

УДК 624.132.23

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИММЕТРИИ ИСТОЧНИКА НА ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

О. А. ВОВК\*, М. КУГЕЛЬ\*\*

\* Национальный Технический Университет Украины "КПИ", Киев

\*\* Рыбницкий угольный комбинат, Польша, Рыбник

Получено 11.01.2002

Главной задачей изучения динамических параметров сейсмических волн является определение сейсмоопасной зоны их влияния, исходя из общепринятых нормативов оценки по допустимой скорости колебания части грунта, дополняемой в ряде случаев данными спектрального анализа. В статье рассмотрены вопросы влияния симметрии при взрывании одиночных и групповых скважинных зарядов на степень интенсивности объемных и поверхностных сейсмических волн в зависимости от направления профиля измерений. Показано, что симметрия источника возмущений и его геометрические параметры влияют на спектральную характеристику, скорость частиц грунта и другие показатели движения сейсмических волн.

Головною проблемою при вивченні динамічних параметрів сейсмічних хвиль є визначення зони, що знаходиться під їхнім впливом та є сейсμοзагрозливою, виходячи з загальноприйнятих нормативів оцінки по припустимій швидкості коливання частини ґрунту, що доповнюється в ряді випадків даними спектрального аналізу. В статті розглянуто питання впливу симетрії при вибухові одиночних та групових колонкових зарядів на величину інтенсивності об'ємних та поверхневих сейсмічних хвиль в залежності від напрямку профілю вимірів. Показано, що симетрія джерела збурення і його геометричні параметри впливають на спектральну характеристику, швидкість частинок ґрунту та інші параметри руху сейсмічних хвиль.

The main problem of investigation of seismic waves parameters is the finding of seismic-dangerous zones of their influence on the base of adapted standards of appraisal according to the permissible velocity of the ground particles oscillations which is added in some cases by the data of spectrum analysis. This paper presents the questions of influences of symmetry by explosions of individual and group chink charges to the paver of intensity of volumetric and surface seismic waves in dependence of measuring direction. It is showing that simmetry of befurcation search and its geometrical parameters influence to the spectrum characteristics, velocity of the ground particly and other behaviours oh the seismic waves motion.

### ВВЕДЕНИЕ

Упругие возмущения в грунтах и горных породах могут вызывать землетрясения, взрывами зарядов ВВ, а также возникать при горных ударах в виде сейсмических волн. В настоящей работе ставится задача прогнозирования уровня сейсмического воздействия взрывов при взрывной обработке лессовых просадочных массивов и в случае возникновения горных ударов при разработке угольных месторождений с целью определения сейсmobезопасных расстояний. При этом в случае необходимости предусматриваются сейсмозащитные мероприятия по снижению уровня воздействия на грунты оснований природных и инженерных объектов до предельных значений. В настоящей работе ставится задача прогнозирования уровня сейсмического воздействия взрывов при обработке лессовых оснований и возникновения горных ударов на поверхностные объекты, расположенные вблизи источника динамических возмущений и вокруг эпицентра горного удара. Наиболее важными параметрами для определения степени сейсμοопасности являются амплитуды скоростей смещения в объемной и поверхностной волне и частотная характеристика этих волн. Амплитуда

да скорости  $V$  в объемной волне рассматривается как суммарный вектор составляющих по  $X$  и  $Z$ :

$$|\vec{V}| = \sqrt{(V_Z^2) + (V_X^2)}. \quad (1)$$

В поверхностной волне амплитуды скорости нельзя определить по геометрической сумме векторов-составляющих, поскольку сдвиг по фазе между ними равен  $90^\circ$ .

### 1. ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

На параметры движения сейсмических волн наибольшее влияние оказывают свойства грунтов массива, величина заряда (погонная масса при рассмотрении удлиненных зарядов), глубина заложения торца заряда и его длина, а при групповом взрывании – способ расположения взрывных скважин и последовательность их инициирования. Сейсмическая картина, как следствие ведения взрывных работ при ликвидации просадочности лессовых массивов, характерна тем, что здесь вблизи расположенные здания воздействуют объемные волны, имеющие частоту 10–40 Гц, в то

время как преобладающие частоты поверхностных волн от действия горных ударов находятся в пределах 2–8 Гц. При изучении спектральных характеристик следует выделять область преобладающих периодов колебаний в функции расстояния, чтобы правильно прогнозировать их взаимодействие с собственной частотой колебаний охраняемых объектов и грунта оснований и избежать существенного нарастания амплитуды за счет резонанса. Скорость смещений  $U_p^Z$  в продольной волне в соответствии с принципом геометрического подобия определяется по следующей формуле общего вида:

$$U_p^Z = k_{np} \left( \frac{Q_{\text{ВВ}}^{1/3}}{r} \right)^2, \quad (2)$$

где  $r$  – текущее расстояние;  $\bar{r} = Q_{\text{ВВ}}^{1/3}/r$  – приведенный радиус для случая сферических волн;  $Q_{\text{ВВ}}$  – вес заряда. В формуле (2) для лессов влажностью 5%  $k_{np}$  принимаем равным 130, а для сильно пересушенных влажностью 2% – 70;

Для определения скорости в поверхностной волне предлагается следующая формула:

$$U_R^z = 157 Q_{\text{ВВ}}^{0.07} \frac{f(\bar{r})}{r^{-0.11}}. \quad (3)$$

Для вертикальных цилиндрических зарядов характерно изменение массовой скорости в волне Р в ближней зоне на текущей глубине  $H$  по отношению к аналогичному показателю на поверхности. При этом максимум скорости смещения наблюдается в зоне центра симметрии заряда. В дальней зоне (более  $6l_z$ , где  $l_z$  – длина заряда) скорость в поверхностной волне аналогично сферическому заряду может определяться по формуле (2).

