С.В.ЛУКИЧЁВ
Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В разное время и различными авторами делались попытки связать амплитудно-частотные характеристики сейсмического сигнала с параметрами заряда, условиями его взрывания и размерами производимого взрывом разрушения. К таким попыткам можно отнести результаты измерения параметров волн напряжений при взрыве в условиях всестороннего сжатия [5], экспериментальных и теоретических исследований скорости роста трещин от взрыва единичного заряда в горных породах [3, 4]. В работе [1] предложена зависимость, связывающая частоту колебания среды с коэффициентом Пуассона ν, скоростью продольной волны c_l и максимальным радиусом зоны разрушений r_m:

$$\tilde{\omega} = \frac{\sqrt{1-2\nu}}{1-\nu}\frac{c_l}{r_m}.$$

В упомянутых работах прямо или косвенно делается вывод о влиянии условий взрывания (статических напряжений в массиве горных пород и его упругопрочностных характеристик) на длительность взрывного импульса. Однако информативные характеристики сейсмического сигнала изучены не в полной мере. Предпочтение, как правило, отдается анализу сигнала от взрыва сферического заряда без разделения сигнала на низко- и высокочастотную составляющие.

Для восполнения существующего пробела были выполнены исследования, цель которых состояла в выявлении закономерностей формирования сейсмического сигнала применительно к ближней зоне действия взрыва одиночного цилиндрического заряда. Выбор в качестве

источника сейсмического сигнала взрыва цилиндрического заряда обусловлен абсолютным преобладанием такого типа зарядов в практике ведения взрывных работ.

Исследования проводились с использованием двумерной плоской численной модели взрыва цилиндрического заряда в упругопластической среде с разрушением, описание которой дано в работе [2].

Для моделирования заряда (численные эксперименты проводились для шпуров с радиусом зарядной полости r_0 = 0,021 м) использовались характеристики, соответствующие широко распространенному ВВ (79 % аммиачной селитры и 21 % тротила). Энергия заряда с учетом потерь Q = 3400 кДж/кг, плотность $\rho_{ВВ}$ = 1000 кг/м^3.

Для моделирования массива пород были использованы следующие характеристики среды: плотность $\rho_{г.п}$ = 2600 кг/м^3; критическая величина необратимой деформации, связанной с разрушением материала, $e_{кр}$ = 0,02; статический предел прочности на отрыв $\sigma_р$ = 10 МПа, на сдвиг τ_0 = 30 МПа; компонента статического напряжения, перпендикулярная плоскости сечения взрывной полости, $\sigma_y = -0,1$ МПа.

Граничные условия принимались, исходя из задачи моделирования взрыва заряда в безграничном массиве.

Во всех численных экспериментах отслеживалось развитие зоны разрушения и влияние ее размеров на формирование сейсмического сигнала. В качестве объекта анализа была использована радиальная компонента скорости смещения среды в точке наблюдения. Точка наблюдения располагалась на расстоянии $80r_0$ от оси заряда и выбиралась из условия получения максимально информативного сейсмического сигнала, т.е. сигнала, в котором присутствует весь спектр частот.

Размеры сеточной области ($125r_0 \times 125r_0$) и время моделирования ($t = 300c_l/r_0$) были выбраны такими, чтобы исключить влияние границ сеточной области на формирование сигнала.

Для оценки размера зоны разрушения вычислялся ее относительный средний радиус:

$$r_t = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} S_i/\pi r_0^2},$$

где S_i – площадь ячейки, в которой произошло сдвиговое или отрывное разрушение; n – число таких ячеек.

Для исследования влияния размеров зоны разрушения на низкочастотную составляющую сейсмического сигнала было проведено три серии численных экспериментов.

Изучение влияния статических напряжений на параметры сейсмического сигнала (1-я серия). Скорости распространения продольной и поперечной волн в массиве приняты постоянными: c_l = 4990 м/с, c_s = 2830 м/с.

