

УДК 622.235.535.2

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ ОДИНОЧНЫХ И ГРУППОВЫХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

О.А. ВОВК

Национальный авиационный университет, Киев

Получено 02.03.2004

Рассмотрены временные параметры продольных P и поверхностных R сейсмических волн в зависимости от конструкции заряда при взрывании в различных грунтовых условиях. На основе математической обработки экспериментальных данных получены инженерные зависимости для расчета времени нарастания смещения до максимума в продольной волне τ_+ и видимого периода колебаний T_R в поверхностной волне от различных факторов. Показано, что в продольной волне при взрыве одиночного сосредоточенного заряда период колебаний не зависит от расстояния r , а является функцией массы заряда q и характеристик взрывааемых пород. При взрыве цилиндрических одиночных и групповых зарядов на величину периода оказывает влияние соотношение длины заряда к его диаметру. На временные параметры поверхностной волны R помимо указанных факторов оказывает влияние расстояние r , с ростом которого период колебаний увеличивается. При взрывании рассредоточенных скважинных зарядов в формировании сейсмической волны в направлении, перпендикулярном ряду зарядов, до определенного расстояния (от 2 до $6l$, где l – длина цепочки зарядов) принимает участие не весь суммарный вес зарядов ($q_{св} \cdot n$, где n – число скважин), а какая-то эффективная часть $q_{эф} < q_{св} \cdot n$. В статье даны зависимости $q_{эф}$ от различных факторов при взрывании горизонтальных удлиненных и рассредоточенных вертикальных скважин заряда.

Розглянуті часові параметри подовжніх P і поверхневих R сейсмовибухових хвиль у залежності від конструкції заряду при вибуху в різних ґрунтових умовах. На основі математичної обробки експериментальних даних отримані інженерні співвідношення для визначення часу зростання переміщень до максимуму в подовжній хвилі τ_+ та періоду коливань у поверхневій хвилі T_R в залежності від різноманітних факторів. Показано, що в подовжній хвилі при вибуху поодинокого зосередженого заряду період коливань не залежить від відстані r , а є функцією маси заряду q та характеристики ґрунту. При вибуху циліндричних поодиноких і групових зарядів на величину періоду впливає відношення довжини заряду до його діаметра. Часові параметри поверхневої хвилі R , окрім указаних факторів, змінюються також з відстанню r . При вибуху розосереджених свердловинних зарядів у формуванні сейсмічної хвилі в напрямку, перпендикулярному ряду свердловин, до певної відстані (від 2 до $6l$, де l – довжина цепочки зарядів) бере участь не вся сумарна маса зарядів ($q_{св} \cdot n$, де n – кількість свердловин), а певна ефективна маса $q_{эф} < q_{св} \cdot n$. В статті дані залежності $q_{эф}$ від різноманітних факторів при вибухах горизонтальних і розосереджених свердловинних зарядів.

Time parameters of the longitudinal P and surface R seismic waves depending on charge construction and soil conditions are considered. Engineering correlation for determination of time of accelerated displacement to maximum in the longitudinal waves τ and accelerated period of oscillation in surface waves T_R depending on different factors using mathematical treatment of the experimental data were received. It was displayed that in the long wave while explosion of single point charge period of oscillation do not depend on a distance r but is a function of the charge mass q and soil characteristics. While explosion of cylindrical single and group charges ratio of the charge length to its diameter influence magnitude of period. Time parameters of the surface waves change with length r also. While explosion of dispersal drill charges in perpendicular to series of drills direction up to definite distance (from 2 to $6l$, where l – length of chain of charges) not all the total mass of charges take part in forming of seismic wave ($q_{св} \cdot n$, where n – quantity of holes) but some effective mass $q_{эф} < q_{св} \cdot n$. Dependence $q_{эф}$ from different factors while explosion of horizontal lengthening and dispersal vertical drill charges is given in the paper.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение технологических операций на горных предприятиях по разрушению горной породы основано на взрывании больших масс зарядов, вызывающих сейсмические волны большой интенсивности, опасные для расположенных вблизи природных и инженерных объектов.

Сейсмические волны характеризуются рядом параметров, важнейшими из которых оказываются динамические характеристики (смещение, скорость и ускорение частиц среды, частотный спектр, фазовая скорость V_0 , скорость продольной V_p и поперечной V_s волн, период колебаний) и силовые параметры (радиальное напряжение σ_r , удель-

ный импульс, плотность энергии). Главной опасностью сейсмических волн для защищаемых объектов при их взаимодействии является возможность разрушения или повреждения последних, а главной производственной задачей – установление безопасных расстояний, гарантирующих их целостность. По своей структуре и происхождению сейсмические волны при взрывах на достаточно большой глубине в однородной среде формируются в основном двух типов: продольные P и поперечные S , а вдоль свободной поверхности распространяется волна третьего типа R , так называемая поверхностная. В реальных условиях ведения взрывных работ в окружающую среду излучается большое количество других типов

волн: волны разрежения, отраженные, вторичные, зарождающиеся на свободных поверхностях трещин и на границах сред с существенно различными физико-механическими свойствами и в поверхностном слое, сложенном мягкими породами, волны Лява, продольные волны, отраженные за критическим углом.

Однако в подавляющем большинстве случаев основную энергию на поверхности в области расстояний до $6\sqrt[3]{q}$ несут продольные волны (до 100% по X -составляющей), а на расстояниях более $30\sqrt[3]{q}$ (здесь q – масса заряда) основную опасность представляют поверхностные волны. Поэтому рассмотрение других типов волн с точки зрения их влияния на окружающие объекты производят лишь в отдельных случаях, а при массовых взрывах вблизи свободной поверхности часто ограничиваются получением параметров поверхностных волн, затухающих с расстоянием значительно медленнее, а значит, сохраняющих энергетический потенциал на больших удалениях от источника.

При анализе параметров сейсмозрывных волн широко используют принцип геометрического и энергетического подобия, выражая закон их движения через приведенную массу заряда $q_{пр} = \sqrt[3]{q}/r$ или приведенное расстояние $r_{пр} = r/\sqrt[3]{q}$, которые позволяют установить связь между параметрами источника сейсмических колебаний и среды, по которой движется волна, в функции расстояния (r – расстояние от центра взрыва).

В качестве основного критерия сейсмоопасности для зданий и сооружений, расположенных вблизи взрывааемых зарядов, в большинстве случаев принимается массовая скорость частиц грунта V , поэтому все усилия исследователей и инженерных работников–взрывников направлены на получение с максимально возможной точностью и достоверностью значений этого параметра на заданном расстоянии от источника.