Зависимость периода  $T_R$  от веса заряда  $Q_{\text{ВВ}}$  и расстояния  $r$  от скважины при вертикальном расположении заряда длиной  $l_z$  имеет вид

$$T_R = 0.13 Q_{\text{ВВ}}^{0.07} \cdot r^{0.05}. \quad (4)$$

При взрывании группы скважин, расположенных в один ряд, суммарное сейсмическое действие на окружающую среду в направлении, перпендикулярном оси и вдоль оси их расположения, будет различным.

При одновременном взрывании ряда вертикальных скважинных зарядов (рис. 1) вокруг каждого из них возникает и быстро развивается во все стороны коническая волна напряжений. По мере развития эти волны, сливаясь вместе, образуют общий фронт упругой волны взрыва.

Его можно условно разделить на две части – плоскую (CD, EF) и сферическую (CAE, DBF). Первая образуется в результате синфазной интерференции упругих волн от взрывааемых соседних зарядов. Она несет их суммарную энергию и распространяется в среде со сравнительно слабым затуханием и в то же время содержит основную энергию волн (в 4–5 раз больше, чем на остальных участках).

Сферическая часть фронта образуется в основном упругими волнами от крайних зарядов и распространяется с большим затуханием из-за геометрического расхождения.

Участки среды и находящиеся на них охраняемые объекты, по которым проходит плоский фронт упругой волны, испытывают значительно большие динамические нагрузки по сравнению с аналогичными участками с движущимся сферическим фронтом.

Таким образом, на границе завершения необратимых деформаций в направлении, перпендикулярном оси, формируется плоский фронт сейсмических волн, параметры которых подлежат определению в первую очередь, как более опасные для находящихся вблизи защищаемых объектов. Для получения исходных данных необходимо определить расстояния  $R_{\text{П}}$  (рис. 2), на котором суммарный фронт приобретает плоскую форму, и оценить динамические параметры, воспользовавшись соотношением Ландау–Лифшица

$$\sigma = U_{\text{max}} \cdot V_s \cdot \frac{\gamma}{g}. \quad (5)$$

Принимая напряжения ( $\sigma$ ) на фронте волны в начале зарождения упругих возмущений (т. е. на расстоянии  $r_{\text{упр}}$ ), равным пределу структурной прочности лессового грунта  $\sigma_s$  и подставляя вместо скорости поперечной волны соотношение  $V_s = f(\gamma_{\text{ск}})$  из [4], получаем формулу для определения максимальной скорости, входящей в уравнение (5):

$$U_{\text{max}} = \frac{0.0066 \cdot \gamma \cdot \sigma_s}{\gamma_{\text{ск}} - 1.19}, \quad (6)$$

где  $\gamma_{\text{ск}}$  – объемный вес грунта.

## 2. ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В НАПРАВЛЕНИИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ РЯДУ СКВАЖИН

Для определения расстояния между скважинами в ряду ( $a$ ), при котором на расстоянии  $R_{\text{П}}$  суммарный фронт будет максимально приближенным

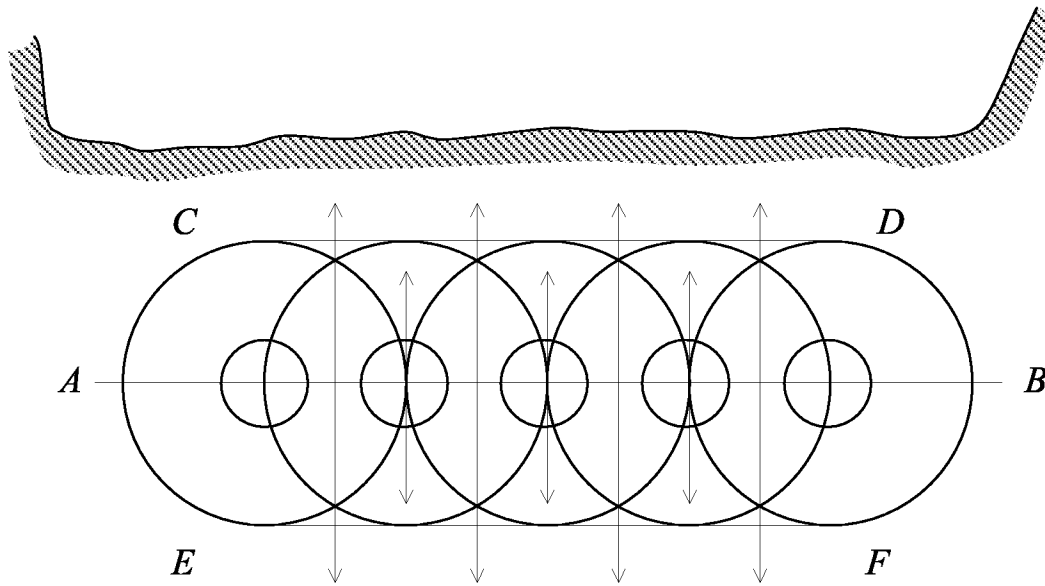


Рис. 1. Схема развития упругих волн от мгновенного взрыва серии колонковых зарядов, расположенных в ряд

к плоской форме, принимаем, что радиальные напряжения  $\sigma_r$  на фронте цилиндрической волны напротив заряда будут равны суммарному радиальному напряжению  $\sigma_r$  между зарядами. Для решения этой задачи расстояние  $R_{\Pi}$  определяется из условия минимальной площади фигуры  $ABC$  (рис. 2).