Моделировался взрыв заряда в поле статических напряжений, главные компоненты которых в плоскости сечения взрывной полости σ_r и σ_x были равны между собой, но имели разные значения: –0,1 МПа (эксперимент 1), –30 МПа (эксперимент 2) и –60 МПа (эксперимент 3). Для иллюстрации результатов моделирования на рис.1 приведены картины разрушения на один и тот же момент времени для всех экспериментов этой серии. Эксперименты показали, что средняя скорость роста зоны разрушения r_t, являясь величиной достаточно постоянной в начальный момент времени, затем резко снижается, падая до нуля (рис.2). Резкое снижение скорости роста зоны разрушения объясняется переходом от массового роста трещин к формированию единичных.

Графики зависимости изменения радиальной компоненты скорости смещения в точке наблюдения от времени (рис.3) свидетельствуют, что статические напряжения, снижая радиус зоны разрушения, приводят и к изменению сейсмического сигнала, смещая его хвостовую часть в область отрицательных значений.

Выделение низкочастотной составляющей сейсмического сигнала (рис.4) и последующий анализ подтвердил предположение о ее связи с размером зоны разрушения. Для оценки средней скорости роста зоны разрушения была использована зависимость

$$c_t = k_t c_l,$$

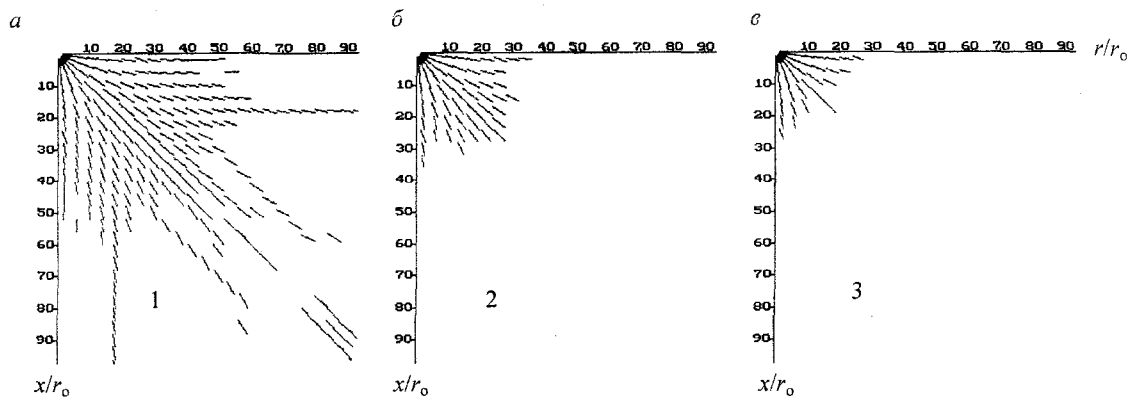


Рис.1. Картина разрушения при взрыве в поле действия статических напряжений: *а-в* – эксперименты 1-3

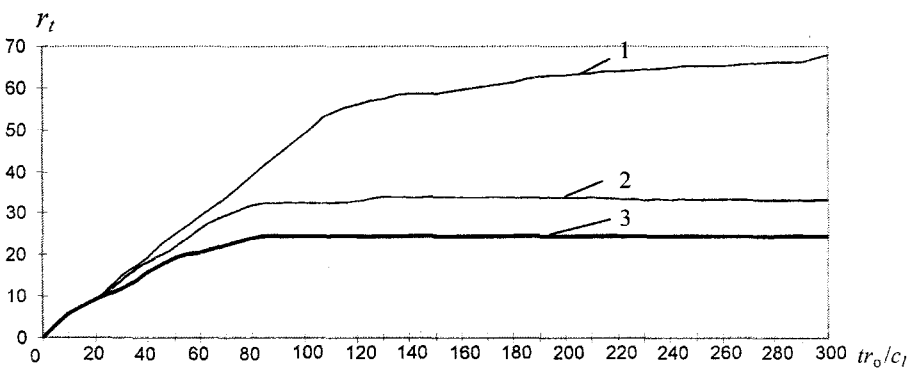


Рис. 2. Зависимость среднего радиуса зоны разрушения r_t от времени t в экспериментах 1-3

