

С.В. ТИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.,
Г.И. ЕРЕМЕНКО, канд. техн. наук, Криворожский технический институт,
Д.Ю. МАЛЫХ, начальник отдела технологии, ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»

ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ

В практике буровзрывных работ успешно используются методы управления энергией взрыва, основанные на использовании процесса взаимодействия скважинных зарядов.

Разрушение является функцией напряжений горной породы, интенсивность разрушения характеризуется частотой зарождения трещин, скоростью их распространения, длительностью разрушающих напряжений. Основными факторами, определяющими процесс разрушения, являются – величина напряжений, возникающая в массиве горных пород при взрыве заряда ВВ, продолжительность действия напряженного состояния и физико-механические свойства среды. Регулирование процесса разрушения горных пород можно осуществить путем изменения параметров времени взрывного нагружения.

Очевидно, что одним из направлений повышения эффективности взрывных работ в условиях открытой разработки полезных ископаемых является исследование и разработка методов управления энергией взрыва, основанной на взаимодействии скважинных зарядов ВВ, взрываемых в одной ступени замедления. Согласно полученных результатов взрывание в режиме малых замедлений эффективно и рационально с точки зрения энергетической картины разрушения горного массива.

Одним из направлений повышения эффективности взрывных работ в условиях открытой разработки полезных ископаемых является исследование и разработка методов управления энергией взрыва, основанной на взаимодействии скважинных зарядов ВВ, взрываемых в одной ступени замедления. Согласно полученных результатов взрывание в режиме малых замедлений эффективно и рационально с точки зрения энергетической картины разрушения горного массива.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В исследованиях [1,2,3] делается вывод о том, что для достижения разрушения среды в заданной точке, необходимо обеспечить определенные длительность и величину напряжений, а также установить критерий оценки разрушения. В качестве такого критерия взято соотношение

$$I \geq \sigma_0 \cdot 1,5t,$$

где I - импульс взрыва; σ_0 - разрушающее напряжение; t - время воздействия импульсной нагрузки.

Известно, что критическая длина трещины в породе, полученной в результате взрыва, есть функция предела прочности этой породы

$$F = f(\sigma_0),$$

где σ - предел прочности.

Разрушение является функцией напряжений горной породы, интенсивность разрушения характеризуется частотой зарождения трещин, скоростью их распространения, длительностью разрушающих напряжений. Основными факторами, определяющими процесс разрушения, являются – величина напряжений, возникающая в массиве горных пород при взрыве заряда ВВ, продолжительность действия напряженного состояния и физико-механические свойства среды. Регулирование процесса разрушения горных пород можно осуществить путем изменения параметров времени взрывного нагружения.

В практике буровзрывных работ успешно используются методы управления энергией взрыва, основанные на использовании процесса взаимодействия скважинных зарядов.

Взаимодействие скважинных зарядов ВВ во времени характеризуется условиями

$$t < (l/v_1) \quad (1)$$

$$t > (l/v + \tau), \quad (2)$$

где l - расстояние между зарядами; v - скорость звука в породе; τ - интервал времени, необходимый для наложения волн в данной фазе; t - время между взрывами зарядов.

Неравенство, определяющее встречные режимы взаимодействия, имеет вид

$$t_{1,2} = l/2v,$$

где $t_{1,2}$ - время распространения волн от первого и второго зарядов.

При условии (1) наблюдается симметричная картина взаимодействия. Неравенство (2) является необходимым условием суперпозиции волн напряжения.