Обозначив ее через  $F$ , запишем

$$F = F_{BA'C} = F_{OA'CD} - F_{OBCD},$$

$$F = \frac{a \cdot R_{\Pi}}{2} - \frac{a \sqrt{R_{\Pi}^2 - \frac{a^2}{4}}}{4} - \frac{R_{\Pi}^2}{4} \cdot \arcsin \frac{a}{2 \cdot R_{\Pi}}. \quad (7)$$

Функция  $F(a, R_{\Pi})$  при минимуме дает следующее трансцендентное уравнение:

$$\frac{a}{2 \cdot R_{\Pi}} = \arcsin \frac{a}{2 \cdot R_{\Pi}}, \quad (8)$$

из которого получаем предельное соотношение  $a = 2R_{\Pi}$ . Из графического решения видно, что уже при  $R_{\Pi} = a$  отличие реального фронта волны от плоского незначительно. Если принять закон затухания напряжений в функции расстояния  $\sigma(r)$  согласно [6], то можно записать

$$a = 2 \cdot R_{\Pi} \cdot (2^{2/(\mu+1)} - 1)^{1/2}, \quad (9)$$

здесь коэффициент  $\mu$  характеризует степень затухания напряжений и в некоторой мере свойства среды.

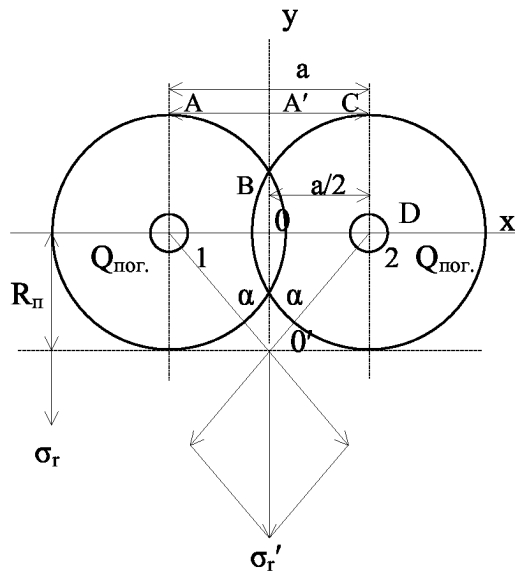


Рис. 2. Зависимости скорости смещения грунта от расстояния при взрывах группы из 4-х вертикальных цилиндрических зарядов длиной 6 м:

1 - в направлении линии зарядов,  
2 - перпендикулярно линии зарядов

При  $\mu = 1$  расстояние между зарядами  $a = 2R_{\Pi}$ , при  $\mu = 3 - a = 1.28R_{\Pi}$  (или  $R = 0.78a$ ), что имеет место в сильно пористых грунтах с нарушенными структурными связями. Таким образом можно в практических расчетах на основании анализа экспериментальных данных прини-

мать расстояние  $R_{\Pi}$  в пределах  $0.65-0.80a$ , и в отдельных случаях (при  $\mu = 1$ )  $R_{\Pi} = 0.5a$ , что сопоставимо с предложенной в работе [6] величиной  $a = 1.57R_{\Pi}$ , ( $R_{\Pi} = 0.64a$ ) или значением  $a = R_{\Pi} \cdot \sqrt{2}$ , ( $R_{\Pi} = 0.71a$ ), рекомендованном в работе НИИСК Госстроя СССР.

Определенные затруднения при вычислении скорости движения частиц в объемной и поверхностной волнах для этого случая возникают при установлении массы активной части заряда.

В связи с этим авторами при определении скоростей в  $R$ - и  $P$ - волнах предложено рассматривать систему вертикальных скважинных зарядов как один горизонтально ориентированный линейно-рассредоточенный (метод суперпозиции) заряд, а эквивалентную массу, по аналогии с зависимостями для горизонтальных зарядов [1], определять из выражения

$$C_{\phi} = 0.43 \cdot m \cdot Q_{\text{скв}} \cdot e^{0.15 \cdot r/l_p}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{скв}}$  – вес заряда в одной скважине;  $m$  – число скважин;  $l_p$  – длина ряда скважин, равная  $a(m-1)$ ;  $a$  – расстояние между скважинами.

Тогда  $Z$  – составляющая искомой скорости смещения в волне  $R$  для рассматриваемого случая в направлении, перпендикулярном линии скважин, определится по формуле

$$U_R^{\perp} = k_1 \cdot k_2 \cdot H_0^{1.1} \cdot Q_{\text{пог}}^{0.75} \cdot r^{-\alpha}, \quad (11)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий отношение  $l/d_3$  (при  $l/d_3 = 150-200$   $k_1 = 0.9$ , при  $l_{\text{зар}}/d_{\text{зар}} > 300$   $k_1 = 1$ );  $k_2, \alpha$  – коэффициенты, учитывающие свойства грунта:

$$k_2 = 360 \cdot e^{-0.093 \cdot W_B}, \alpha = 2.35e^{-0.027 \cdot W_B}, \quad (12)$$

$W_B$  – весовая влажность грунта.

