

ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ

А. А. Вовк, докт. техн. наук, Л. Н. Леванкова, инж. (ИГМ НАН Украины)

Розглянуто методики визначення параметрів поверхневих сейсмічних хвиль, які порушуються вибухом одиночних, однорядних і багаторядних свердловинних зарядів. Показано, що по поздовжньому профілю свердловин сейсмічна хвиля формується не усіма зарядами, а лише їхньою ефективною частиною. У перпендикулярному напрямку сейсмічна хвиля в кожній точці є суперпозицією хвиль від окремих свердловинних зарядів, що приходять у точку під різним кутом і з деяким зсувом по фазі. При підриванні багаторядних свердловинних зарядів у розрахунок приймається їх загальна маса, але скоригована рядом коефіцієнтів, що враховують умови ведення вибухових робіт. Указано на можливість оцінки сейсмічної інтенсивності за фактором масової швидкості частинок і граничних деформацій.

Массовые взрывы сопровождаются сейсмическими колебаниями в основном двух типов: продольные сейсмические (P) и поверхностные (R) волны. Кроме того, в окружающую среду излучаются волны разрежения, вторичные волны, и волны, зарождающиеся на свободных поверхностях трещин.

В действительности волновая картина гораздо сложнее. При движении в двухслойной среде происходит отражение, преломление волны с изменением ее параметров, что иллюстрируется рис. 1.

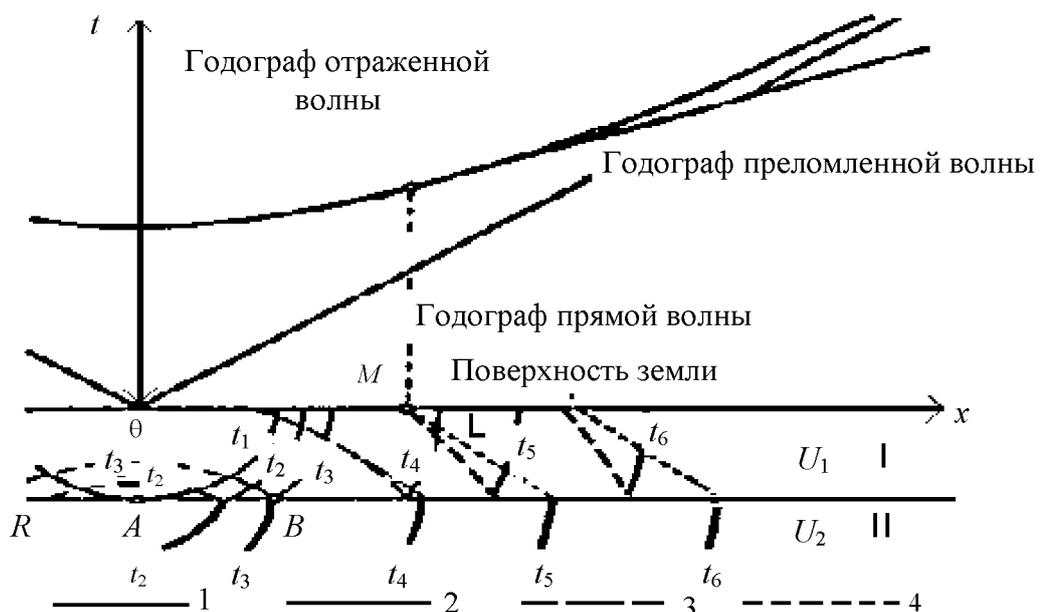


Рис. 1. Фронты и годографы прямой, отраженной и преломленной волн в двухслойной среде [2]: изохромы волны: 1 – падающей; 2 – проходящей; 3 – отраженной; 4 – преломленной

С точки зрения вредного воздействия этих волн на объекты наибольший интерес представляют поверхностные волны, которые на расстояниях более $30\sqrt[3]{Q}$ несут максимум сейсмической энергии [1]. Это связано с тем, что для этих волн характерен низкочастотный спектр колебаний, куда перемещается максимальная плотность энергии.

Сейсмические волны характеризуются рядом параметров: смещением, скоростью и ускорением частиц, периодом и частотой колебаний, фазовой скоростью ($U_{R\tau}^0$), скоростью продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, а также силовыми параметрами (радиальным напряжением, удельным импульсом, плотностью энергии).