Обозначив через Δt время нарастания давления в импульсе, можно определить следующие варианты взаимодействия зарядов. При замедлении, равном

$$T = \frac{l}{v} + \Delta t$$

взрыв второго заряда ВВ происходит во фронте волны первого заряда. Замедление

$$T = \frac{l + x_0}{v} + \Delta t,$$

где x_0 - координата относительного фронта волны внутри положительной фазы волны от первого заряда, обеспечивает взрыв последующего заряда во время прохождения положительной фазы волны от первого заряда. При замедлении

$$T = \frac{x_1 + al}{v} + \Delta t, \quad (3)$$

где x_1 - координата относительного фронта волны в конце положительной фазы, распространяющиеся потоки второго срабатывающего заряда не взаимодействуют со встречными потоками первого заряда, происходит наложение потоков с положительной и отрицательной фазой волн. Для условия

$$T = \frac{x_2 + l + x}{v} + \Delta t, \quad (4)$$

где x_2 - текущая координата распространения отрицательной фазы волн, второй заряд взорвется при прохождении отрицательной фазы волны первого заряда.

В пределе второй заряд может сработать после прохождения отрицательной фазы волны. Для этого случая интервал замедления определяется следующим выражением

$$T = \frac{x_3 + l + x_2}{v} + \Delta t, \quad (5)$$

где x_3 - координата относительного фронта волны в конце отрицательной фазы волны первого заряда. В этом случае возможно отсутствие взаимодействия волн и можно считать, что происходит последовательное взрывание зарядов ВВ.

Следовательно, взаимодействие волн напряжений согласно формулам (3) - (5) от двух смежных зарядов ВВ возможно при замедлении, удовлетворяющем условию

$$t_1 \leq T \leq t_2,$$

где t_1 - время прохождения волны напряжений от взрыва предыдущего заряда ВВ к месту расположения последующего; t_2 - длительность действия волн напряжений.

Анализ исследований и публикаций. Временные параметры взаимодействия зарядов ВВ, по мнению многих исследователей [4, 5], целесообразно основывать на количестве накоплений в среде энергии. Накопление определенного количества энергии в заданном объеме горного массива, является необходимым условием для возникновения разрушения в нем. В общем виде полная энергия, накапливающаяся в данном элементарном объеме, при действии двух источников, может быть записана как

$$E = \sum_{i=1}^4 E_i,$$

где E_i - энергия, вносимая потоками за счет действия прямых волн I_1, I_2 и отраженных I_3, I_4 .

При этом характер распределения энергии взрыва в массиве скальных пород и интенсивность его разрушения, в свою очередь, зависят от степени трещиноватости, определяемой параметрами и свойствами заполнителя трещин в каждой системе. При неизменных параметрах заряда ВВ и физико-механических свойств пород, слагающих массив, закономерность распространения плотности потока энергии будет определяться параметрами и свойствами трещин. При распространении энергии взрыва через системы трещин плотность потока, прошедшего через них, определяется из уравнения

$$I = K \cdot I_0,$$

где I_0 - плотность потока энергии без учета трещин; K - коэффициент проводимости энергии единичной трещины.

Поток энергии определяется из следующего выражения

$$I = \frac{P_0 u (R_0 + Ct)^3}{r_i^3} e^{-2\alpha(t - \frac{r_i - R_0}{C})},$$

где u - массовая скорость перемещения частиц по радиусу; C - скорость развития трещин; $r_i (i = 1, 2, 3, 4)$ - векторы, проведенные из источников волн напряжений в выбранную точку; P_0 - начальное давление продуктов детонации; R_0 - радиус скважинного заряда; t - текущее время.

Накопление энергии в элементарном объеме в выбранной точке пространства, может быть определено как

$$dI(r, t) = \left(\frac{\partial I}{\partial r} + \frac{I}{C} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} \right) C \delta t,$$

Формула для полной энергии в заданном объеме примет вид

$$E = \frac{3P_0 u C}{r^4} \left(\int_n^m (R_0 + Ct)^3 e^{-2\alpha(t - \frac{r - R_0}{C})} dt - 1,2 \int_n^m (R_0 + Ct) e^{-2\alpha(t - \frac{r - R_0}{C})} dt \right)$$

$$n = 2,5(r - R_0)C^{-1}; \quad m = (r - R_0)C^{-1}.$$

Следовательно можно сделать вывод, что рациональным с точки зрения наиболее вероятного и интенсивного разрушения массива, при воздействии двух зарядов ВВ, является взрывание их с замедлением в интервале

$$(l/v) \leq T \leq (2l/v),$$

где l - расстояние между зарядами; v - скорость звука в породе.