Период колебаний в этом случае может определяться по формуле

$$T_R^{\perp} = 0.055 \cdot \bar{Q}_{\text{пог}}^{0.145} \cdot r^{0.05}, c. \quad (13)$$

Здесь  $\bar{Q}_{\text{пог}}$  – приведенная погонная масса заряда,

$$\bar{Q}_{\text{пог}} = \frac{Q_{\text{скв}}}{a}. \quad (14)$$

Формула (11) используется для расчетов в диапазоне расстояний до  $6l_p$ . За пределами этой зоны в расчетах принимается вся масса зарядов ( $m \cdot Q_{\text{скв}}$ ) и волна рассматривается как сферическая.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВДОЛЬ ЛИНИИ ГРУППЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ

При взрывании группы вертикальных сближенных зарядов суммарный сейсмический эффект при прочих равных условиях зависит от расстояния между ними в ряду.

Скорость смещения в этом случае возрастает по сравнению с взрывом единичного заряда, однако нельзя расчетную массу зарядов принимать в виде суммы отдельных скважин, за исключением случая, когда  $a = 0$  [6].

При сближении отдельных зарядов в ряду суммарный сейсмический эффект взрыва уменьшается, так как заряды взаимодействуют между собой, за счет чего происходят дополнительные диссипативные потери с уменьшением результирующих параметров сейсмических волн. Поэтому каждый отдельный заряд массой  $Q_{\text{скв}}$  по отношению к формированию сейсмической волны принимает доленое участие, которое определим через  $Q_{\text{эф}}$ , т. е. эффективная масса единичного заряда представляет какую-то часть от полной массы. На основе обработки многочисленных экспериментальных данных для различных грунтовых условий в работе [6] приводится формула для вычисления  $Q_{\text{эф}}$  для волны  $R$ . Эффективную массу заряда  $Q_{\text{эф}}^R$ , влияющую на параметры поверхностной волны  $R$ , предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$Q_{\text{эф}}^R = Q_{\text{скв}} \cdot \frac{\exp(4.71m_{\text{эф}} + 1.5) \cdot C}{6.4m_{\text{эф}} - 5}, \quad (15)$$

где  $Q_{\text{скв}}$  – масса заряда в одной скважине;  $m_{\text{эф}}$  – количество скважин, участвующих в формировании поверхностной волны;  $C$  – относительное расстояние между скважинными зарядами,

$$C = \frac{a}{2 \cdot r_{\text{оч}}}; \quad (16)$$

$r_{\text{оч}}$  – радиус очага (эквивалентный радиусу излучателя).

В условиях данных экспериментов его значения определяются из соотношений (для  $Z$  и  $X$  составляющих) [6]

$$r_{\text{оч}}^Z = 8 \cdot \sqrt[3]{Q_{\text{скв}}}, \quad r_{\text{оч}}^X = 12 \cdot \sqrt[3]{Q_{\text{скв}}}. \quad (17)$$

Расчет скорости смещения  $U_R^X$  вдоль оси для случая одновременного взрыва ряда вертикальных зарядов ( $m$ ) производим по следующей формуле:

$$U_R^X = 63 \cdot m \cdot l_3^{0.15} \cdot Q_n^{0.1} \cdot \left(\frac{r}{Q_{\text{эф}}^{1/3}}\right)^{-n}, \quad (18)$$

где  $l_3$  – длина скважинного заряда;  $Q_n$  – линейная плотность скважинного заряда, кг/п.м.

В расчете массовой скорости по формуле (18) принимается только то количество зарядов  $m_{\text{эф}}$ , волны которых приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз по отношению к ближайшему заряду не больше  $90^\circ$ , т.е. период колебаний в волне  $R$  не должен превышать  $1/4T_R$ . В дальней зоне в формировании поверхностной волны принимают участие все заряды.

Расчет скорости смещения для  $R$ -волны по  $Z$ -составляющей по профилю вдоль ряда скважин с учетом соотношения (15) проводится по формуле:

$$U_R^Z = 60 \left(\frac{r}{(Q_{\text{эф}}^R)^{1/3}}\right)^{-1.3} \cdot m_{\text{эф}}. \quad (19)$$

Размер излучателя в данном случае определялся по следующему эмпирическому соотношению:

$$r_n = 0.65 \cdot (0.1 \cdot l_{\text{заб}} + 1) \cdot \left(\frac{l_{\text{зар}}}{r_{\text{зар}}}\right). \quad (20)$$

Анализ данных экспериментов, приведенных в работе [6], показал, что при взрыве 4-х рассредоточенных скважинных зарядов скорость в  $R$ -волне по сравнению с одиночным зарядом в 1.6–1.75 раз выше, а при 8-ми зарядах – в 1.95–2.1 раза. В объемной волне эта разница еще больше. На рис. 3 приведены данные замеров вертикальной составляющей скорости в  $P$  и  $R$  волнах в различных направлениях.

Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 3 видно, что разница в скоростях смещения в  $R$ -волнах при взрывании 4-х зарядов, замеренная по двум профилям (вдоль и поперек линии зарядов), существенна и на расстоянии 25 м составляет 1.7 раза. На расстоянии 50–100 м эти скорости примерно равны, а на расстоянии 150–170 м имеет место некоторое превышение скоростей по продольному профилю по сравнению с поперечным. Согласно нашим расчетам в суперпозиции волн по продольному профилю до расстояния 12 м (две длины заряда) участвуют два заряда, до 25 м – три заряда и далее все четыре. В поверхностной волне на всем поперечном профиле измерений складываются амплитуды четырех зарядов. Разница в скоростях поверхностных волн по двум профилям составляет: на расстоянии 50 м ( $\sim 1430r_{\text{зар}}$ ) в 2.15 раза, на расстоянии 100 м ( $\sim 2860r_{\text{зар}}$ ) – в 1.6 раза. Как

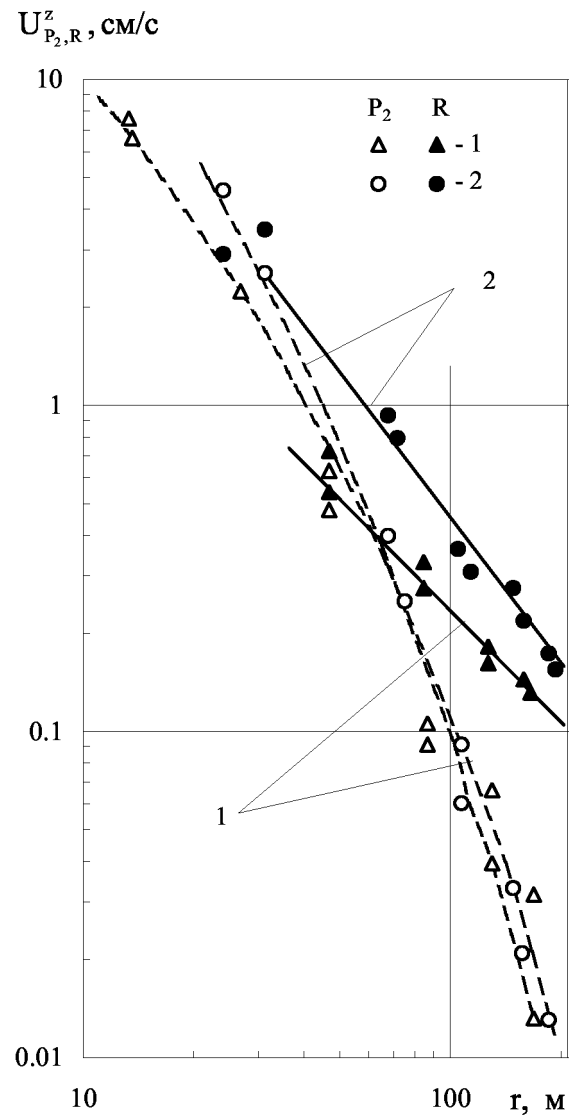


Рис. 3. Схема к определению параметров групповых взрывов цилиндрических зарядов серии колонковых зарядов, расположенных в ряд

видим, имеются большие возможности регулирования интенсивности сейсмозрывных волн соответствующим расположением зарядов (или последовательностью их взрывания).

Из этих данных видно, что в направлении продольного профиля на расстоянии 50–125 м (т.е. до  $3500r_{\text{зар}}$ ) имеет место сложение амплитуд только двух зарядов ( $m_{\text{эф}} = 2$ ), а на расстоянии 125–170 м (до  $4800r_{\text{зар}}$ ) – трех из четырех зарядов. Но при этом следует учитывать то обстоятельство, что последующие три заряда (если ряд состоит из шести и более скважин) возбуждают аналогичную