Главной опасностью сейсмических волн для защищаемых поверхностных объектов является вероятность разрушения или повреждения последних, а главной производственной задачей – установление безопасных расстояний, гарантирующих целостность объектов.

При анализе параметров сейсмозрывных волн широко используют принцип геометрического и энергетического подобия, выражая закон их движения через приведенную массу заряда ($q_{пр} = \sqrt[3]{g/r}$) или приведенное расстояние ($r_{пр} = r/\sqrt[3]{g}$), позволяющие установить связь между параметрами источника сейсмических колебаний и среды, по которой движется волна в функции расстояния. При этом в качестве основного критерия сейсмоопасности для зданий и сооружений, расположенных вблизи взрывааемых зарядов, в большинстве случаев принимается массовая скорость частиц грунта U .

Наиболее существенными факторами, влияющими на параметры поверхностных волн, являются следующие:

общая масса, конструкция, количество и взаимное расположение зарядов (рассредоточенные однорядные или многорядные);

физико-механические свойства взрывааемых пород, по которым распространяются сейсмические волны;

глубина заложения заряда по отношению к дневной поверхности (заряды рыхления, выброса и вспучивания).

Помимо показателя массовой скорости важной характеристикой сейсмических волн является частотный спектр, преобладающая частота которого на каждом фиксированном расстоянии от источника несет основную долю сейсмической энергии. Это имеет большое значение, так как здания и сооружения являются резонансными системами и избирательно реагируют на сейсмоздействия.

Таким образом, одним из способов снижения сейсмоопасности является регулирование частотного спектра. Наибольшую опасность представляют низкочастотные его составляющие. Известно, что частоты собственных колебаний для наиболее распространенных инженерных конструкций

находятся в пределах $0,2...7$ Гц и, соответственно, период собственных колебаний $T_0 = 5...14$ с.

Степень опасности резонансных явлений оценивается коэффициентом динамичности β ; чем он выше, тем больше вероятность резонанса. При прочих равных условиях с ростом декремента затухания собственных колебаний сооружений и их периода эта опасность снижается. Если период колебаний волны T по сравнению с T_0 мал, то сооружение остается неподвижным и его сейсмостойкость определяется лишь энергетическими параметрами волны или массовой скоростью частиц грунта. При T , близком к T_0 , амплитуда колебаний сооружения достигает максимума и может превысить амплитуду смещения грунта в несколько раз [3], увеличивая вероятность разрушения или повреждения объекта при значениях массовой скорости ниже допустимых.

Следует особо отметить, что до настоящего времени отсутствуют надежные методы оценки и прогнозирования интенсивности сейсмических колебаний от воздействия массовых взрывов.

Практически не работает в этих условиях и принцип энергетического и геометрического подобия. Чаще всего в литературе встречается выражение «принцип геометрического подобия в основном соблюдается». При наличии сейсмограмм определяется величина отклонения от этого принципа, возникающего вследствие влияния технологических особенностей или изменения свойств среды. При этом используется базовая формула М. А. Садовского. Но поскольку в ее правой части все параметры (кроме расстояния) непостоянны, результат подсчетов подгоняется под данные сейсмограмм многочисленными коэффициентами, корректирующими, наряду со свойствами породы, суммарную массу заряда. Однако, если имеется достаточное количество записей на нескольких точках регистрации, их обработка может дать более точные эмпирические зависимости. Для этого необходим постоянно действующий дорогостоящий мониторинг на каждом горном предприятии, что практически неосуществимо.

Основными параметрами, необходимыми для оценки сейсмобезопасности поверхностных зданий, являются: размеры зоны деформации вокруг одиночного цилиндрического заряда $r_{из}$, период колебаний, массовая скорость частиц грунта в зависимости от величины заряда и свойств окружающей среды. Для получения полной картины движения сейсмозрывных волн исследуем три варианта их возбуждения с помощью взрыва:

- а) одиночного цилиндрического вертикального заряда;
- б) одного ряда вертикальных заряженных скважин с определением параметров в продольном и перпендикулярном направлениях;
- в) нескольких рядов скважинных зарядов.