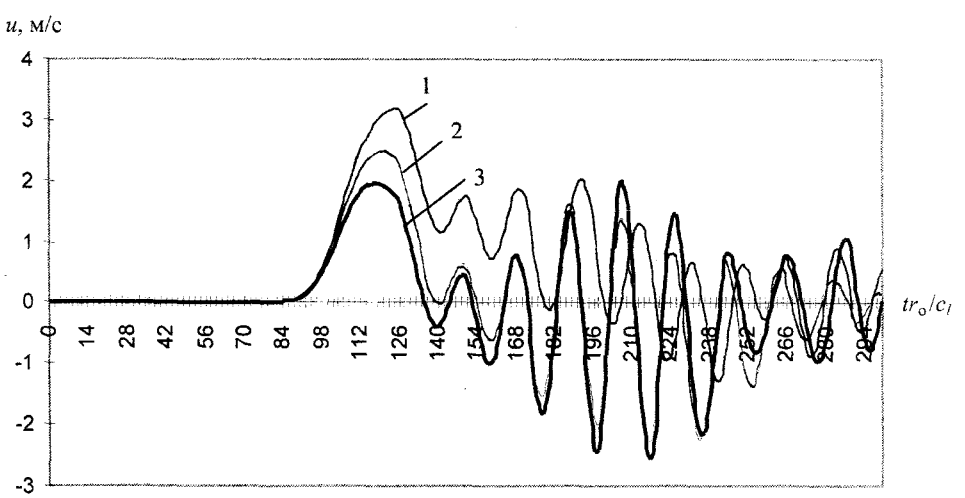


Рис. 3. Зависимость скорости смещения u от времени t в экспериментах 1-3

где $k_t = r_{tm}/\tau_+$ – коэффициент перехода от скорости продольной волны к скорости роста зоны разрушения; r_{tm} – максимальное значение относительного среднего радиуса зоны разрушения; $\tau_+ = \tau c_l/r_o$ – относительная длительность положительного полупериода τ скорости смещения среды в точке наблюдения.

По значениям r_{tm} и τ_+, полученным из графиков (рис.2 и 4), можно вычислить k_t для экспериментов 1-3: $k_t^1 = 59/142 = 0{,}42$; $k_t^2 = 33/78 = 0{,}42$; $k_t^3 = 25/62 = 0{,}40$.

Следует отметить, что для 1-го эксперимента в отличие от 2-го и 3-го r_{tm} определяется не столь однозначно, так как в пределах времени моделирования не достигает своего максимального значения, а при $t = 120r_o/c_l$ (рис.2) лишь резко снижает скорость роста, что связано с развитием разрушения за счет прорастания единичных трещин (см. рис.1). Исходя из этого, при анализе результатов 1-го эксперимента было принято $r_{tm} = 59$, что соответствует длительности положительного полупериода $\tau_+ = 142$ (рис.4), в течение которого скорости смещения положительны.

Сравнение значений k_t^1, k_t^2, k_t^3 показывает, что, несмотря на сильно отличающиеся значения r_{tm}, коэффициенты перехода k_t, а следовательно, и средние скорости развития зоны разрушения c_t для всех трех экспериментов близки. Это позволяет сделать вывод о слабом влиянии напряженного состояния массива горных пород на среднюю скорость развития зоны разрушения.

Изучение влияния модуля Юнга на скорость развития зоны разрушения (2-я серия). В качестве критерия оценки скорости развития зоны разрушения, как и в 1-й серии, был использованы коэффициент k_t, рассчитываемый через параметры сейсмического сигнала r_{tm} и τ_+.

Постоянным в этой серии экспериментов был коэффициент Пуассона ($\nu = 0{,}25$), переменным – модуль Юнга, который изменялся от $E = 2{,}7 \cdot 10^4$ МПа ($c_l = 3530$ м/с, $c_s = 2040$ м/с) в 4-м эксперименте до $E = 8{,}1 \cdot 10^4$ МПа ($c_l = 6110$ м/с, $c_s = 3530$ м/с) в 5-м. Компоненты напряжений σ_r и σ_x были приняты равными –30 МПа.