Следует отметить, однако, что даже довольно точный расчет этого параметра не может служить гарантией безопасности зданий и сооружений, поскольку не является исчерпывающим универсальным показателем степени интенсивности и, как правило, дополняется сведениями об амплитудно-частотном спектре колебательно-го процесса. Более полная и достоверная картина может быть получена при рассмотрении силовых составляющих сейсмических колебаний в явном виде, а не опосредствовано через массовую скорость, так как разрушения и деформации защищаемых объектов являются следствием приложения импульсных нагрузок, вызывающих запрельные напряжения и деформации в элементах

конструкции и грунтах оснований фундаментов. Процесс деформирования и разрушения материалов и конструкций является инерционным и наступает в том случае, когда приложение усилия длится какое-то время, а не мгновенное. Таким образом, временная составляющая импульса играет существенную роль. Механизм диссипации энергии сейсмических волн при движении в идеально упругой изотропной среде протекает по закону геометрической расходимости фронта, но в реальных условиях может быть дополнительно связан с вязкими эффектами, либо с сухим (Кулоновским) трением, либо с влиянием обоих механизмов энергопоглощения. В первом случае имеет место важная зависимость поглощения энергии от частоты, а при реализации механизма сухого трения объемное поглощение энергии пропорционально напряжению и мало зависит от времени.

Учитывая важную роль временных параметров при оценке интенсивности сейсмозрывных волн, в настоящей работе выполнен обзор имеющихся литературных материалов по данному вопросу и предложены зависимости для определения времени нарастания скорости смещения в продольной волне τ_+ и периода колебаний в поверхностной волне T_R , полученные на основе обработки результатов экспериментов, выполненных за последние годы в различных грунтовых условиях с учетом конструктивных особенностей зарядов. В работе рассмотрены временные параметры сейсмических волн при взрывах сосредоточенных зарядов вблизи свободной поверхности; при взрывании горизонтальных зарядов; при взрывании вертикальных цилиндрических одиночных и групповых зарядов. Выявлены особенности этих параметров в зависимости от типа волн, массы и конструкции зарядов и характеристики взрывааемых пород.

1. ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В процессе исследования взрывов этого типа зарядов авторами [3, 5] фиксировались три основных типа волн, примерно равных по интенсивности, которые поочередно преобладали по амплитуде: прямая продольная P -рефрагированная, если среда градиентная; неопознанная N и поверхностная R . Волна N имела признаки волны P и R . Зависимости величины периода колебаний с расстоянием в этих волнах при взрыве сосредоточенного заряда в граните массой 10 т приведены на рис. 1, а на

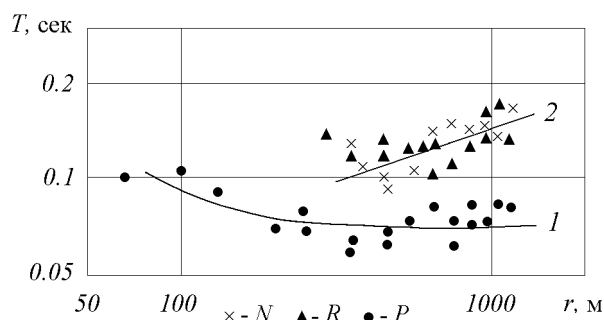


Рис. 1. Периоды волны при взрыве в граните заряда весом 10 т

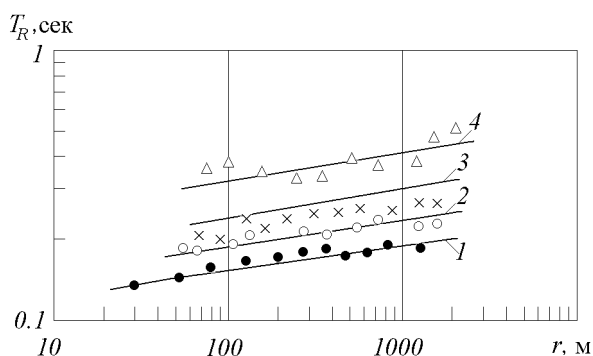


Рис. 2. Графики зависимости $T_R = f(r)$ для волны R при взрывах в лессе зарядов различной мощности: 1 – $q = 20$ кг; 2 – $q = 160$ кг; 3 – $q = 1$ т; 4 – $q = 10$ т

рис. 2, 3 – изменение периода T_R с ростом расстояния соответственно в лессе и водо-насыщенном песке в волне R при взрывах зарядов массой от 5 кг до 10 т. Из анализа графиков видно, что периоды колебаний в волне P сначала уменьшаются с ростом расстояния (рис. 1, кривая 1), что объясняется наличием неупругих деформаций в ближней зоне, а затем в упругой зоне колебаний остаются постоянными. Периоды в R -волне и частично в N -волне увеличиваются с удалением от очага взрыва (рис. 2, кривая 2). При этом характерно, что период в P -волне существенно меньше, чем в других волнах, что видно из рис. 1, 2.

Из рис. 2, на котором приведены величины периода в R -волне при взрывании в лессах сосредоточенных зарядов различной массы, следует, что с ростом массы заряда при прочих равных условиях период T_R имеет тенденцию к увеличению по мере роста расстояния.

Из анализа сейсмограмм записей колебаний сейсмических волн авторы [3, 5] приходят к выводу о том, что при взрыве вблизи свободной поверхно-

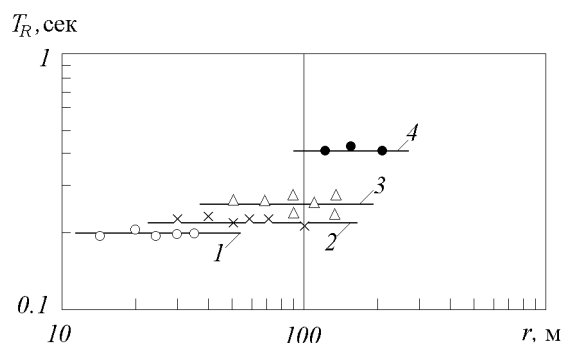


Рис. 3. Графики зависимости $T_R = f(r)$ в волне R при взрывах в водонасыщенных песках зарядов различного веса: 1 – $q = 5$ кг; 2 – $q = 10$ кг; 3 – $q = 40$ кг; 4 – $q = 320$ кг

сти очаг имеет два источника сейсмических волн, соответствующие двум стадиям движения грунта в ближней зоне. Первый из них формирует продольную волну P , а второй излучает длиннопериодную продольную волну N и поверхностную R . Во времени эти источники действуют последовательно, как это видно из рис. 1. Рост периода колебаний с расстоянием в волне R наблюдался не только при взрыве в граните и лессах, но и в других породах за исключением водонасыщенных песков, где он зафиксирован постоянным (рис. 3).

Как видно из графиков на рис. 1, при взрывании в граните период в поверхностной волне значительно возрастает ($T \approx 0.44$ с), в то время, как влияние массы заряда менее существенно. Общая закономерность изменения периода колебаний в поверхностной волне для зарядов сферической симметрии имеет вид

$$T_R = K_T^R \cdot q^{1/6} \cdot r_{\text{пр}}^{-n}, \quad (1)$$

где K_T – линейный коэффициент сейсмичности.

Значения коэффициентов, характеризующих свойства грунта и показателя степени n , приводятся в (табл. 1).