До настоящего времени методика расчета параметров сейсмических волн основывалась на получении эмпирических коэффициентов пропорциональности K между параметрами и энергией источника. Так, например, базовой формулой для расчета массовой скорости до сих пор является зависимость [3]

$$U = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{ВВ}}}}{r} \right)^n = K r_{\text{пр}}^{-n}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ВВ}}$ – суммарная масса заряда; r – расстояние от источника; $r_{\text{пр}}$ – приведенное расстояние; коэффициент затухания n в диапазоне приведенных расстояний до 12 принимается обычно $n = 2$, на более дальние расстояния $n = 1,5$.

М. А. Садовским для случая взрывания зарядов выброса с показателем действия взрыва $n_{\text{в}} = R_0 / W$ предложена эмпирическая зависимость

$$U = \frac{200}{\sqrt[3]{n_{\text{в}}}} \cdot \frac{\sqrt{Q_{\text{ВВ}}}}{r^{1,5}}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2), строго говоря, справедливы лишь для случаев взрывания одиночных сосредоточенных зарядов, хотя применяются рядом авторов и для условий взрывания зарядов других конструкций. Численный размерный коэффициент пропорциональности K является интегральной величиной, учитывающей многие факторы: свойства среды и применяемого ВВ, способ взрывания и т. п., и справедлив лишь для условий, в которых проводились эксперименты. Поэтому весьма своевременными и целесообразными являются попытки получения обобщающих зависимостей, с помощью которых можно заменить эмпирический коэффициент K параметром, основанном на паспортных физико-механических константах (плотность, прочность, коэффициент Пуассона, модуль упругости и т.д.) и динамических характеристиках (скорость продольной и поперечной волн, акустическая жесткость), и имеющим хотя бы полуэмпирическую структуру.

Итак, для случаев взрывания одиночного вертикального цилиндрического заряда линейной плотностью $Q_{\text{л}}$ и длиной l требуемые параметры поверхностной сейсмической волны могут быть найдены из приведенных ниже соотношений, которые отличаются от формул для описания параметров при взрыве сосредоточенных зарядов выброса [4].

1. Период колебаний

$$T_R^{Z,X} = K_{\text{гр}}^R Q_{\text{л}}^{1/6} (0,015l + 1) r_{\text{пр}}^v. \quad (3)$$

Значения эмпирических коэффициентов $K_{\text{гр}}$ и n приведены в табл. 1.

2. Массовая скорость по z -составляющей

$$U_R^z = K_{\text{гр}}^u l^{0,07} Q_{\text{л}}^{0,1} r_{\text{пр}}^n. \quad (4)$$

Таблица 1. Значения коэффициентов в формуле (3) и (4)

Породы	$K_{гр}^R$	ν	$K_{гр}^и$	n
Глина, суглинок	0,065	0,15	68	1,4
Сернистый известняк	0,038	0,18	74	1,5
Гранит	0,014–0,02	0,2	87	1,6

Формула (4) относится к категории полуэмпирических, поскольку согласно [4] в структуру коэффициента n входит паспортная характеристика среды.

Более сложная волновая картина наблюдается при взрывании m вертикальных зарядов длиной l , линейной массой $Q_{л}$ каждый, расположенных в один ряд при расстоянии между ними $a_{скв}$. В этом случае суммарный сейсмический эффект в направлении вдоль линии зарядов зависит, при прочих равных условиях, от величины $a_{скв}$. А расчетная масса заряда не может быть принята равной $Q_{л}lm$, за исключением случая, когда $a_{скв} = 0$. При взрывах таких рассредоточенных (однорядных) зарядов в любой точке массива происходит наложение колебаний от взрывов отдельных зарядов, если они расположены достаточно далеко. Практически это расстояние должно быть больше или равно $2r_{и}$.