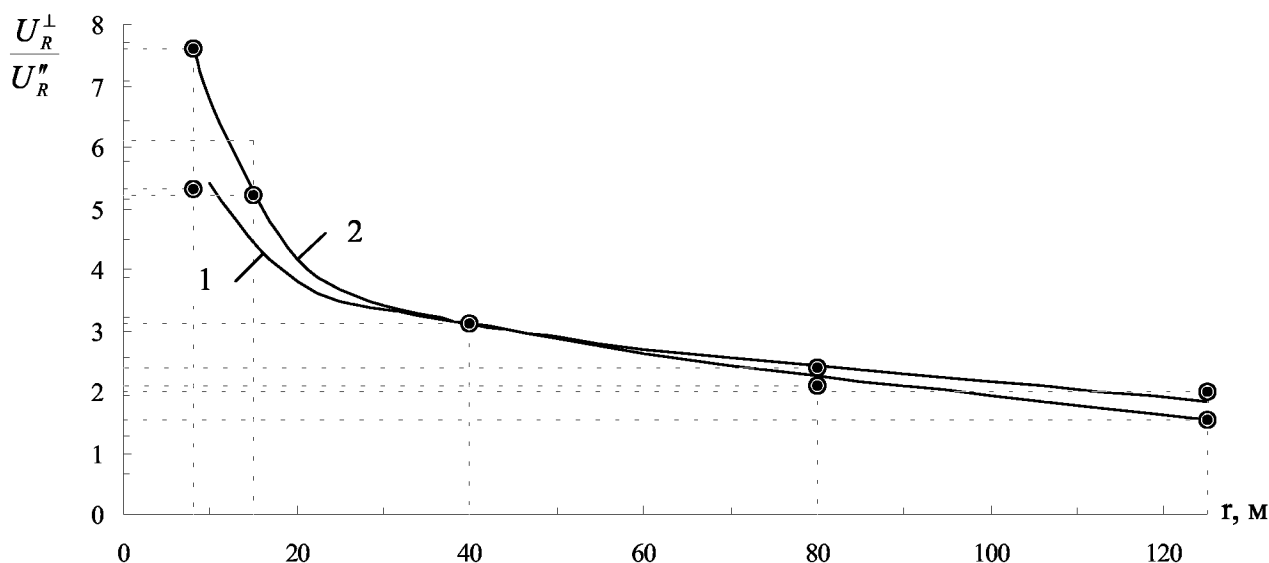


Рис. 4. Соотношение скоростей смещения в  $R$ -волнах перпендикулярно и вдоль оси зарядов радиусом  $0.08\text{ м}$ : 1 – при длине заряда  $10\text{ м}$  ( $125 r_{\text{зар}}$ ), 2 – при длине  $34\text{ м}$  ( $425 r_{\text{зар}}$ )

Табл. 1. Допустимые скорости колебаний грунта в основаниях зданий и сооружений различного назначения

Характеристика зданий и сооружений	$U_{\text{доп}}$ , см/с
Одиночные здания и сооружения производственного назначения с железобетонным или металлическим каркасом	5.0
Одиночные здания высотой не более 2–3-х этажей с кирпичными и им подобными стенами	3.0
Небольшие жилые поселки	2.0

Примечание: при наличии в жилых поселках медицинских и детских учреждений  $U_{\text{доп}}$  принимается  $0.01\text{ см/с}$ . Данная методика расчета сейсмобезопасного расстояния разработана для случая многократно повторяющихся взрывов (например, вблизи горных предприятий, систематически ведущих взрывные работы).

поверхностную волну с интервалом  $2a$ , т. е. формирующуюся на расстоянии от защищаемого объекта, большем на  $2a$ .

Влияние направления профиля измерений при взрывании горизонтально расположенных зарядов диаметром  $0.16\text{ м}$  видно из рис. 4, где приведены графики зависимости скорости в поверхностной волне вдоль и перпендикулярно оси зарядов. Как видим, наиболее существенна разница скоростей при взрывании более длинного заряда ( $34\text{ м}$  или  $425r_{\text{з}}$ ) на расстоянии  $100r_{\text{з}}$ , начиная с расстояния  $500r_{\text{з}}$  и далее соотношения скоростей поперечного и продольного профилей практически одинаковы для обоих зарядов.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМОБЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Определение расстояний ( $r_c$ ), на которых колебания грунта, вызываемые взрывом сосредоточенного (или приравненного к нему) заряда, становятся безопасными для зданий и сооружений, могут производиться по формуле

$$r_c = \left( \frac{1.75k_0}{U_{\text{доп}}} \right)^{2/3} \cdot Q^{1/3}, \quad (21)$$

где  $k_0$  – коэффициент, учитывающий свойства грунта в основании защищаемого объекта. Для песчаных и глинистых неводонасыщенных грунтов  $k_0 = 2.6$ , для насыпных и почвенных грунтов