В работе [6] были выполнены исследования по определению суммарной величины напряжений в произвольной точке при взаимодействии двух зарядов ВВ.

Напряженно-деформированное состояние массива, при одновременном взрыве зарядов, на основе сложения напряжений от каждого из них в процессе суперпозиций волновых полей определяется как

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} 2(1 + \cos \Delta \varphi)^{1/2},$$

где σ_1, σ_2 - напряжения в точке для каждого из зарядов; $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ - углы между линией зарядов и радиусами – векторами соответственно от первого и второго зарядов.

Для случая короткозамедленного взрывания суммарное напряжение равно

$$\sigma = \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_1 \cdot \cos \Delta \varphi \right)^{1/2},$$

Постановка задачи. Важным вопросом в представлении о возможном разрушении среды под действием импульсных нагрузок при взаимодействии скважинных зарядов ВВ, являются законы распространения и погашения энергии волн напряжений в среде, обладающей определенными упругими постоянными.

Энергия, переходящая в ударную волну W , может быть определена согласно [7], как часть общей энергии ВВ, и выражается зависимостью

$$W = LW_0 \tag{6}$$

при

$$L = \left(1 - \frac{f}{(\kappa - 1)\rho Q} \cdot \frac{V_\infty}{V_0} \right),$$

где f - прочностное сопротивление среды; V_0 - начальный объем расширения газов; V_∞ - конечный объем расширения газов; ρ - плотность ВВ; Q - потенциальная энергия ВВ; κ - показатель изэнтропы (в начальной стадии расширения $\kappa = 3$, в конечном $1,25 \div 1,4$).

Из зависимости (6) очевидно, что зоны пластических деформаций и прочностное сопротивление среды в оценке условий перехода энергии взрывчатого разложения ВВ в энергию ударной волны, имеют определяющее значение.

Прочностное сопротивление среды может быть определено как

$$f = \left(P_0^{1/\kappa} \cdot P^{\frac{\kappa-\kappa_1}{\kappa}} \cdot V_0 / V_\infty \right)^\kappa,$$

где P_0 - начальное давление продуктов взрыва; P_κ - давление, до которого расширение продуктов взрыва происходит по закону

$$P_\kappa V_\kappa^3 = \text{const} = P_n V_0^3.$$

Изложение материала и результаты. При взрыве заряда ВВ в разрушаемой среде существенная часть энергии взрыва теряется при переходе границы раздела «ВВ-среда», вследствие отражения детонационной волны от стенок зарядной камеры, благодаря чему часть продуктов взрыва до установления равновесия, будет двигаться не к периферии, а к центру заряда.

При импульсных нагрузках горным породам свойственно квазиупругое поведение. Количество энергии, соответственно отраженной от стенок зарядной камеры и прошедшей в среду, может быть определено с удовлетворительной для практических целей степенью погрешности как

$$\bar{W} / W = 4\rho_c \rho_{BB} D \cdot (\rho_c \rho_{BB} D)^{-2},$$

где \bar{W} - упругая энергия среды; ρ_c - акустическая жесткость разрушаемой среды; $\rho_{BB} D$ - акустический импеданс ВВ.

Энергия ударной волны (в дальнейшем трансформирующаяся в волну напряжений) определяется энергией взрывчатого разложения ВВ и условиями ее перехода в упругую энергию пород различной характеристики, что определяет возможное напряженное состояние среды и его длительность, благодаря которым волной производится работа [8,9].

Энергия волны напряжения может быть определена как функция работы, совершаемой при смещении элементарной площадки на определенное расстояние в безграничной среде [10,11].