Взаимное влияние отдельных зарядов выражается в том, что каждый отдельный заряд массой $Q_{л}l$ по отношению к участию в деформировании грунта может быть заменен эквивалентным зарядом $q_{экр}$, меньшим или равным (когда $a_{скв} \geq 2r_{и}$) $Q_{л}l$. При $a_{скв} < 2r_{и}$ имеет место взаимодействие, выражающееся в затрате энергии на дополнительное разрушение грунта и, соответственно, в потере части сейсмической энергии. При $a_{скв} \geq r_{и}$ $q_{экр} = Q_{л}l$, и общая масса заряда $q_{общ}$, входящая в формулу (1) для расчета массовой скорости, равна $q_{общ} = Q_{л}lm$ (m – количество скважин). В первом случае [4]

$$q_{общ} = q_{экр} (m - 1) + Q_{л}l < Q_{л}lm . \quad (5)$$

На основе обработки экспериментальных и некоторых промышленных взрывов получена формула для определения эквивалентной массы единичного заряда при одновременном инициировании группы зарядов [4]:

$$q_{экр} = Q_{л}l \left[\left(1 - \frac{1}{m^b} \right) a_{от} + \frac{1}{m^b} \right], \quad (6)$$

где b – показатель степени при количестве зарядов, зависящий от свойств среды,

$$b = (3/n_3) - 1, \quad (7)$$

где n_3 – коэффициент затухания сейсмозрывной волны; $a_{от} = a_{скв} / 2r_{и}$ – относительное расстояние между зарядами.

Из формулы (6) следует, что за расчетную общую массу зарядов принимается лишь та масса $q_{\text{экв}}$ зарядов, волны которых приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз по отношению к ближайшему заряду не более 90° или $1/4 T_R$. В дальней зоне влияния взрыва волны от всех взрывааемых зарядов приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз между собой не более 90° , поэтому все амплитуды этих волн суммируются.

Схема к расчету параметров сейсмических волн в продольном профиле, приведена на рис. 2. Из анализа рис. 2 следует, что при расстоянии от крайнего заряда, равном $2l_{\text{зар}}$, сейсмический сигнал формируется лишь двумя скважинами ($m_{\text{эф}} = 2$), а при расстоянии $4l_{\text{зар}}$ ($m_{\text{эф}} = 3$) скорость смещения грунта в поверхностной волне в этом направлении по составляющей z рассчитывается по формуле [4]

$$U_R^z = 60 \left(\frac{r}{(q_{\text{экв}}^R)^{1/3}} \right)^{-1/3} m_{\text{эф}}. \quad (8)$$

В направлении, перпендикулярном ряду скважин, картина будет несколько иной.

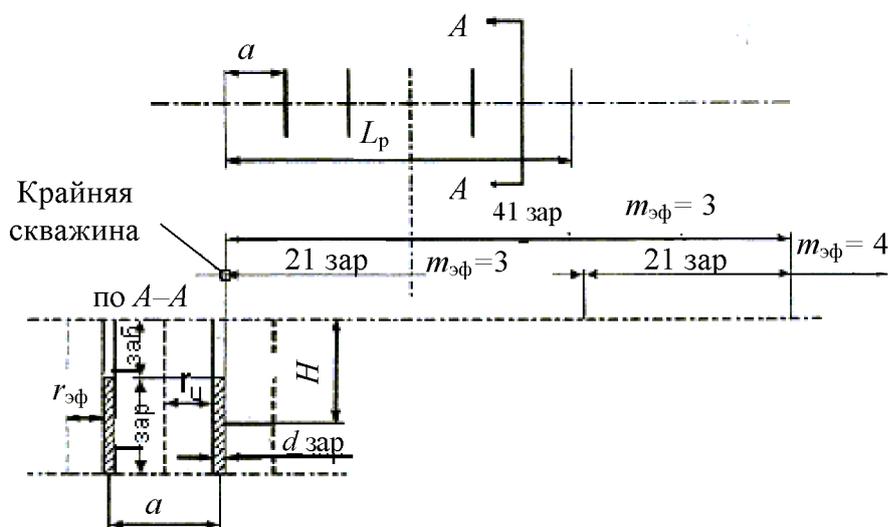


Рис. 2. Схема к расчету параметров сейсмических волн при взрывах скважинных рассредоточенных зарядов (вдоль линии скважин)