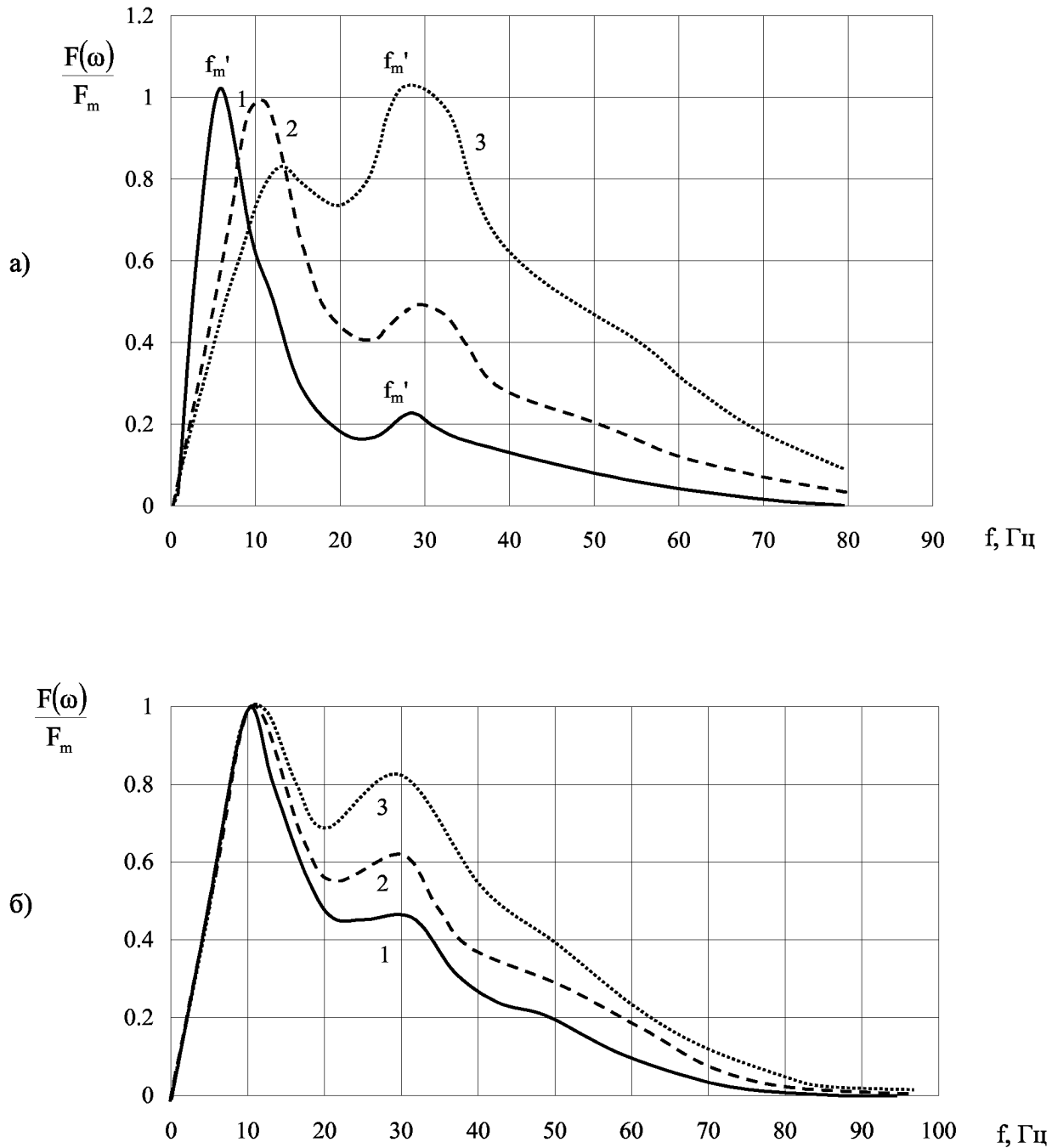


Рис. 5. Спектральная скорость при взрыве: а - источника различных размеров: 1-1.4 м; 2-2.1 м; 3-7.5 м; б - равновеликих зарядов центральной (1), осевой (2) и плоской (3) симметрий

$k_0 = 5$ , для водонасыщенных  $k_0 = 7$ .  $U_{\text{доп}}$  - допустимая скорость колебаний грунта, см/с, в основании охраняемого объекта, принимается в соответствии с табл. 1.

Определение интенсивности сейсмического воздействия горных ударов затрудняется отсутстви-

ем надежных методов оценки начальных динамических и энергетических параметров горного удара.

В этой связи авторы предложили методику оценки горного удара по тротиловому эквиваленту ( $Q_{\text{экв}}$ ), что дает возможность рассматривать

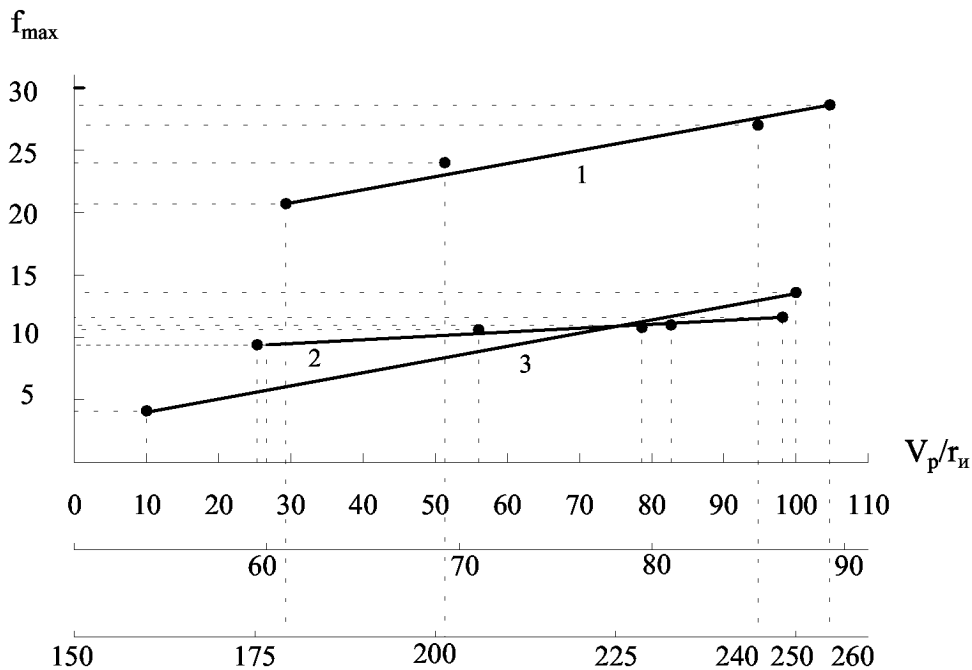


Рис. 6. Зависимость максимальной частоты от соотношения скорости продольной волны и радиуса излучателя: 1– при радиусе заряда 0.4 м; 2– при радиусе заряда 0.825 м; 3– по данным А.А. Кузьменка к [1]

горный удар как взрыв тротилового заряда эквивалентной мощности и описать движение упругого возмущения, основываясь на закономерностях распространения сейсмозрывных волн в сферической постановке. Тогда по аналогии с (21) эпицентральный радиус безопасной зоны на поверхности (т. е. расстояние от эпицентра горного удара до точки, где  $U \leq U_{дом}$  для данного объекта) определится по формуле

$$r_{без} = \sqrt{\left[ \frac{k^{1/n} \cdot Q_{эКВ}^{1/3}}{U_{доп}^{1/n}} \right]^2 - H^2}. \quad (22)$$

Для определения  $U$  выражение (2) в общем виде запишется, как

$$U = k \frac{(Q_{эКВ}^{1/3})^n}{r^n}. \quad (23)$$

Здесь  $k$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для конкретных условий, характеризующих свойствами грунтов оснований.