Период колебаний в продольной волне P можно оценивать по времени нарастания смещений до максимума τ_+ , которое соответствует четверти видимого периода этой волны. Как и при движении волны R , изменение периода колебаний пропорционально $q^{1/6}$, но в одинаковых условиях взрывания с расстоянием период практически не изменяется. На рис. 4 нанесены точки, соответствующие приведенному времени нарастания смещений в граните при разных значениях q , а на рис. 5 – кроме того, в различных грунтах. Несмотря на определенный разброс данных на рис. 4, относящихся к взрывам в граните, графики рис. 4,

Табл. 1. Значения эмпирических коэффициентов

Порода	Величина коэффициентов для волны R		Коэффициент K_τ для волны P
	R_T	n	
Глина	0.0800	0.1100	0.0100
Водонасыщенный песок	0.1500	—	0.0150
Гранит	0.0058	0.4400	0.0032
Мраморизированный известняк	0.0350	0.2000	0.0032
Лесс влажностью 2 – 5%	0.0600	0.1100	0.0170

5 свидетельствуют о независимости периода прямых продольных волн от расстояния (за исключением движения в упруго-пластической зоне).

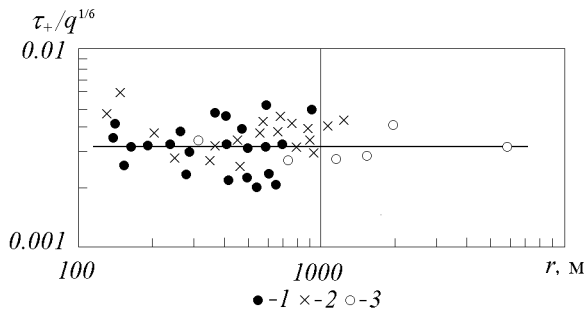


Рис. 4. График зависимости приведенных периодов в продольной волне P от расстояний при взрывах в граните: 1 – $q = 1$ т; 2 – $q = 10$ т; 3 – $q = 150$ т

По данным этих графиков формула для расчета периодов или времени нарастания τ_+ может быть представлена в следующем виде:

$$\tau_+^P = K_\tau \cdot q^{1/6}, \quad (2)$$

где K_τ – коэффициент, зависящий от типа породы (см. табл. 1).

В результате обработки экспериментальных данных при взрывании зарядов в суглинках, выполненных авторами [4, 6, 8] на полигоне Института геофизики НАН Украины и в производственных условиях, получены следующие зависимости величины периода колебаний в волнах P и R в функции приведенной глубины заложения $H_{пр} = H/\sqrt[3]{q}$ и приведенного расстояния от эпицентра взрыва $r_{пр} = r/\sqrt[3]{q}$:

а) в продольной волне P по Z- и X-составляющим

$$\begin{aligned} T_P^Z &= 0.055 H_{пр}^{1/5} \cdot q^{1/6}, \\ T_P^X &= 0.1 (H_{пр} \cdot q)^{1/6}; \end{aligned} \quad (3)$$

б) в поверхностной волне R

$$\begin{aligned} T_R^Z &= 0.065 H_{пр}^{0.175} \cdot q^{1/6} \cdot r_{пр}^{0.1}, \\ T_R^X &= 0.045 H_{пр}^{0.175} \cdot q^{1/6} \cdot r_{пр}^{0.15}. \end{aligned} \quad (4)$$

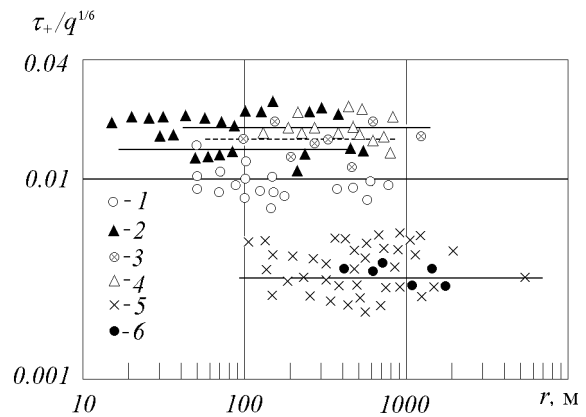


Рис. 5. График зависимости приведенного времени нарастания в волне P от расстояния при взрывах в различных грунтах. Обозначения точек даны в табл. 2

2. ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

При рассмотрении параметров таких зарядов следует учитывать особенности формирования и распространения сейсмических волн в сравнении с действием сосредоточенных одиночных зарядов, так как закономерности движения волн сферической или близкой к ней симметрии не могут быть использованы в расчетах по определению сейсмобезопасных зон до тех пор, пока профиль волны не приобретет сферическую конфигурацию, что имеет место на значительном удалении. Первой особенностью действия горизонтальных зарядов

Табл 2. Обозначения точек к рис. 5

Точки	1	2	3	4	5	6
Порода	Глина	Водонасыщенный песок	Лесс влажностью 2%	Лесс влажностью 5%	Гранит	Мраморизованный известняк
Вес заряда, кг	10^2-10^3	5-320	40	$10^2-5 \cdot 10^3$	$10^3-15 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4-66 \cdot 10^4$

является разница в интенсивности волн, распространяющихся в продольном и перпендикулярном направлениях. Эта разница может достигать в поверхностной волне 2–3 и более раз, а в промышленных взрывах зарядов большой длины и погонной массы может превышать в 7–8 раз параметры колебаний по продольному профилю [6].

Другой особенностью взрывания удлиненных горизонтальных зарядов является то, что первоначально в процессе формирования сейсмической волны в перпендикулярном направлении принимает участие не весь заряд $q_{\text{пог}} \cdot l$, а какая-то ее часть, названная эффективной: $q_{\text{эфф}} < q_{\text{пог}} \cdot l$. Она может быть определена по формуле

$$q_{\text{эфф}} = 0.43 \cdot q_{\text{пог}} \cdot l \cdot \exp^{0.15r/l}, \quad (5)$$

где r – расстояние от источника до наблюдаемой точки; l – длина горизонтального заряда. Формула (5) справедлива в диапазоне значений "цилиндричности" (отношения длины заряда l к его радиусу $r_{\text{э}}$) $150 \div 500$.

На рис. 6 приведены графики изменения периода колебаний в поверхностной волне при взрывании в мягких грунтах. Из графиков видно, что временные периоды поверхностных сейсмических волн изменяются с расстоянием в мягких породах в меньшей степени, чем в лессах или гранитах при взрывании сферических зарядов (рис. 1, 2) и увеличиваются с ростом масштаба взрыва.

Период колебаний в поверхностной волне до расстояний $r < 6l$ можно определить по формуле:

$$T_R^{\perp} = K_{\Gamma} \cdot q_{\text{эфф}}^{0.145} r_{\text{пр}}^{0.05}, \quad (6)$$

где K_{Γ} для суглинков в зависимости от их влажности равен $0.085 \div 0.105$, для лесса $K_{\Gamma} = 0.055$, для сухого цементированного песка $K_{\Gamma} = 0.045$; $r_{\text{пр}} = r / \sqrt[3]{q_{\text{эфф}}}$.

На эпицентральных расстояниях, превышающих $6l_{\text{э}}$, в формуле (6) вместо $q_{\text{эфф}}$ принимаем массу всего заряда $q \cdot l$, что имеет место при взрывании горизонтального заряда, достаточно заглубленного (до $h \approx (0.5 \div 0.8)r_u$).