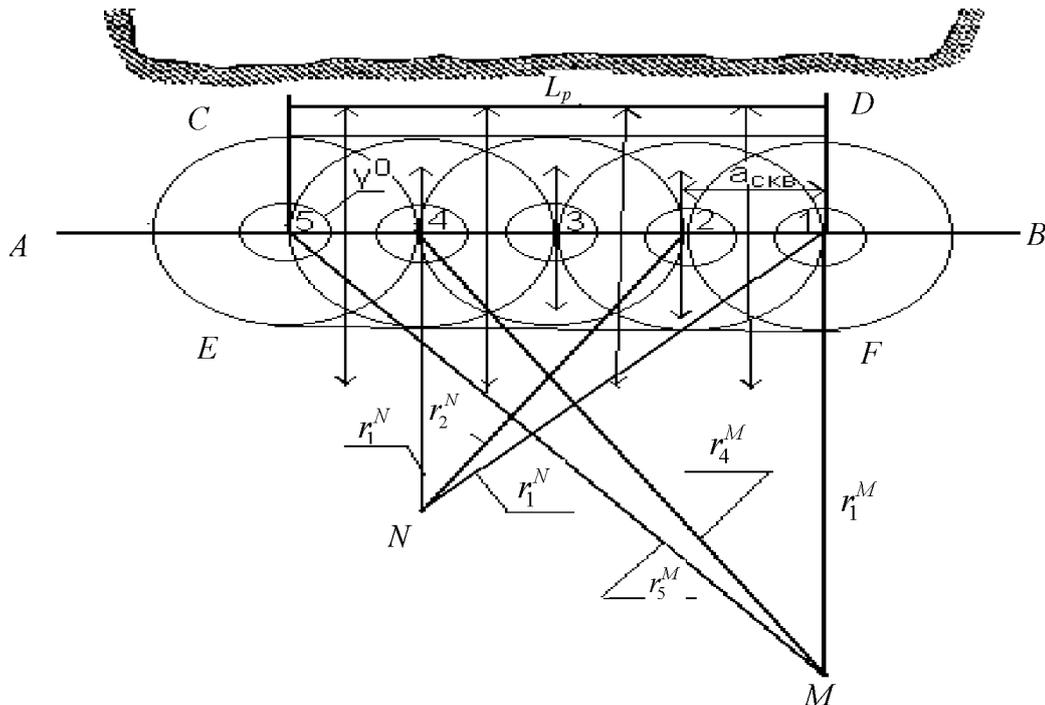


Рис. 3. Схема для расчета интенсивности сейсмических волн при взрывании рассредоточенных в один ряд скважинных зарядов по перпендикулярному профилю

Анализ рис. 3 показывает, что суммарная интенсивность волн в каждой точке является суперпозицией от волн, возбуждаемых взрывом каждого отдельного заряда, массовая скорость которого подсчитана по формуле (6). Так, например, в точке N напротив скважины № 4 результирующим значением массовой скорости будет геометрическая сумма всех значений от отдельных зарядов, приходящих в точку со сдвигом фаз φ между приходом волн от ближайшей скважины № 4 и любой другой (№ 1, № 2).

Сдвиг фаз между приходом волн от ближайшей скважины и любой другой определяются по формуле

$$\varphi^0 = 360 \left[(r_i - r_L) / U_{R^r}^0 \right], \quad (9)$$

где r_i – расстояние от точки наблюдения до i -той скважины; r_L – расстояние от точки наблюдения до ближайшей скважины; $U_{R^r}^0$ – фазовая скорость, определяемая по дисперсионной кривой (по графику на рис. 4).

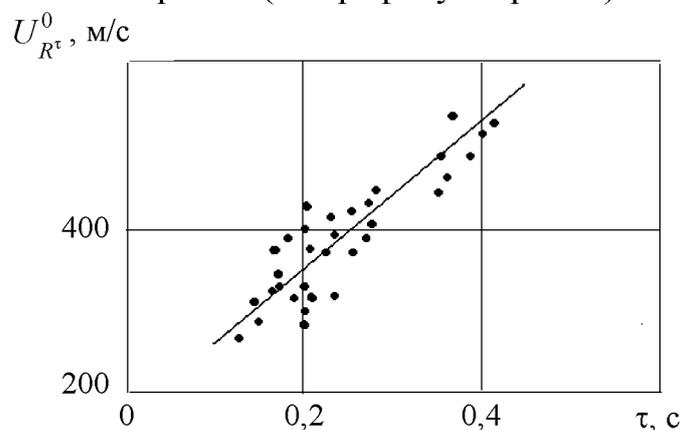


Рис. 4. Зависимость фазовых скоростей распространения поверхностных волн от периода (дисперсная кривая)

В дальней зоне

$$\varphi^0 = 360(I \cos \gamma / U_R^0 \tau), \quad (10)$$

где γ – угол между направлением линии скважин и направлением от центра заряда на точку наблюдений.