Рассмотрим с этих позиций энергию ударной волны в зависимости от величины начального давления у стенки скважинного заряда.

Начальное уравнение энергии, проходящей через единицу площади в нормальном к фронту волны напряжений за время t , может быть выражено как

$$W_0 = \int_0^t \sigma(r,t) U(r,t) dt. \quad (7)$$

Изменение скорости массового смещения и напряжения во времени, с учетом максимального значения, подчиняются экспоненциальному закону:

$$U(t) = U_{\max} m e^{-\alpha \Delta t}$$

$$\sigma(t) = \sigma_{\max} m e^{-\alpha \Delta t}$$

при $m = \sin \beta t / \sin \beta t_n$,

где $e^{-\alpha \Delta t}$ - экспонента, характеризующая крутизну нарастания и спада скорости и напряжения; α, β - коэффициенты, характеризующие крутизну нарастания и спада скорости, напряжения

$$\Delta t = t - t_n,$$

где t_n - время роста напряжения от 0 до max.

При квазиупругом поведении горных пород основные закономерности изменения параметров волн напряжений могут быть установлены в соответствии с законами теории упругости. В этом случае максимальное напряжение на фронте волны и скорость массового смещения породы могут быть связаны между собой зависимостью

$$\sigma_{\max} = U \rho_c / q.$$

Тогда уравнение (7) примет вид

$$W_o = \frac{q}{\rho_c} \int_0^t \sigma^2(r, t) dt.$$

На основании исследований, выполненных в работе [3]

$$\sigma_{\max}(r) = P_o \frac{R_o^2}{r^2} = P_o \overline{r^2},$$

где P_o - начальное давление на границе упругой зоны; R_o - начальный радиус скважины; r - расстояние от оси заряда до исследуемой точки.

Тогда на основании изложенного

$$W_o = q \overline{r^4} \rho_o^2 \rho_c^{-1} \int_0^t m e^{2\alpha \Delta t} dt.$$

Выводы и направления дальнейших исследований. Очевидно, что одним из направлений повышения эффективности взрывных работ в условиях открытой разработки полезных ископаемых является исследование и разработка методов управления энергией взрыва, основанной на взаимодействии скважинных зарядов ВВ, взрывааемых в одной ступени замедления.

Согласно полученных результатов взрывание в режиме малых замедлений эффективно и рационально с точки зрения энергетической картины разрушения горного массива.

Список литературы

1. Ефремов Э.И. Взрывание с внутрискважинным замедлением. - Киев: Наукова думка, 1971. – 172 с.
2. Друкованный М.Ф., Куц В.С. Ильин В.Н. Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 223 с.
3. Бротанек И., Вода И. Контурное взрывание в горном деле и строительстве. – М.: Недра, 1983. – 143 с.
4. Cherepanov G.P. On the theory of fluidization, part I. General model. Ind. Enqng chemistry fundamentals 11. - № 1. – 1372.
5. Миндели Э.О., Кусов Н.Ф. Корнеев А.А., Марцинкевич Г.И. Комплексное исследование действия взрыва в горных породах. - М.: Недра, 1978. - 253 с.
6. Воробьев В.Д., Перегудов В.В. Взрывные горные работы в скальных породах. – Киев: Наукова думка, 1984. – 238 с.
7. В.Н. Мосинец, А.В.Абрамов. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. - М.: Недра, 1982. - 248 с.
8. Механический эффект подземного взрыва / Родионов.В.Н., Адушкин В.В. и др. / Под. ред. М.А.Садовского. - М.: Недра, 1971. - 220 с.
9. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. / Под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975. - 407 с.
10. Родионов В.Н. К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. - М.: Изд-во ИГД АН СССР, 1962. - 29 с.
11. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. - М.: Госгортехиздат, 1962. - 200 с.

Рукопись поступила в редакцию 18.0315