Сводные данные по результатам наиболее существенных экспериментов, выполненных рядом ав-

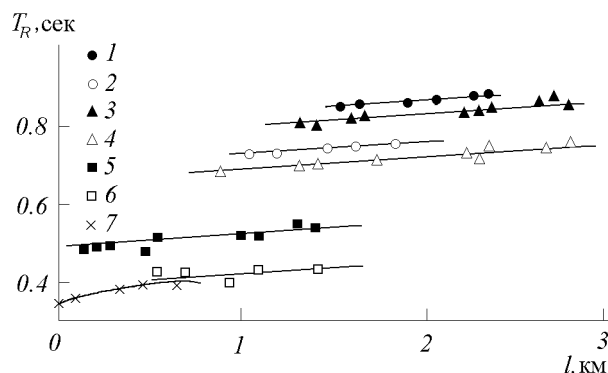


Рис. 6. Зависимости периода колебаний грунта T_R в поверхностной волне от расстояния l при взрывах горизонтальных удлиненных зарядов выброса в направлении, перпендикулярном к оси заряда:

- 1 – $q = 1.75 \cdot 10^5$ кг; 2 – $q = 2.46 \cdot 10^5$ кг;
- 3 – $q = 2.33 \cdot 10^5$ кг; 4 – $q = 4 \cdot 10^5$ кг;
- 5 – $q = 2.5 \cdot 10^4$ кг; 6 – $q = 12$ кг; 7 – $q = 42$ кг;
- 1, 2 – суглинок тяжелый, $\gamma = 1.93$ г/см³, $w = 14\%$;
- 3, 4 – суглинок легкий, супесь, $\gamma = 1.75$ г/см³, $w = 9\%$;
- 5 – суглинок, глина, $\gamma = 1.69$ г/см³, $w = 8\%$;
- 6 – суглинок, глина, $\gamma = 1.74$ г/см³, $w = 10.8\%$;
- 7 – водонасыщенный грунт, $\gamma = 1.85$ г/см³, $w = 36\%$

торов [2, 3, 5] при исследовании временных параметров сосредоточенных и линейных горизонтальных зарядов, взрывааемых в различных условиях, приведены в табл. 3.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, 3, 4, и формулы (6), (7), видим, что структура соотношений для определения временных параметров общая у различных авторов и отличается лишь значениями эмпирических коэффициентов пропорциональности K_T , K_{τ} и показателями затухания n , учитывающими характеристики среды, по которой распространяются сейсмические волны. Из-за чрезвычайного разнообразия грунтовых условий, в которых выполняются взрывные работы, непостоянства их свойств с глубиной, вышеприведенные формулы не могут считаться надежными в методах оценки временных волновых характеристик и пригодны лишь в узком диапазоне усло-

Табл. 3. Экспериментальные зависимости для определения периода колебаний в сейсмических волнах

Литературный источник, тип волны	Тип грунта	Характеристика источника	Формула для определения периода колебаний T	Примечание
[2] Волна разрежения	Известняк, гранит, глины	Сосредоточенные заряды массой $q = 10^2 - 10^6$ кг	$T = 60q^{0.21}$	
[3] Волна R	Лесс, гранит, известняк, глины	Сосредоточенные заряды массой $q = 5 - 10^4$ кг	$T_R = K_T q^{1/6} r^{-n}$	Значения K_T, n даны в табл. 1
[3] Волна P	Лесс, гранит, известняк, глины	Сосредоточенные заряды массой $q = 5 - 66 \cdot 10^4$ кг	$\tau_+ = K_\tau \cdot q^{1/6}$	Значения K_τ, n даны в табл. 1
[5] Волна R	Лессовидный суглинок	Сосредоточенные заряды массой $q = 20 - 10^4$ кг	$T_R = 0.06q^{0.13} \cdot r^{0.11}$	
[5] Волна R	Лессовидный суглинок, гранит	4 скважинных сосредоточенных заряда по 40 кг	$T_R = 0.066q^{0.03} \cdot r^{0.42}$	
[1] Волны R	Суглинистые грунты, лессы	Горизонтальные заряды выброса	Формула (6) в перпендикулярном направлении	
[6] Волны R	Суглинки	Горизонтальные заряды	Формула (6)	$r_{пр} = r / \sqrt[3]{q_{эфф}}$
[7] Волны R	Суглинки, лессовидные грунты	Вертикальные цилиндрические заряды $q_{пор} = 1 - 16$ кг/м	$T_R^1 = 0.055q_{пр}^{0.145} \cdot r^{0.05}$	$q_{пр} = q_{скв}/a$ значения коэффициентов даны в табл. 4
[4] Волны R, P	Глины, суглинки известняк, гранит	Вертикальные цилиндрические заряды	Формула (7)	

вий проведения опытных пробных взрываний. Поэтому в дальнейшем следует стремиться к получению аналитических соотношений, базирующихся на базовых характеристиках пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и их производные – скорости продольных и поперечных волн). Анализ этих данных и соответствующих им формул (1)–(6) и графиков на рис. 1–5 подтверждает основные принципы движения сейсмических волн и особенности временных параметров в зависимости от типа волн, свойств среды и массы сосредоточенных зарядов и приведенной массы горизонтальных зарядов. В последнем случае дополнительным параметром, влияющим на интенсивность колебаний, является “цилиндричность” заряда (отношение длины к диаметру). Кроме того, в направлении оси горизонтального заряда интенсив-

ность сейсмических колебаний в 2–3 раза меньше, чем в перпендикулярном направлении (на равных расстояниях), поскольку расчетные массы заряда в первом и втором случаях различны. В упругой области в перпендикулярном направлении время нарастания τ_+ для продольной волны выражается соотношением

$$\tau_+ = 0.014q^{0.13}, \quad (7)$$

а за пределами области, где цилиндрическая волна вырождается в сферическую, период колебаний в поверхностной волне определяется аналогично взрыванию сосредоточенного заряда по формуле (4).

3. ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАНИИ ОДИНОЧНЫХ И ГРУППОВЫХ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

Изложенное выше, наряду с анализом имеющихся литературных источников [1, 2, 3, 6, 12], показывает на существенное различие в значениях параметров при взрывании зарядов со сферической и осевой симметрией. В частности, в ближней зоне интенсивность колебаний в продольной волне в последнем случае в 2 – 2.5 раза меньше, и сохраняется до расстояний, равных нескольким длинам цилиндрического заряда. Подобная картина наблюдается и при исследовании движения поверхностных волн. Это указывает на необходимость постановки специальных исследований, поскольку в литературе отсутствуют обобщающие зависимости, основанные на моделируемости сейсмических волн с использованием определенных критериев подобия, с помощью которых можно было бы описать закономерности колебаний грунта при взрыве одиночных и групповых цилиндрических вертикальных зарядов в грунтах с различными физико-механическими свойствами. В связи с этим, авторами [4, 6, 8] проведены эксперименты в различных грунтовых условиях источников, характеристика которых приводится ниже.

Параметры вертикальных цилиндрических зарядов приведены в табл. 5.