Результаты численных экспериментов 4 и 5, обработанные и представленные аналогичным с 1-й серией образом, представлены на рис.5 и 6.

Расчет k_t для 4-го и 5-го экспериментов дал следующие результаты: $k_t^4 = 31/68 = 0{,}45$; $k_t^5 = 34/80 = 0{,}42$.

Сравнение k_t^2, k_t^4 и k_t^5 показывает, что, несмотря на некоторый разброс, их величины близки и мало чем отличаются от значений, полученных по результатам 1-й серии экспериментов.

В целом же анализ результатов 2-й серии численных экспериментов позволяет сделать вывод об отсутствии заметного влияния модуля Юнга на величину k_t.

Исследование влияния коэффициента Пуассона на скорость роста зоны разрушения (3-я серия). Постоянным параметром в этой серии экспериментов являлся модуль Юнга $E = 5{,}4 \cdot 10^4$ МПа, переменным – коэффициент Пуассона ν, который менялся от 0,1 ($c_l = 4610$ м/с, $c_s = 3070$ м/с) в 6-м эксперименте до $\nu = 0{,}4$ ($c_l = 6670$ м/с, $c_s = 2720$ м/с) в 7-м эксперименте. Базовым и для этой серии опытов остался 2-й эксперимент.

Результаты 3-й серии численных экспериментов, обработанные и представленные аналогичным с первыми двумя сериями образом, приведены на рис.7, 8.

Для 6-го и 7-го экспериментов $k_t^6 = 30/66 = 0{,}5$ и $k_t^7 = 44/120 = 0{,}35$.

Так как $k_t^2 = 0{,}42$ ($\nu = 0{,}25$, $E = 5{,}4 \cdot 10^4$ МПа), то можно сделать вывод об уменьшении величины k_t по мере увеличения коэффициента Пуассона.

Анализ результатов численных экспериментов строился на оценке величины k_t для моделируемых условиях взрывания. По результатам экспериментов было установлено, что при прочих равных условиях на величину k_t существенно влияет лишь коэффициент Пуассона ν. Средняя скорость роста зоны разрушения $\bar{c}_t$ в массиве связана через коэффициент Пуассона ν со скоростью продольной волны c_l зависимостью

