

Параметры сейсмических волн при действии сосредоточенного заряда

Приведена схема развития деформационных процессов в угольном массиве вокруг источника динамических возмущений, предполагающая наличие двойного сейсмического очага. Рассмотрена схема эмиссии упругих колебаний и предложена концепция двойного сейсмического излучателя.

Сейсмические волны как следствие динамических процессов в породах, вызванных массовыми глубинными взрывами либо горными ударами, возникающими при подземной разработке угольных месторождений, представляют собой довольно сложное физико-механическое явление, требующее всестороннего изучения на всех главных этапах: от зарождения на границе очага с максимально точными начальными параметрами движения до определения закономерностей их изменения. До настоящего времени основной источник информации по изучению указанных явлений – регистрограммы колебаний волн в пунктах наблюдения на поверхности Земли, основания фундаментов, призмы движения склонов дна водоема и т. п.

Горная наука накопила достаточное количество экспериментального материала при добыче угля (рудного сырья и т. д.), однако, учитывая значительное количество технологических факторов и условий формирования очагов возбуждения сейсмических колебаний и их распространения (разнообразие свойств среды, анизотропия, энергетический уровень очага и т. п.), надежные методы оценки и прогнозирования интенсивности сейсмических колебаний на любом фиксированном расстоя-

нии от источника возмущений до сих пор не созданы.

Наиболее существенные факторы, влияющие на характер зарождения и движения сейсмических волн в среде:

- общая масса (энергетический потенциал), конструкция и взаимное расположение зарядов. В этой связи отличительными признаками являются симметрия источника (сферическая, цилиндрическая), количество зарядов и их взаимное расположение (распределенные, одно- или многорядные);
- физико-механические свойства взрывааемых пород (крепкие, скальные, слабосжимаемые), их изменения с удалением от источника колебания вдоль луча волны;
- глубина нахождения источника по отношению к дневной поверхности (расположенные на глубине или вблизи свободной поверхности).

В упругой области колебаний грунта основную долю сейсмической энергии несут волны объемные (продольные P , поперечные S), распространяющиеся в массиве, и поверхностные R – вдоль свободной поверхности. Последние несут признаки продольной и поперечной волн, отличаются большими амплитудами и периодами колебаний, высоким энергетическим потенциалом.



О. А. БОВК,
канд. техн. наук
(НТУУ «КПИ»)

Сейсмические волны характеризуются различными признаками и параметрами, важнейшие из которых: размеры сейсмоизлучателя (объема пород, на границе которого деформации достигают упругого предела), начальная скорость распространения объемных волн (продольной v_p и поперечной v_s) как функции упругих характеристик породы очага; начальная массовая скорость колебания частиц в волне $U_{нач}^{P, S}$; видимый период колебаний $T_H^{P, S}$.

Опишем механизм зарождения и формирования начальных параметров сейсмических волн применительно к действию одиночного заряда сферической конфигурации.

Напряженно-деформированное состояние породного массива, в том числе угольного, вокруг взрываемого сферического заряда, характеризуется тремя зонами: дробления; систематических (радиальных) трещин; упругих деформаций. Исходными данными для исследования процесса движения сейсмозрывных волн служат упомянутые динамические и временные параметры.

Радиус зоны трещин находим по формуле Родионова [2]

$$r_u^S = 0,707 r_{з.др} \sqrt{\sigma_{сж} / \sigma_p}, \quad (1)$$

где $r_{з.др}$ – внешняя граница зоны дробления;

$\sigma_{сж}/\sigma_p$ – коэффициент хрупкости $K_{хр}$, который можно заимствовать из справочных материалов либо определить в лабораторных условиях;
 $\sigma_{сж}$ и σ_p – напряжения сжатия и растяжения.

Если исходить из предложенной нами концепции о механизме излучения объемных волн двумя независимыми излучателями, то данная формула определяет границу возбуждения поперечных волн начальной скоростью v_S , в то время как начало движения продольной волны со скоростью v_P связано с внешней границей зоны дробления, которая при сферической конфигурации очага

$$r_{з.др} = r_u^P = 0,693r_n \sqrt[3]{E/\sigma_{сж}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, который следует определять с учетом фактической глубины нахождения очага;

r_n – радиус полости, вычисляется, в частности, по показателю коэффициента простреливаемости $\Pi_{пр}$ (предложенные Союзвзрывпромом [5]), для сосредоточенного заряда

$$r_n = r_3^{сф} \sqrt{\Pi_{пр}^{сф}}. \quad (3)$$

Приняв радиус сферического заряда $r_3^{сф} = 0,06\sqrt[3]{Q_{в.в}}$, радиус полости

$$r_n^{сф} = 0,06\sqrt[3]{\Pi_{пр} Q_{в.в}}, \quad (4)$$

где $Q_{в.в}$ – масса взрывчатого вещества, кг.