Проведена также серия экспериментов по моделированию взрыва вертикальных удлиненных зарядов из ниток детонирующего шнура (ДШ) погонной массой 0.05 кг/пог.м, диаметром 0.003 м и длиной 0.9 ÷ 1.5 м с цилиндричностью $S = 300 \div 500$. При анализе закономерностей взрывания вертикальных одиночных цилиндрических зарядов, полученных математической обработкой экспериментальных взрывов, установлено, что на интенсивность сейсмических колебаний помимо грунтовых условий и массы заряда (как в случае сферических волн) оказывают влияние такие факторы как длина забойки, глубина заложения верхнего торца или центра заряда, цилиндричность.

При взрывании рассредоточенных цилиндрических зарядов в виде ряда скважин интенсивность, как и при горизонтальных взрывах, зависит от профиля наблюдений: вдоль ряда или в перпендикулярном направлении.

На рис. 7, 8 приведены графики изменения времени нарастания смещений в продольной волне (рис. 7) и периода колебаний в волне R (рис. 8) при взрывах в суглинках вертикальных зарядов

массой 4 ÷ 500 кг, длиной 4 ÷ 5 м в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва. На рис. 9 представлены графики изменения этих же параметров при фиксированной длине (8 м) и изменении массы заряда от 1 до 30 кг.

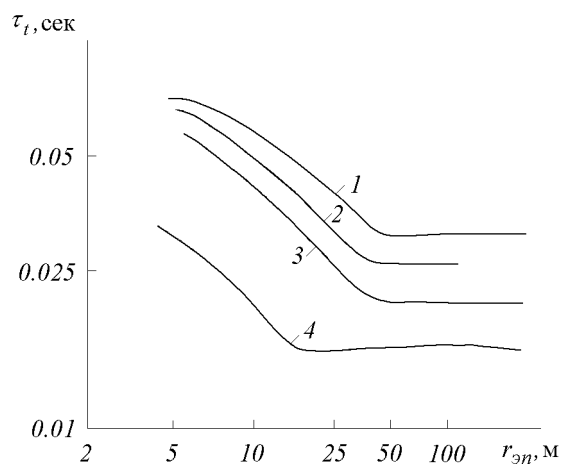


Рис. 7. Изменения времени нарастания смещений до максимума в продольной волне в зависимости от массы заряда и эпицентрального расстояния $r_{эп}$:
1 – $q = 350$ кг, $l_3 = 25$ м; 2 – $q = 90$ кг, $l_3 = 7$ м;
3 – $q = 16$ кг, $l_3 = 4$ м; 4 – $q = 2$ кг, $l_3 = 4$ м

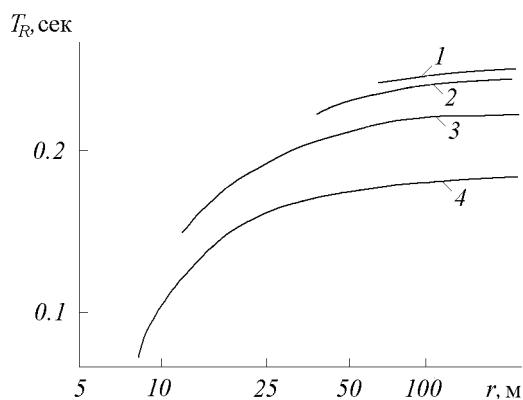


Рис. 8. Зависимости периода колебаний грунта в поверхностной волне от расстояния массы заряда при взрывах вертикальных цилиндрических зарядов в суглинках:

1 – $q = 350$ кг, $l_3 = 25$ м; 2 – $q = 90$ кг, $l_3 = 7$ м;
3 – $q = 16$ кг, $l_3 = 4$ м; 4 – $q = 2$ кг, $l_3 = 4$ м

Как видно из рис. 7, 9, а, закономерность изменения периода в продольной волне аналогична ранее рассмотренным случаям: в ближней зоне упруго-пластических деформаций величина r_+ уменьшается с расстоянием при выходе в упругую зону движения, период колебания не зависит от расстояния. С увеличением линейной массы заря-

Табл 4. Характеристика грунтовых условий

Грунтовые условия	Объемный вес, г/см ³	Пористость, %	Прочность на сжатие, МПа
Суглинок полигона НАНУ	1.90–1.92	30.00–36.00	0.04–0.05
Известняк	2.30–2.32	3.10–3.20	39.00–50.00
Гранит	2.70–2.73	0.60–0.65	230.00–260.00
Базальт	2.85–2.88	0.40	250.00–290.00

Табл 5. Конструкции вертикальных цилиндрических зарядов [6]

Масса взрывного вещества, кг	Линейная масса, кг/пог.м	Длина заряда l_z , м	Радиус заряда r_z , м	Длина забойки, м	Цилиндричность $S = \frac{l_z}{d_z}$	Глубина заложения заряда, м	
						верхнего торца Н, м	средины заряда, м
585	15.80	37.0	0.055	5.0	673	5.0	23.50
350	14.60	24.0	0.055	7.5	436	7.5	19.50
180	15.00	12.0	0.055	6.0	218	6.0	12.00
90	13.85	6.5	0.055	6.0	118	6.0	9.25
27	3.86	7.0	0.028	3.0	250	3.0	6.50
16	4.00	4.0	0.028	2.0	143	2.0	4.00
12	3.00	4.0	0.024	2.0	167	2.0	4.00
12	2.00	6.0	0.020	4.0	300	4.0	7.00
12	2.00	6.0	0.020	2.0	300	2.0	5.00
12	2.00	6.0	0.020	0.0	300	0.0	3.00
12	1.00	12.0	0.014	2.0	857	2.0	8.00
8	1.00	8.0	0.014	4.0	571	4.0	8.00
8	1.00	8.0	0.014	2.0	571	2.0	6.00
4	1.00	4.0	0.014	2.0	286	2.0	4.00
4	1.00	4.0	0.014	1.5	286	1.5	3.50
2	0.50	4.0	0.010	2.0	400	2.0	4.00

Табл 6. Характеристика зарядов второй серии [8]

Показатель	Номера зарядов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина заряда l_z , м	4.0	8.0	10.5	12.0	30.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Линейная масса заряда, кг/пог.м	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	3.85	16.50	30.00
Цилиндричность S	280	555	730	830	2080	555	390	250	154	105

да этот показатель растет. В поверхностной волне период колебаний зависит как от погонной массы заряда, так и от расстояния (рис. 8, 9, б), при этом в упруго-пластической зоне наблюдается более интенсивный рост до границы начала упругого колебания. Необходимо отметить, что при взрыве таких зарядов в сжимаемых грунтах первая фаза R -волны зарождается в зоне упруго-пластических деформаций практически одновременно с продоль-

ной волной либо на начальном участке расстояния (на рис. 8 оно составляет 7 – 25 м) сказывается влияние так называемой неопознанной волны Н [3].

