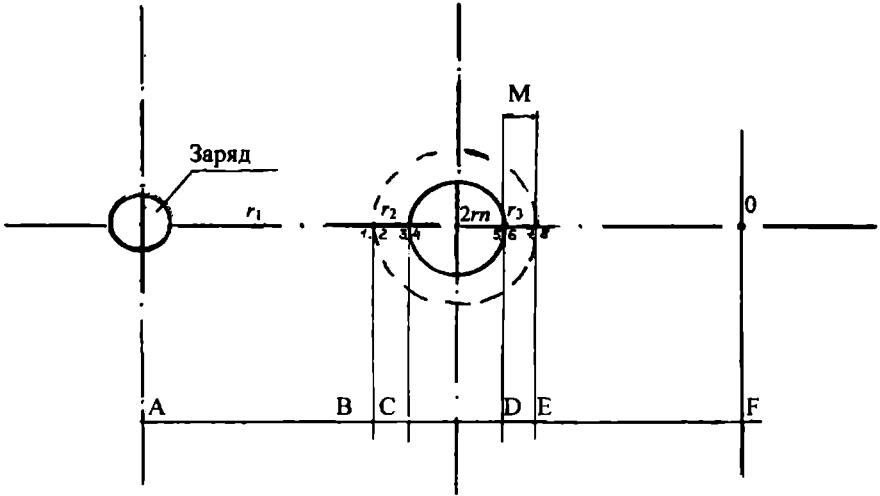


Рис. 3 Расчетная схема определения коэффициента экранизации сейсмических волн: 1...8 – границы сред с различными свойствами; M – толщина уплотненной зоны

Записав по аналогии для других участков выражения для $\sigma_3 \dots \sigma_8$, принимая в этих выражениях $e^{-\alpha_2 r_2} = e^{-\alpha_3 r_3} = e^{-\alpha_4 r_4}$, $\alpha_1 = \alpha_4$ и обозначив

$$K_1 K_2 K_3 K_4 = K, \quad (13)$$

определим напряжение в точке О:

$$\sigma^0 = K \sigma_0 e^{-[\alpha_1(\eta+r_2)+2\alpha_2 r_3 + \alpha_3 2r_4]}. \quad (14)$$

Для определения начального напряжения σ_0 воспользуемся соотношением Ландау–Лифшица:

$$\sigma = U v_s \left(\frac{\gamma}{g} \right). \quad (15)$$

Принимая напряжение σ на фронте волны в начале зарождения их возмущений равным пределу прочности грунта на сжатие, получим

$$\sigma_0 = U_{\max} v_S \left(\frac{\gamma}{g} \right); \quad (16)$$

$$U_{\max} = 2 \pi f a, \quad (17)$$

где U_{\max} – максимальная массовая скорость на границе излучателя; a – амплитуда колебаний.

Подставляя в (16) вместо v_S его значение из (8), получим:

$$U_{\max} = \frac{0,0066 \gamma \sigma_0}{\gamma_{\text{ск}} - 1,19}, \quad (18)$$

где $\gamma_{\text{ск}}$ – плотность скелета породы.

Приняв в качестве показателя f значение частот, при которых спектр сейсмических колебаний достигает максимума (f_{\max}), получим

$$U_{\max} = 2 \pi f_{\max} a. \quad (19)$$

Максимум частотного спектра зависит от размеров сейсмоизлучателя r_n и скорости продольной волны [1] и рассчитывается по формуле

$$f_{\max} = 3 + 0,1 (v_p / r_n). \quad (20)$$

Согласно [2], за размеры излучателя r_n можно принять радиус уплотненной зоны при взрыве заряда радиусом r_z . Для определения коэффициентов поглощения необходимо знать период колебания, который в поверхностной волне равен

$$T_R = 0,66 \sqrt[6]{Q_{\text{ВВ}}} \left(\frac{r}{\sqrt[3]{Q_{\text{ВВ}}}} \right)^{0,11} \quad (21)$$

Для нахождения α подставим $f = 1/T_R$ в формулу (9), а скорости участков получим из выражения [5]:

$$v_i = \frac{v_1 v_2}{n_{\text{тр}} v_2 + n_{\text{тр}} v_1}, \quad (22)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ (см. рис. 3); v_1 – скорость упругой волны в воздухе, $v_1 = 330$ м/с; v_2 – скорость упругой волны в твердом материале наполнителя.

Эффективность гашения энергии сейсмической волны зависит от отношения ширины экрана h к длине волны λ_R . Табл. 2 дает представление о степени влияния показателя h/λ_R на снижение энергии волны.