При расчете радиуса полости влияние горного давления на его размеры несущественно, а при определении радиусов излучателя для продольных $r_{з.др}^P$ и поперечных $r_{з.др}^S$ волн горное давление играет существенную роль, если превышает 10^6 Па. При среднем гравитационном градиенте 2,4 кПа это соответствует расположению излучателя на глубине 40 – 45 м, ниже которой учет влияния горного давления в форме суммирования с показателем прочности породы на сжатие обязателен.

Чтобы рассчитать начальную массовую скорость в продольных и поперечных волнах, воспользуемся соотношением, учитывающим фактор упругого поведения горной породы, принимая предельную упругую деформацию соответственно сжатия или сдвига:

$$U_{нач}^{P,S} = \frac{0,375[v_p^2 - (4/3)v_s^2] \left\{ [1 + (1-2\nu)\epsilon_0]^{8/3} - 1 \right\}}{v_p [1 + (1-2\nu)\epsilon_0]^4}, \quad (5)$$

где ϵ_0 – критическая деформация: для продольной волны (находим из формулы Гука) $\epsilon_0^P = \sigma_{сж}/E$; для поперечной $\epsilon_0^S = \sigma_{сд}/G$;

$\sigma_{сд}$ – напряжение на сдвиг;

G – модуль сдвига;

ν – коэффициент Пуассона.

Скорости продольной и поперечной волн вычисляем по известным в теории упругости соотношениям.

К числу важных параметров, характеризующих сейсмоколебательные процессы, относятся такие временные показатели, как частотный спектр и видимый период T волны (величина, обратная частоте).

Большинство ученых, признавая отмеченный факт разновременности формирования отдельных волн, в частности P и S их разновидностей, подтверждая и различие координат зарождения, тем не менее высказывают точку зрения о том, что период колебаний для них общий. В качестве границы возбуждения P -волн (считая их намного более энергонасыщенными и подлежащими первоочередному анализу) рассматривается поверхность на внешней границе завершения сдвиговых необратимых деформаций с радиусом $r_{з.тр}^S = r_u^S$, хотя исследуется сигнал, где колебания частиц происходят в радиальном направлении. Основанием служит предположение о наложении волн, возникающих на различных стадиях процесса разрушения и независимо распространяющихся по принципу суперпозиции. Сейсмограмма (если удастся ее получить) фиксирует этот сложный колебательный процесс.

Зарегистрировать независимые сигналы возможно лишь на определенном расстоянии от границ сейсмочага, куда они приходят с запаздыванием по отношению друг к другу в 1,5 – 2 раза. В непосредственной близости от его границ в результате суперпозиции параметры этого сложного колебания, хотя и относятся к начальным показателям P -волны, в действительности усредненные.

Поскольку промышленная сейсмика развивалась в основном на базе экспериментальных исследований взрыва зарядов неглубокого заложения (часто рыхления или выброса), главными объектами изучения были продольные и поверхностные волны при их распространении по третичным и четвертичным отложениям. Вычленив поперечную волну из общего сигнала в качестве независимого объекта анализа во многих случаях не представлялось возможным (многие специалисты считали неактуальным). Поэтому для оценки искомых параметров колебаний используют эмпирические соотношения в виде функции массы заряда в степени 1/3 либо 1/6 (например, T_0 , $r_+ = f(Q_{в.в}^{1/3}, Q_{в.в}^{1/6})$, где T_0 – период колебаний в начале движения волны; τ – колебания при движении волны), в которых коэффициенты пропорциональности отражают свойства среды. Причем использование данных в прогнозных оценках затруднительно из-за неоднозначности предлагаемых коэффициентов в порогах одного класса.

Для получения искомых (в частности, частотно-временных) параметров сейсмических колебаний при их зарождении и в процессе движения по среде воспользуемся методом обобщения и анализа наиболее представительных и экспериментально подтвержден-

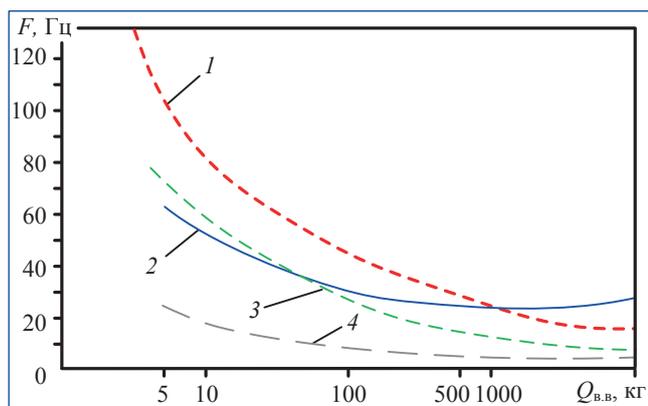


Рис. 1. Зависимости частоты колебаний на упругой границе от массы заряда: 1 – по формуле (1а – граниты); 2 – по формуле (2б) – граниты; 3 – по формуле (1а) – глинистые породы; 4 – по формуле (2б) – глина.