Граница упруго-пластической зоны, за пределами которой, согласно имеющимся литературным данным [13], отмечается фазовое и временное разделение, отмечается на расстояниях от заряда $0.25 \div 0.5$ длины продольной волны; в работе [6] для

зарядов осевой симметрии даны размеры этой зоны в пределах $300 \div 380 r_3$. Появление низкочастотных колебаний связано с формированием условного конуса выброса грунта над устьем скважины либо куполообразным его поднятием. Время поднятия купола t_k при взрыве вертикального заряда в суглинках в условиях экспериментов определяется как

$$t_k = 0.75(qH^2)^{1/6}, \quad (8)$$

где H – глубина заложения верхнего торца заряда (табл. 5). Таким образом, возбуждение сейсмических волн в двухстадийном режиме будет иметь место в случае взрывания заряда вблизи свободной поверхности, сопровождающегося куполообразным поднятием грунта. В случае действия незаглубленного заряда или заложенного на достаточно большую глубину (гарантированного камуфлета) зарождение низкочастотных колебаний первых вступлений продольной волны не наблюдается.

Размеры излучателя сейсмических волн, который эквивалентен в мягких породах величине зоны упруго-пластических деформаций, в работе [6] предлагается определять из выражения:

$$r_{\text{и}} = K_{\Gamma} \sqrt{q_{\text{пог}} \cdot H}, \quad (9)$$

где K_{Γ} – коэффициент условий взрывания, для киевских суглинков он равен $7 \div 9$, для марганецких суглинков – $11 \div 13$, для каховских лессов – 8 , для керченских глин – 26 ; H – глубина заложения верхнего торца заряда (табл. 5). При этом влияние радиуса излучателя проявляется лишь до глубин H , соответствующих $r_{\text{и}} = 8\sqrt{q_{\text{пог}}}$. Дальнейшее углубление заряда не сказывается на интенсивности продольной волны.

При взрывании одиночного вертикального заряда длиной l , цилиндричностью $S = 100 \div 2000$ и длиной забойки $100 \div 150 r_3$ на расстояниях, начиная с $r > l/2$, зависимости нарастания амплитуды колебаний в объемной волне в ближней зоне действия взрыва $t_{\pm}^{Z,X}$ выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} t_{\pm}^Z &= K_H^Z q_{\text{пог}}^{1/6} (0.4 + l^{-1}) r_{\text{пр}}^{-0.85l^{-0.2}}, \\ t_{\pm}^X &= K_H^X q_{\text{пог}}^{1/6} (0.9 + l^{-1}) r_{\text{пр}}^{-0.35l^{-0.25}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для определения периода колебаний в упругой зоне колебаний в функции расстояния с учетом конструктивных особенностей цилиндрического вертикального заряда получены следующие зависимости:

а) для продольной волны

$$T_P^{Z,X} = K_T^P \cdot Q_{\text{л}}^{1/6} (0.01l + 1), \quad (11)$$

б) для поверхностной волны

$$T_R^{Z,X} = K_T^R \cdot Q_{\text{л}}^{1/6} (0.015l + 1) \cdot r_{\text{пр}}^{\nu}. \quad (12)$$

Значение коэффициентов условий взрывания и распространения волновых процессов в формулах (7)–(9) предоставлены в табл. 7.

Иная картина наблюдается при рассмотрении действия взрыва группы из (m) вертикальных зарядов длиной l , линейной массой $q_{\text{пог}}$, расположенных в один ряд при расстоянии между ними, равном (a). При взрывании такой группы зарядов суммарный сейсмический эффект в направлении вдоль линии зарядов зависит при прочих равных условиях от расстояния между ними в ряду (a), а расчетная масса заряда не может быть принята равной сумме $q_{\text{скв}} \cdot m$ за исключением случая, когда $a = 0$.

При рассредоточенных взрывах в любой точке массива происходит наложение колебаний от взрывов отдельных зарядов, если они расположены достаточно далеко друг от друга. При сближении их имеет место взаимное влияние соседних зарядов при сохранении индивидуального эффекта каждого из них (т.е. наложение волн). Обычно предполагается, что на расстояниях, больших чем линейный размер рассредоточенного заряда, последний можно рассматривать как точечный, генерирующий осесимметрические сейсмические волны. По мере приближения к заряду изолинии смещений или скоростей частиц перейдут из окружностей в эллипсы с большой осью, вытянутой вдоль линии скважин. При взрывании сближенных зарядов за счет их взаимодействия имеют место энергетические потери с уменьшением результирующих параметров сейсмических волн. Наблюдается значительная направленность излучения волн по перпендикуляру к линии скважин и ослабление вдоль ряда по сравнению с колебаниями от взрыва сосредоточенного заряда суммарной мощности. Эта направленность прослеживается на расстояниях, в несколько раз превышающих линейные размеры заряда. Таким образом, каждый отдельный заряд массой q_1 по отношению к формированию сейсмической волны принимает определенное долевое участие, которое можно выразить через $q_{\text{эф}}^{\text{скв}}$. Для изучения сейсмического эффекта взрывов рассредоточенных однорядных зарядов проведены специальные эксперименты, данные о которых сведены в табл. 5, 6.

На основе обработки данных экспериментальных и некоторых промышленных взрывов рассредоточенных зарядов получена формула для определения эффективной массы единичного заряда

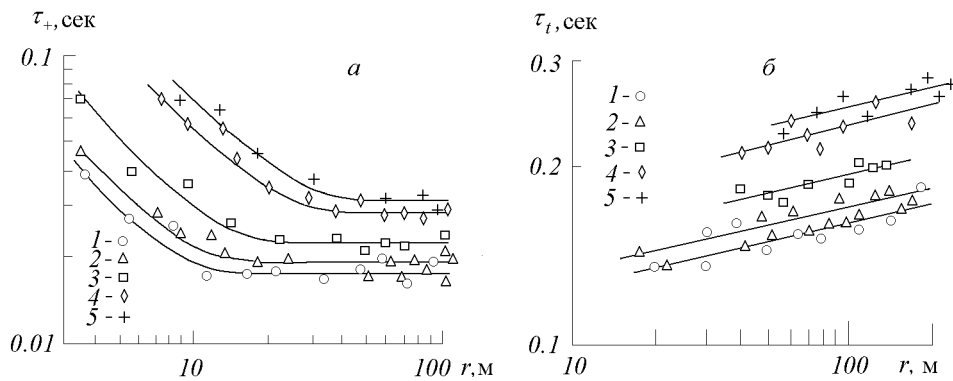


Рис. 9. Зависимости времени нарастания скорости смещения грунта до максимума в объемной волне (а) и периода колебаний скорости смещения грунта в поверхностной волне (б) от расстояния при взрывах в суглинках цилиндрических вертикальных зарядов длиной 8 м и линейной массой (кг/м) согласно табл. 6: 1 – 1.00; 2 – 1.50; 3 – 3.85; 4 – 16.50; 5 – 30.00

Табл. 7. Коэффициенты условий взрывания

Грунт	Тип волны							
	P_0		P		R			
	Составляющая колебательного процесса							
	Z	X	Z	X	Z		X	
	K_H	K_H	K_T^P	K_T^P	K_T^R	ν	K_T^R	ν
Глина, суглинок	0.1	0.05	0.065	0.120	0.950	0.10	0.065	0.15
Сернистый известняк	–	–	0.012	0.015	0.027	0.21	0.038	0.18
Гранит	–	–	0.010	0.012	0.005-0.007	0.38	0.014-0.020	0.20