$$\bar{c}_t = (0{,}43 + 0{,}29\nu - 1{,}24\nu^2)c_l.$$

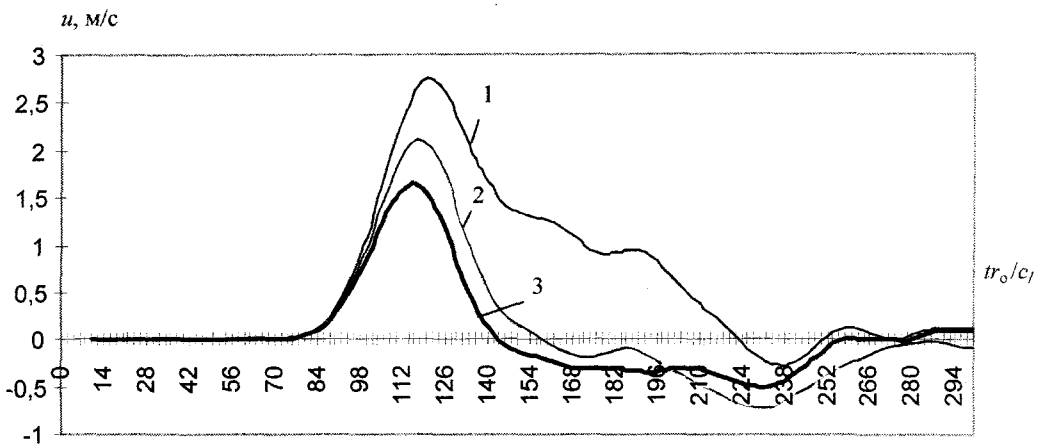


Рис. 4. Зависимость низкочастотной составляющей u от t в экспериментах 1-3

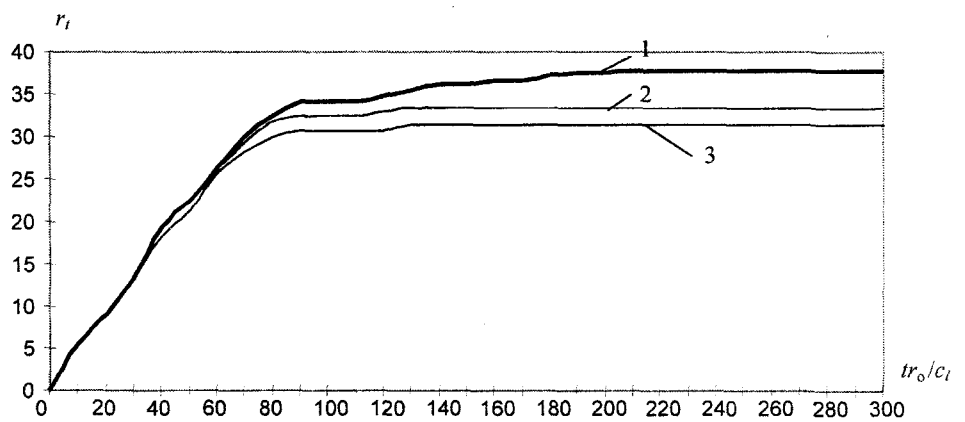


Рис. 5. Зависимость среднего радиуса зоны разрушения r_l от времени t в экспериментах 2 (кривая 2), 4 (кривая 3) и 5 (кривая 1)

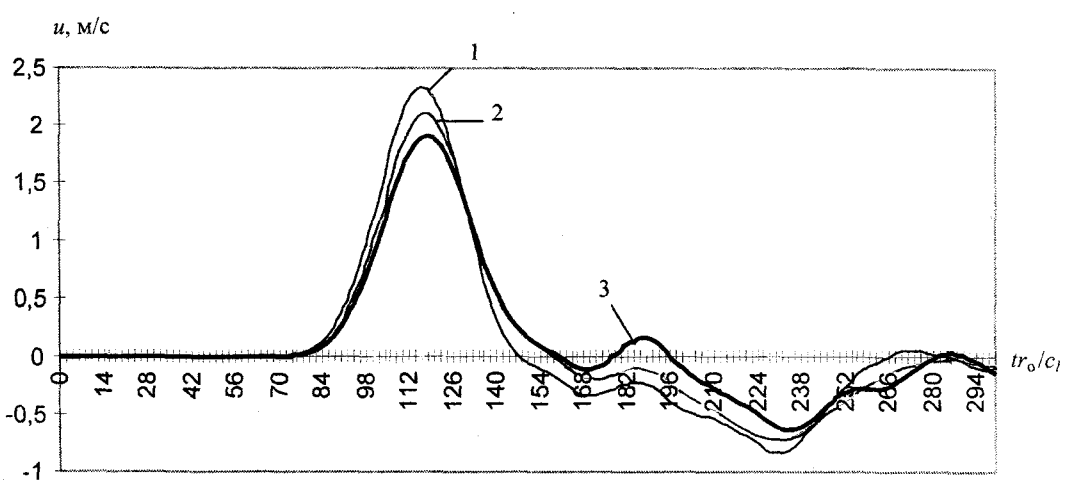


Рис. 6. Зависимость низкочастотной составляющей u от t в экспериментах 2 (кривая 2), 4 (кривая 3) и 5 (кривая 1)