ных эмпирических формул, полученных на основе обработки большого массива экспериментального материала.

Экспериментальные зависимости для определения периода колебаний в продольных волнах при взрывании сосредоточенных зарядов массой 5 – 10000 кг приведены в табл. 1 [1; 2], из которой следует, что формула (1а) является функцией $T = f(Q_{в.в}^{1/3})$, коэффициент пропорциональности, отражающий свойства среды, здесь отличается лишь максимумом в 2 раза при рассмотрении процесса в разных породах (в среднем в 1,44 раза). Формулы (2б) и (3в) практически идентичны. Рассмотрим формулу (2б). Она является функцией $T = f(Q_{в.в}^{1/6})$, разница в коэффициентах пропорциональности здесь достигает 3,2, т. е. в 1,6 – 2,2 раза больше, чем в первом случае.

Сравнительные расчетные данные показателей частотно-временных начальных параметров объемных сейсмических волн при взрывании в гранитах

и глинах зарядов массой 5 – 10000 кг приведены в табл. 2, из которой следует, что расчетные данные, полученные по формулам (1а) и (2б), отличаются в 2 раза в гранитах при взрывании малых зарядов (до 5 кг) и в 3,8 раза в глинах. Но с увеличением массы заряда в пределах 200 – 500 кг значения периода T_P по обеим формулам практически идентичны, а при дальнейшем росте массы заряда до 10000 кг этот показатель, подсчитанный по формуле (2б), становится на 40 % меньше, чем рассчитанный по формуле (1а).

В результате рассмотрения расчетных показателей в глинах (глинистых породах) период T_P приобретает идентичные значения по обеим формулам, если заряд массой 10^4 кг и более.

На рис. 1 приведена графическая интерпретация данных табл. 2 в координатах $\log Q_{в.в} \approx F$. Анализ кривых и данных табл. 2 указывает на различие тенденций изменения временных параметров по мере роста массы сосредоточенного заряда в зависимости от вида функции $T = (Q_{в.в}^{1/3})$ или $T = (Q_{в.в}^{1/6})$. Расхождения можно объяснить рядом причин, прежде всего несовершенством исследуемых методик, принимающих интегральные коэффициенты пропорциональности без исследования их структуры, а также усредненные значения в пределах одной категории пород. Например, прочность на сжатие в гранитах изменяется в пределах 70 – 300 МПа, т. е. почти в 4,3 раза, в известняках – от 70 до 160 МПа, или более чем в 2,2 раза, в песчаниках 27 – 72 МПа, или в 2,7 раза. И это не считая таких литологических особенностей, как глубина (горное давление), выветрелость приповерхностных пластов скальной породы и некоторые другие.

Если исходить из предлагаемой нами концепции двойного сейсмического очага (излучателя) на внешней границе зоны дробления, частота колебаний достигает первого максимума F_{\max} , определяющего координату зарождения продольной волны r_u^P со своим

Таблица 1

№ п/п	Тип пород	Формула для определения	Значение коэффициента пропорциональности пород
1а	Скальные, осадочные и глинистые	$T_{оч}^P = K_T \sqrt[3]{Q_{в.в}}$	0,004 – 0,005 – скальные; 0,005 – 0,008 – осадочные и глинистые
2б	Угли, граниты, глины	$T_{оч}^P = K_T \sqrt[6]{Q_{в.в}}$	0,0125 – граниты; 0,04 – глины
3в	Скальные (угли, граниты, известняки), глины	$\tau_+^P = K_T \sqrt[6]{Q_{в.в}}$	0,0032 – граниты, известняки ($4K_T = 0,0128$) 0,01 – глины ($4K_T = 0,04$)

Примечание. В таблице обозначено: $T_{оч}^P$ – период колебаний P-волны на границе очага; K_T – коэффициент пропорциональности; τ_+^P – период колебаний P-волны в процессе движения.