Табл. 8. Характеристика зарядов (в числителе по Z – составляющим, в знаменателе по X – составляющим)

Грунт	Радиус излучателя $r_{и}[8]^*$ м	Масса одного заряда, q_1	Количество зарядов, m	Расстояние между зарядами a	Расчетные показатели	
					n	$a_{от}$
Глина, суглинок	11.52/17.28	3.0	2	1.0	1.20	0.043
	11.52/17.28	3.0	4	4.0	1.20	0.170
	11.52/17.28	3.0	8	0.7	1.20	0.030
	7.76/11.60	0.9	15	1.5	1.40	0.065
Базальт	16.32/24.48	68.0	19	3.3	1.69	0.069
	17.20/25.8	80.0	8	3.3	1.69	0.064
	14.32/21.48	46.0	3	3.3	1.69	0.077
	14.32/21.48	46.0	3	3.3	1.69	0.077
Гранит	32.18/46.48	365.0	6	5.6	1.61	0.061
	32.90/47.51	390.0	3	5.6	1.61	0.061
Известняк	29.00/40.12	147.0	2	7.1		0.089
	34.76/48.00	252.0	4	7.1		0.074
	34.65/47.88	250.0	8	7.1		0.074

при одновременном их инициировании:

$$q_{эфф} = q_1 \left[\left(1 - \frac{1}{m^b}\right) a_{от} + \frac{1}{m^b} \right], \quad (13)$$

где b – показатель степени при количестве зарядов, зависящий от свойств грунта и равный $b = 3/n - 1$; n – коэффициент затухания сейсмо-

взрывной волны; $a_{от}$ – относительное расстояние между зарядами,

$$a_{от} = \frac{a}{2r_{и}}. \quad (14)$$

При расчете параметров взрыва рассредоточенных зарядов принимается только то количество зарядов $m_{эфф}$ массой $q_{эфф}$ каждый, волны которых приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз по отношению к ближайшему заряду не более 90° или для поверхностной волны – $1/4T_R$ (в дальней зоне волны от всех зарядов приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз между собой не более 90° , поэтому все суммируются).

В общем сдвиг фаз φ между приходом волн от ближайшей скважины и любой другой (i -ой) определяется по формуле

$$\varphi^0 = 360 \frac{r_i - r_1}{V_R^0 \cdot T}, \quad (15)$$

где r_i, r_1 – соответственно расстояния от точки наблюдения до i -ой и ближайшей скважины; V_R^0 – фазовая скорость, определяемая по дисперсной кривой.

Период колебаний поверхностной волны каждого заряда при взрывании в лесовых суглинках может определяться по формуле

$$T_R = 0.06 q_{эфф}^{0.13} r^{0.11}$$

и в скальных породах (гранитах) – по формуле

$$T_R = 0.066 q_{эфф}^{0.03} r^{0.42}. \quad (16)$$

Графики зависимостей периодов от расстояний при различных рассредоточенных взрывах приведены на рис. 10.

Какой-либо достоверной аналитической аппроксимации этих данных получить невозможно. Разброс экспериментальных точек ограничивается штриховыми линиями, которые соответствуют периодам от сосредоточенных взрывов зарядов 20 кг (нижняя) и 1000 кг (верхняя линия). В этой связи можно воспользоваться аналогией действия горизонтальных удлиненных зарядов, представив ряд вертикальных скважинных зарядов массой $q_{эфф}$ каждый в виде приведенной горизонтально ориентированной линейно-рассредоточенной конструкции (метод суперпозиции), а эквивалентную массу по аналогии с формулой (5) определять следующим образом:

$$q_{эКВ} = 0.43 \cdot m q_{эКВ}^{СКВ} \cdot \exp^{0.15r/l_p}, \quad (17)$$

где l_p – длина ряда скважин, равная $a(m-1)$.

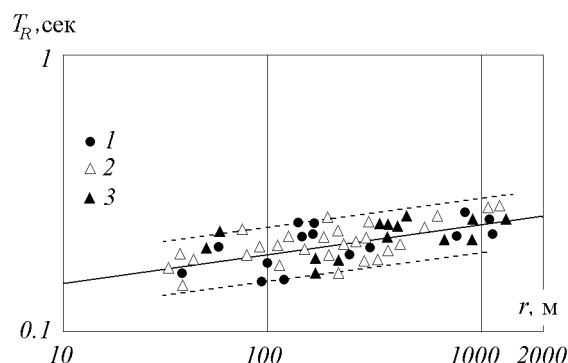


Рис. 10. График зависимости периодов в волне Рэлея от расстояния при различных рассредоточенных взрывах:

$$1 - q = 4 \times 40 \text{ кг}, l = 20 \text{ м}; \quad 2 - q = 4 \times 40 \text{ кг}, l = 10 \text{ м}; \\ 3 - q = 8 \times 20 \text{ кг}, l = 8 \text{ м}$$

Заряд, приведенный к горизонтальному, располагается на глубине

$$h_{зар} = \frac{l_3}{2} + h_{заб}, \quad (18)$$

а его приведенная погонная масса $q_{пр} = q_{эфф}/a$. Тогда период колебаний в поверхностной волне по аналогии с выражением (6) может быть подсчитан по следующей формуле:

$$T_R^\perp = K \Gamma q_{эКВ}^{0.145} r_{пр}^{0.05}. \quad (19)$$

Для расчета параметров поверхностной волны в направлении оси ряда скважин эффективная масса заряда определяется из выражения

$$q_{эфф}^R = q_1 \frac{\exp(4.71 m_{эфф} + 1.5) a_{от}}{6.4 m_{эфф} - 5}, \quad (20)$$

где $m_{эфф}$ – количество скважин, участвующих в формировании волны вдоль профиля; $a_{от}$ – относительное расстояние между скважинами по аналогии с формулой (14).

Величина этого параметра определяет значение $q_{эфф}^{СКВ}$. При $a = 2r_{и}$ получаем $q_{эфф}^{СКВ} = q_1$.

Радиус излучателя $r_{и}$ в данном случае может быть найден из выражения [7]:

$$r_{и} = 0.65(0.1l_{заб} + 1) \left(\frac{l_{зар}}{r_{зар}} \right)^{1/2}. \quad (21)$$

В [7] также отмечено, что на расстоянии вдоль профиля до $3500r_{э}$ имело место сложение амплитуд 2-х зарядов ($m_{эфф} = 2$), при $r = 4800r_{э}$ наблюдалось $m_{эфф} = 3$. Для определения периода колебаний в поверхностной волне T_R вдоль профиля

Табл 9. Рекомендуемые значения коэффициентов K и n в формуле (22) для определения массовой скорости сейсмических колебаний в различных породах на карьерах