Основываясь на этих соотношениях, авторы выполнили расчеты сейсмобезопасной зоны графоаналитическим способом с построением номограммы [2], позволяющей определить параметры

при возникновении горного удара на глубине 500–1000 м тротиловым эквивалентом до 10 т.

В заключение остановимся на вопросах определения частотного спектра сейсмической волны любого происхождения, для установления степени вероятности резонансных явлений. На рис. 5 приведены графики зависимости спектральной плотности от симметрии и размеров источника. Из рис. 5, а видно, что заряды меньшей длины и центральной симметрии при прочих равных условиях характеризуются максимумом в более низкочастотной области.

Показатель максимальной частоты ( $f_{max}$ ), кроме того, зависит от масштаба явления, выраженного через радиус излучателя ( $r_n$ ), характеризующего размеры и энергию очага, а также от характеристики породы, в данном случае определяемой скоростью продольной волны ( $V_p$ ), и может быть найден по формуле

$$f_{max} = 3 + 0.1 \frac{V_p}{r_n}. \quad (24)$$

На рис. 6 приведены графики зависимости максимальной частоты  $f_{max}$  для двух горных ударов радиусом энергетического эквивалента 0.4 м и 0.825 м в породах, характеризующихся скоростью



$V_p$  в пределах 3024–3895 м/с.

Как видим, в случае большего значения энергии горного удара спектр существенно перемещается в область низких частот, более опасную для защищаемых объектов, даже при равном воздействии динамической (силовой) составляющей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При решении задач сейсмобезопасности в процессе взрывной обработки лессовых массивов могут иметь место несколько вариантов.

а) Имеется технологическая схема производства взрывных работ, форма, масса и количество зарядов, их расположение, допустимые скорости смещения ( $U_{доп}$ ) для конкретных, находящихся вблизи уплотняемой площадки, объектов. Требуется расчетным путем установить параметры скорости смещения в волнах  $P$  и  $R$  и ограничить расстояние от источника взрыва ( $r$ ), на котором  $U \leq U_{доп}$ . Если защищаемые объекты находятся в пределах опасной зоны, следует предпринимать меры по их защите.

б) Зафиксировав расстояние от ближайшего объекта до источника сейсмических волн, на котором значения скорости должны быть  $\leq U_{доп}$ , необходимо определить предельную массу зарядов, либо применить иные технологические приемы, либо ограждать защищаемый объект специальными экранирующими преградами. При возникновении сейсмических волн, как следствия горных ударов, регулирование динамических параметров в случае их значений выше предельно допустимых по отношению к защищаемому объекту, безопасность последнего может быть обеспечена лишь путем устройства сейсмозащитных экранов.

2. При взрывании ряда вертикальных скважинных зарядов динамические характеристики объемных и поверхностных волн в профиле, перпендикулярном линии зарядов, намного выше по сравнению с параметрами волн в продольном направлении.

3. Параметры цилиндрических сейсмозрывных волн зависят от массы и конструкции зарядов, глубины заложения и свойств среды.

4. Прогнозирование возникновения и воздействия горных ударов на фундаменты поверхностных сооружений и природных объектов затрудняется отсутствием надежных методик по определению параметров возбуждения и распространения упругих возмущений. В связи с этим предлагается оценку энергетических и волновых параметров движения осуществить по тротиловому эквиваленту горного удара, что позволяет применить при анализе этого явления закономерности распространения сейсмозрывных волн.

5. При рассмотрении вопросов сейсмобезопасности следует учитывать частотную характеристику волн, так как масштаб явления влияет на максимальную плотность спектра в сторону сдвига в область более опасных низких частот.

1. Кузьменко А.А., Воробьев В.Д., Денисюк И.И., Даулетас А.А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М: Недра, 1990. – 173 с.
2. Чанг Юнг Бок, О.А. Вовк Влияние упругих возмущений на физико-химические свойства породного массива // В сб. материалов V Jubileuszowa Szkowa Geomechaniki. – Czesc II Gliwice – Ustron, 2001. – С. 23–34.
3. Вовк О.А., Кугель М. Оценка сейсмического влияния горных ударов на поверхности объектов // Тезисы 2-й международной конференции "Инженерный захист територій і її об'єктів у зв'язку з розвитком небезпечних геологічних процесів. – К: Знання, 2000. – С. 85–88.
4. Кригер Н.И., Алешин А.С., Кожевников А.Д., Миндаль И.Г. Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. – М.: Наука, 1980. – 104 с.
5. Мосинец В.Н., Горбачева Н.П. Сейсмический метод определения параметров зон деформаций горных пород взрывом // ФТПРПИ. – N 6, 1978. – С. 43–52.
6. Вовк А.А., Кузьменко А.А. Сейсмическое действие взрыва рассредоточенного заряда // Прикладна механіка. – 2001. – Том 3(75), N2. – С. 5–9.
7. Кравец В.Г. Динамика уплотнения грунтового массива взрывом. – К.: Наук. думка, 1979. – 134 с.