Таблица 2

Формула согласно табл.1	Породы, параметры	Частотно-временные начальные параметры волн при массе заряда $Q_{в.в}$, кг				
		5	50	500	1000	10000
1а	Граниты: $T_{оч}$, с; $F = 1/T_{оч}$, Гц	0,0077	0,017	0,036	0,045	0,0969
		130	59	27,8	22,2	10,3
	Глинистые породы: $T_{оч}$, с; $F = F = 1/T_{оч}$, Гц	0,0136	0,0294	0,0635	0,08	0,172
		73,5	34	15,9	12,5	5,8
2б	Граниты: T_p , с; $F = 1/T_p$, Гц	0,016	0,024	0,035	0,04	0,058
		62,5	41,7	28,6	25	17,2
	Глины: T_p , с; $F = 1/T_p$, Гц	0,052	0,0768	0,113	0,126	0,186
		19,2	13	8,85	7,94	5,38

Примечание. В таблице обозначено: $T_{оч}$ – период колебаний очага; T_p – период колебаний продольной волны.

периодом колебаний. На этом расстоянии поперечная волна еще не может зарождаться, поскольку сдвиговые деформации будут необратимыми и за пределами зоны дробления, так как прочность породы на сдвиг (тем более на разрыв) намного меньше, как следует из известного соотношения $\sigma_{сд} = (v/1 - v)\sigma_{сж}$.

Упругий предел сдвиговых деформаций наступит на более удаленной границе, где колеблющиеся частицы достигают второго максимума F_S^{max} . Объем породы, разрушенной необратимо сдвиговыми критическими напряжениями, – второй сейсмический очаг (излучатель) с радиусом $r_{з.тр} > r_{з.др}$ как координата зарождения поперечной волны r_u^S . Частотно-временную характеристику Р-волны логично принимать в виде функции; начальная интенсивность волны достаточно высокая, поскольку формируется в условиях действия механизма сжатия и высоких скоростей ($v \geq v_p$).

Для оценки временных показателей сдвиговой (поперечной) волны можно считать более обоснованным принимать их пропорциональными $Q_{в.в}^{1/6}$. Интенсивность этой разновидности волны меньше, чем Р-волны, так как она зарождается на границе предельных меньших сдвиговых напряжений ($\sigma_{сд} > \sigma_{сж}$) и скоростей ($v_s < v_p$). Обоснованность такого подхода к анализу зарождения упругих волн вокруг энергоисточника можно подтвердить рядом аргументов.

Рассмотренная схема эмиссии упругих колебаний не согласуется с имеющимися представлениями о равенстве временных параметров в обеих разновидностях объемных волн. Расчетные данные табл. 2 и их графическая интерпретация наглядно демонстрируют различие этих параметров при использовании эмпирических соотношений согласно табл. 1, что можно объяснить лишь принадлежностью к разным сигналам.

Выводы. Предложена схема развития деформационных процессов в угольном пласте и вмещающих по-

родах вокруг источника динамических возмущений, рассматривающая наличие двойного сейсмического очага (излучателя), один из которых излучает продольную волну (радиус излучателя $r_u^P = r_{з.др}$), и другой – поперечную в виде объема деформированной необратимо породы, критическими сдвиговыми деформациями и радиусом $r_u^P = r_{з.тр}$. Начальные параметры сейсмических волн формируются на границе излучателя. Предложено рассматривать две разновидности сейсмоизлучателя радиусом r_u^P , равным радиусу дробления $r_{др}$, на внешней границе которого формируются начальные параметры продольной волны, и радиусом r_u^S , равным радиусу зоны трещин $r_{тр}$, на границе которого зарождаются поперечные волны. Период колебаний в продольной волне предлагается рассматривать в виде функции $T_p(Q_{в.в}^{1/6})$, в поперечной – как $T_s(Q_{в.в}^{1/3})$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосинец В. Н. Основные научно-технические проблемы сейсмике ближней зоны / В. Н. Мосинец, В. Ф. Богацкий // Взрывное дело. Сейсмика промышленных взрывов. – 1983. – № 85/42. – С. 89 – 101.
2. Вовк О. О. Вплив підземних гірничих робіт на стан довілля / В. М. Ісаєнко, В. Г. Кравець, О. О. Вовк. – К.: Вид-во НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2011. – 543 с.
3. Вовк О. А. Исследование влияния симметрии источника на параметры сейсмических волн / О. А. Вовк, М. Кугель // Прикладная гидромеханика. – 2002. – Т. 4(76). – № 2. – С. 14 – 22.
4. Вовк О. А. Временные характеристики сейсмических волн при взрывах одиночных и групповых зарядов различной конструкции / О. А. Вовк // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78). – № 3. – С. 9 – 21.
5. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. – М.: Недра, 1972. – 128 с.