Наименование пород и условий взрывания	Скорость волны, м/с		K	n
	продольной	поперечной		
Массивные окремненные известняки и джаспероиды, взрывание скважин на карьере	2500–3000	1600–1800	270	1.92
Углисто-глинистые и слюдяные сланцы, взрывание на карьере	2000–2500	1000–1300	200	1.75
Известняки силлура, взрывание на карьере	2400	1300	650	2.00
Углисто-глинистые, углисто-кремнистые, слюдяно-глинистые сланцы, взрывание на карьере	1900	1000	750	2.00
Крупноблочные гранодиоритпорфиры, взрывание на карьере	2230	1230	256	1.80
Сильноокварцованные и слабоокварцованные сиенитдиориты, взрывание на карьере	2500–3300	1360–1800	200	1.52
Крупноблочные трещиноватые известняки, взрывание на карьере	2730	1500	330	1.85

при взрывании в суглинках в первом приближении можно воспользоваться формулами (4), принимая массу заряда, равную $q_{эфф} \cdot m_{эфф}$. Получение более точных эмпирических соотношений требует проведения специальных экспериментальных исследований и разработки методик обработки их результатов. При исследовании закономерностей сейсмических колебаний от взрывов многорядных скважинных зарядов в качестве исходного параметра принимают общую безопасную для данного объекта массу заряда, равную $m \cdot q_1$, но скорректированную рядом коэффициентов, учитывающих условия взрывания. Массовая скорость при этом подсчитывается по общей формуле

$$U = K \left[\frac{(m \cdot q_1)^{1/3}}{r} \right]^n, \quad (22)$$

где n – коэффициент затухания.

Значения коэффициентов K и n для некоторых скальных пород приведены в табл. 9.

Сейсмобезопасная масса заряда для этих условий для различных зданий и сооружений при $U = U_{доп}$ определяется из формулы (22) следующим образом:

$$(m \cdot q_1)_{без} = \left(\frac{U_{доп}}{K_0} \right)^{3/n} \cdot r^3, \quad (23)$$

где K_0 – обобщенный коэффициент особенностей

взрывания:

$$K_0 = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n. \quad (24)$$

Коэффициенты K_1, K_2, \dots, K_n учитывают технологические, топографические, геологические и другие условия ведения взрывных работ и используются все или некоторые из них в зависимости от конкретных условий. Например, коэффициент K_1 характеризует свойства горной породы и определяется по формуле [14]

$$K_1 = (q_1^1 \cdot m)^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{V_p}{V_s}}; \quad (25)$$

K_2 – коэффициент геометрии заряда; K_3 – коэффициент свойств взрывных веществ; K_4 – коэффициент степени свободы и т. п.

Шкала допустимых скоростей колебаний ($U_{доп}$) для различных зданий, а также значения коэффициентов в формуле (24) даны в [14, 15].

Наличие разницы в свойствах взрываемого массива и грунта оснований защищаемых сооружений учитывается коэффициентом K_5 [14]:

$$K_5 = \sqrt{\frac{\rho V_p}{(\rho V_p)_0}}, \quad (26)$$

где ρ – плотность породы.

Период колебаний грунта в поверхностной волне для этих условий будет

$$T_R = 0.15(m \cdot q_1)_{\text{без}}^{0.167} (0.0005 \frac{r}{((m \cdot q_1)_{\text{без}})^{1/3}} (\frac{v_p}{v_s} - 1)^{-1}) \quad (27)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждение результатов экспериментальных данных, содержащихся в [2 – 9], показывают, что значения основных временных параметров сейсмозрывных волн (τ_+ , T_P^X , $T_R^{Z,X}$) при взрывах сосредоточенных зарядов вблизи свободной поверхности на заданном эпицентральной расстоянии являются функцией массы заряда и расстояния (для поверхностных волн), а также свойств взрываемого массива. В продольной волне величина периода колебаний зависит лишь от массы заряда и свойств массива, за исключением ближней упруго-пластической зоны, где величина периода с расстоянием уменьшается до границы с упругой зоной. При взрывании линейно-рассредоточенных зарядов на временные параметры оказывает влияние "цилиндричность" заряда (отношение длины к радиусу), приведенная глубина заложения, профиль наблюдения. В расчетах принимается эффективная масса заряда $q_{\text{эфф}}$, определяемая для горизонтальных зарядов по формуле (5), а для рассредоточенных скважинных зарядов – по формулам (13), (20). Период колебаний при многорядных взрывах определяется как функция безопасной массы заряда ($q_{\text{без}}$) и приведенного расстояния по формулам расстояния по (23), (27), имея в виду, что в поверхностной волне разница между X - и Z -составляющими незначительна.

Однако, принимая во внимание многообразие технологических вариантов массовых взрывов и сложность волновых ситуаций при взрывах, методики определения временных параметров подлежат дальнейшему изучению и совершенствованию в направлении уточнения эмпирических коэффициентов с учетом реальных паспортных характеристик горных пород между очагом и защищаемым объектом.

В частности, при одновременном взрывании линейно-рассредоточенных зарядов общая закономерность, описывающая изменение периода колебаний в перпендикулярном направлении, до сих пор не получена.

1. Лучко И. А., Плакий В. В., Ремез Н. С. и др. Механический эффект взрыва в грунтах. Под ред. Лучко И. А. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
2. Ромашов А. Н. О природе некоторых волн в грунте, возбуждаемых подземным взрывом // Взрывное дело, "Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах". – М.: Недра. – 1968. – 64/21. – С. 158–191.
3. Рудев Б. М. Динамические характеристики сейсмических волн при подземных взрывах // Взрывное дело, "Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах". – М.: Недра. – 1968. – 64/21. – С. 109–158.
4. Вовк А. А., Кузьменко А. А. О временных параметрах сейсмозрывных волн // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – 4(76), N 2. – С. 9–13.
5. Рудев Б. М., Харин Д. А. О направленном сейсмическом действии рассредоточенных однородных взрывов // Взрывное дело, "Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах". – М.: Недра. – 1968. – 64/21. – С. 211–231.
6. Кузьменко А. А., Воробьев В. Д., Денисюк И. И., Даустас А. А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1990. – 173 с.
7. Вовк О. А., Кугель М. Исследование влияния симметрии источника на параметры сейсмических волн // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – 4(76), N 2. – С. 14–22.
8. Вовк А. А., Кузьменко А. А. Сейсмическое действие взрыва рассредоточенного заряда // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – 3(75), N 2. – С. 5–9.
9. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. – М.: Госстройиздат СССР, 1957. – 275 с.
10. Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г., Кравец В. Г. Основы динамики грунтов и ее практическое приложение. – К.: Наук. думка, 1968. – 203 с.
11. Покровский Г. И., Федоров И. С. Возведение гидротехнических земляных сооружений направленным взрывом. – М.: Госстройиздат СССР, 1971. – 215 с.
12. Вовк О. А. Исследование параметров зоны действия взрыва заряда в лессовых грунтах // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – 4(76), N 1. – С. 12–17.
13. Шуйфер Б. И. Исследование сейсмического эффекта взрывов на строительстве гидросооружений // Взрывное дело, "Сейсмика промышленных взрывов". – М.: Недра. – 1983, 85/42. – С. 132–137.
14. Справочник взрывника / Б. Н. Кутузов, В. М. Скоробогатов и др. Под ред. проф. Кутузова Б. Н. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
15. Кравец В. Г., Воробьев В. Д., Кузьменко А. А. Підривні роботи на кар'єрах. – К.: ІСДО, 1994. – 376 с.