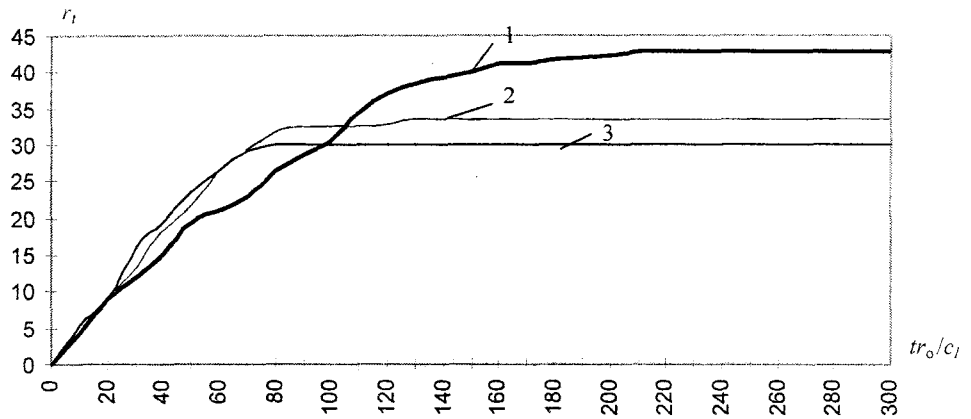


Рис. 7. Зависимость среднего радиуса зоны разрушения r_l от времени t для экспериментов 2 (кривая 2), 6 (кривая 3) и 7 (кривая 1)

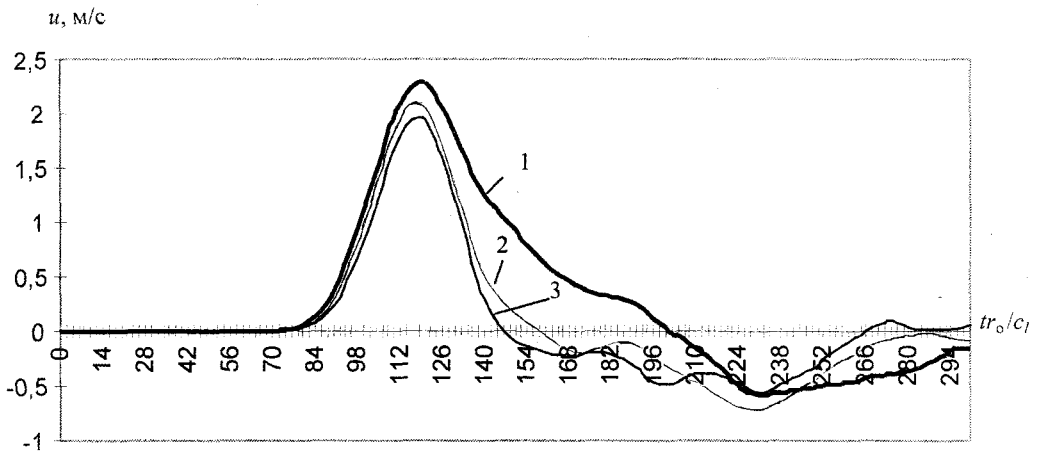


Рис. 8. Зависимость низкочастотной составляющей u от t в экспериментах 2 (кривая 2), 6 (кривая 3) и 7 (кривая 1)

Анализ численных экспериментов также показал, что средний радиус зоны разрушения ($\bar{r}_l$) с достаточной степенью точности может быть определен через среднюю скорость ее роста ($\bar{c}_l$) и длительность 1-го положительного полупериода низкочастотной составляющей скорости смещения массива τ по формуле: $r_l = \bar{c}_l \tau$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зверев А.А.* Частотно-временные характеристики упругой волны, излучаемой при камуфлетном взрыве / А.А.Зверев, Е.Е.Ловецкий, В.С.Фетисов // ПМТФ. 1986. № 2.

2. *Лукичев С.В.* Численное моделирование процесса динамического деформирования и разрушения массива горных пород при взрыве одиночного и группы зарядов / С.В.Лукичев, С.А.Козырев // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород / ИПКОН. М., 1999.

3. *Новиков В.Г.* Расчет зоны интенсивной радиальной трещиноватости при взрыве / В.Г.Новиков, Б.М.Туманов // ФТРПИ. 1982. № 2.

4. *Петросян М.Н.* О долевом участии взрывной волны и поршневого действия газов в разрушении напряженно-деформируемого массива // ФТРПИ. 1985. № 5.

5. *Ханукаев А.Н.* Снижение напряженности горного массива с помощью взрывов / А.Н.Ханукаев, Н.Ф.Кусков, В.И.Пшеничный и др. М.: Наука, 1979.