Таблица 2. Зависимость отношения энергии преломленной волны к энергии падающей волны от параметра h/λ_R

Отношение ширины экрана к длине волны h/λ_R	0,05	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8
Отношение энергии преломленной волны к энергии падающей волны $E_{\text{пр}}/E_{\text{пад}}$	0,65	0,5	0,7	0,55	0,35	0,33

Длина волны λ_R определяется как произведение скорости поверхностной волны v , на период колебаний T_R .

$$\lambda_R = v \cdot T_R. \quad (23)$$

Радиус цилиндрической полости принимаем согласно [8]:

$$r_n^u = 150,8 K_m (\sqrt{\gamma_{\text{ск}} - 1,19} / (30 - W)) r_3^u, \quad (24)$$

а радиус уплотненной зоны определяем из выражения

$$r_{3,y} = 0,04 K_m (\sqrt{30 - W} / 0,0027) r_3^u, \quad (25)$$

где K_m – масштабный коэффициент взрыва, равный

$$K_m = 1,04 - 1,4 r_3^u. \quad (26)$$

Расчет параметров экранизации следует производить по двум профилям: при толщине щели, заполненной пористым материалом, равной $2r_n$, и при B_{min} в формуле (7), равном r_n , а значения r_2 и r_4 – по формуле (25), имея в виду, что в формуле (22) коэффициент трещинной пустотности $n_{\text{тр}}$ принимается меньшим, чем у ненарушенного массива. Однако здесь следует учитывать то обстоятельство, что уплотненная зона грунта имеет систему трещин (согласно [9], объем трещин достигает 16 % объема полости), заполненных материалом с коэффициентом трещинной пустотности 0,5. Как следует из рис. 2, в, значение объемной деформации вблизи стенки полости может достигать 0,35. Если принять объемную деформацию на границе с ненарушенным массивом равной 0,01, то можно с некоторой степенью условности принять коэффициент пустотности в уплотненной зоне в среднем 0,18, а с учетом трещиноватости зоны вокруг полости – 0,2. Этот показатель для лессов равен 0,23–0,29 [9].

Выводы

Сооружение сейсмозащитных экранов для снижения интенсивности сейсмических волн может осуществляться взрывным способом в виде системы полостей, образованных взрывом вертикальных скважинных зарядов. Эффективность преграды, оцениваемая отношением напряжений на фронте

сейсмической волны до преграды (σ_1) и за преградой (σ_n), зависит от отношения ширины экранирующей щели к длине волны, а также поглощающих способностей этого материала. Оценка эффективности преграды может осуществляться по соотношениям энергии или массовой скорости падающей и преломленной волны, вычисленных по имеющимся в литературе методикам [1], которые в настоящей работе не приводятся. Глубина сейсмозащитной преграды должна превышать глубину заложения источника сейсмических колебаний.

1. Кузьменко А. А., Воробьев В. Д., Денисюк И. И. и др. Сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1990. – 173 с.

2. Вовк О. А. Применение энергии взрыва для создания противооползневых инженерных объектов // Вісник Черкаського інженерно-технічного інституту. – 2000. – № 4. – С. 48–54.

3. О влиянии горных ударов на поверхностные здания и сооружения / О. А. Вовк, Н. В. Ивкина, М. Кугель, Е. Завиша // Материалы международной конференции «Przemysł wydobywczy – teraźniejszość i przyszłość». – Kraków. – 1999. – S. 369–376.

4. Берзон И. С. и др. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 511 с.

5. Ржевский В. В. и др. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1973. – 286 с.

6. Гурвич И. И. Сейсморазведка. – М.: Недра, 1975. – 408 с.

7. Цейтмен Я. и др. Зона разрушенной породы в граните как экран для сейсмозрывных волн // Взрывное дело. – М.: Недра. – 1970. – № 69/26. – С. 26–34.

8. Вовк О. А. Исследование параметров зоны действия взрыва зарядов в лессовых грунтах // Прикладная гидромеханика. – 2002. – № 1. – С. 1–6.

9. Смирнов В. И., Голицинский Д. М., Мельников Л. Л. Строительство подземных сооружений с использованием камуфлетных взрывов. – М.: Недра, 1981. – 21 с.

УДК 622.01:518.12

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ СЕРЕДНЬОГО ПРОЦЕНТНОГО ВМІСТУ КОРИСНОГО КОМПОНЕНТА В ГІРНИЧІЙ МАСІ НА КОНВЕЄРІ

С. А. Смоляйска, інж. (Криворізький технічний університет)

Предложен метод прогнозирования содержания полезного компонента в горной массе на конвейере, основанный на численном моделировании временных рядов данных измерений. Показано, что подобные временные ряды не являются