При расчете результирующей массовой скорости, исходя из формул (9) и (10), получим, что в ближней зоне максимум находится в пределах первого полупериода волны от ближайшего взрыва (рис. 5, а). А на дальних расстояниях расчет ведется согласно формуле (10), исходя из того, что параметры будут примерно одинаковы от каждой скважины. Результирующую массовую скорость определяют по схеме рис. 5, б.

Выше указывалось на целесообразность определения коэффициентов пропорциональности на основе фундаментальных характеристик горных пород вместо эмпирических поправочных интегральных констант. В этой связи в формуле (1) коэффициент K можно заменить соотношением

$$K = K_M^{2/3} / \rho V_p, \quad (11)$$

а период колебаний в дальней зоне определять по формуле

$$(12)$$

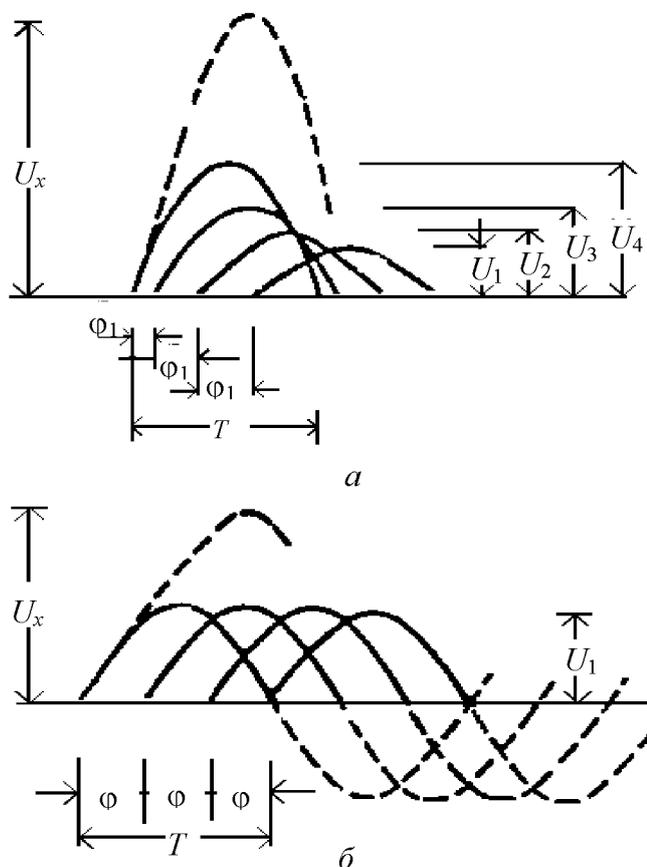


Рис. 5. Схема определения результирующей массовой скорости: а – на ближних расстояниях; б – на дальних расстояниях

Если величина радиуса излучения неизвестна, период колебаний в R -волне при массовых взрывах определяется по формуле

$$T_R = 0,15(mQ_{\text{л}}l)_{\text{без}}^{0,167} \left(0,0005 \frac{r}{\sqrt[3]{(mQ_{\text{л}}l)_{\text{без}} \left(\frac{V_p}{V_s^2} - 1 \right)^{-1}}} \right). \quad (13)$$

Величина радиуса излучателя тоже может быть найдена, по крайней мере, для случая взрывания одиночного заряда, исходя лишь из динамических характеристик породы, что с некоторой долей погрешности может быть приемлемо и для случая взрывания одиночного цилиндрического заряда.

При исследовании закономерностей сейсмических колебаний от взрывов многорядных скважинных зарядов, в связи со сложностью волновой картины и множеством факторов, влияющих на характер их движения, приходится пользоваться исключительно эмпирическими методиками, основанными на обработке сейсмограмм в каждом конкретном случае производства взрывных работ.

В качестве исходного параметра принимают общую безопасную, исходя из заданной допускаемой скорости, массу заряда $Q_{\text{л}}lm_{\text{СКВ}}$, но скорректированную рядом эмпирически установленных коэффициентов, учитывающих условия взрывания.

Массовая скорость при этом подсчитывается по формуле

$$U = K \left[\frac{\sqrt[3]{mQ_{\text{л}}l}}{r} \right]^n. \quad (14)$$

Значения коэффициентов K и n для некоторых скальных пород приведены в табл. 2.

Сейсмобезопасная суммарная масса заряда для этих условий для различных зданий и сооружений при $U = U_{\text{доп}}$ из (13) определяется следующим образом

$$(mQ_{\text{л}}l) = \left(\frac{U_{\text{доп}}}{K_0} \right)^{\frac{3}{n}} r^3, \quad (15)$$

где $U_{\text{доп}}$ – допустимая массовая скорость; K_0 – обобщенный коэффициент особенностей взрывания, определяемый по формуле

$$K_0 = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \dots K_{n-1}, K_n. \quad (16)$$

Коэффициенты $K_1 \dots K_n$ учитывают технические, топографические, геологические и другие условия ведения взрывных работ и используются в зависимости от конкретной ситуации.

Таблица 2. Значения коэффициентов для определения скорости колебаний при взрывах на карьерах

Тип пород	Скорость волны, м/с		Значения коэффициентов	
	продольной	поперечной	K	n
Массивные окремненные известняки и джаспелиты	2500–3000	1600–1800	270	1,92
Углисто-глинистые и слюдистые сланцы	2000–2500	1000–1300	200	1,75
Известняки силлура	2400	1300	650	2,0
Углисто-глинистые, углисто-кремнистые, слюдисто-глинистые сланцы	1900	1000	750	2,0
Крупноблочные гранодиоритпорфиры	2230	1230	256	1,8

В заключение отметим, что Горным бюро США предложена оценка сейсмического воздействия по параметру ускорения [5].

$$a = 39,4f^2 \cdot A, \quad (17)$$

где A и f – амплитуда и частота колебаний.

Допустимое ускорение колебаний для сохранения устойчивости откосов на карьерах равно $a < 981 \text{ мм/с}^2$.

Для оценки сейсмической интенсивности сотрясений поверхностных объектов разработана специальная 12-балльная шкала по показателю массовой скорости (табл. 3).

Таблица 3. Шкала оценки интенсивности сотрясений в баллах

Интенсивность сотрясений, баллы											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Максимальная скорость колебаний, см/с											
<0,5	0,5–1	1–2	2–4	4–8	8–16	16–32	32–64	64–125	125–250	250–500	>500

При низких частотах для предварительной оценки сейсмической опасности можно воспользоваться критерием У. Лангефорса [5] по деформации породы под фундаментом сооружений

$$\epsilon_{\text{доп}} = U/C, \quad (18)$$

где C – скорость звука в породе.

Предельно допустимая деформация не должна превышать значения $3 \cdot 10^{-4}$ для скальных оснований.

Выводы

1. Анализ механизма распространения сейсмозрывных волн и их интенсивности базируется на эмпирическом (при массовых многорядных взрывах) и частично полуэмпирическом (при одиночных взрывах) материале.

2. Суммарная сейсмическая волна при однорядном взрывании в перпендикулярном направлении имеет конфигурацию, близкую к плоской, и лишь на определенном расстоянии приобретает сферическую форму при

условии, что она не успеет отразиться от свободной поверхности и преобразоваться в поверхностную волну квазицилиндрического профиля.

3. При рассмотрении параметров сейсмической волны вдоль ряда скважин в ее формировании на близких от крайней скважины расстояниях принимают участие не все скважины, а лишь какая-то их часть $m_{эф}$.

4. Период колебаний при многорядных взрывах определяется как функция приведенного расстояния по формуле (13).

1. Мосинец В. Н., Богацкий В. Ф. Основные научно-технические проблемы сейсмоки ближней зоны // Взрыв. дело. – М.: Недра. – 1983. – № 85/42. – С. 89–101.

2. Гурвич И. И. Сейсморазведка. – М.: Недра, 1964. – 440 с.

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

4. Вовк О. А. Временные характеристики сейсмических волн при взрывах одиночных и групповых зарядов различной конструкции // Прикладная гидро-механика. – К.: МГМ НАНУ. – 2004. – Т. 6(78). – С. 9–21.

5. Падуков В. А. Горная геомеханика. – С.-Птб.: С-ПТУ им. Г. В. Плеханова. 1997. – 134 с.