

## **ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УДЛИНЕННЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ**

Рассмотрены вопросы, связанные с построением математической модели оптимизации параметров удлинения кумулятивных зарядов на основе критериев подобия. С помощью численного метода случайного поиска получены необходимые рациональные параметры для проектирования рациональных конструкций удлиненных кумулятивных зарядов.

This paper deals with the problems that are connected with mathematical modeling to optimize the parameters of stretching-out cumulative charge based on similarity test. There have been obtained the required rational parametric variable to design rational constructions of extended cumulative charges with the help of the numerical method of random search.

Процесс создания протяженных трещин в породном горном массиве предусматривает использование определенных типов и конструкций зарядов взрывчатых веществ (ВВ). С учетом значительных результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных как российскими, так и зарубежными авторами, в которых доказана и обоснована перспективность использования при контурном взрывании зарядов направленного действия, в данной работе отдается предпочтение варианту с использованием удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ). Использование такого типа заряда приводит к пространственному перераспределению энергии взрыва, позволяющему уменьшать плотность потока энергии в зоне охраняемого породного массива или увеличивать ее по линии разрушения.

При этом действие УКЗ при контурном взрывании и гладком отколе определяется рядом факторов: конструкцией заряда (соотношением геометрических размеров, в частности, анализ экспериментальных данных по определению эффективности разрушения породного массива УКЗ с предельной кумулятивной выемкой различной формы показал, что все варианты возмож-

ных сечений УКЗ сводятся к двум основным типам: треугольного и сложного профиля, описываемого кривыми второго порядка [3], а также типом ВВ), его массой и скоростью детонации, способом установки заряда относительно стенки шпура, физико-механическими свойствами горной породы и т.д. [1, 3].

Эффективность разрушения горных пород УКЗ в основном зависит от первоначальной глубины проработки канала кумулятивным ножом [3]. Известно, что определяющие параметры кумулятивного ножа представляют собой функциональную зависимость от исходных геометрических параметров заряда, свойств материалов оболочки и облицовки, свойств ВВ, заключенных в УКЗ.

В свою очередь, процесс формирования кумулятивного ножа и его взаимодействие с горной породой разбиваются на ряд отдельных процессов, происходящих последовательно и определяющих эффективность разрушающего действия УКЗ [1, 3].

Таким образом, для получения возможности прогнозирования глубины внедрения кумулятивного ножа в массив горных пород необходимо получить общие закономерности

сти между основными свойствами УКЗ и связать их обобщенными прочностными параметрами разрушения пород.

Однако, когда известно конкретное влияние выходных параметров различных стадий действия УКЗ на его эффективность, то процесс функционирования УКЗ будет рассматриваться в некотором смысле как «черный» ящик с известными параметрами входа и выхода.

В качестве входных параметров задаются параметры, характеризующие материал УКЗ, его конструктивные особенности, свойства применяемого ВВ, геометрию расположения УКЗ и разрушаемого горного массива, прочностные свойства горных пород.

Таким образом, необходимо задать параметры, характеризующие следующие данные:

1) материал оболочки УКЗ ( $\rho_1$  – плотность материала;  $c_1$  – скорость звука;  $\sigma_1$  – динамическая прочность;  $\varepsilon_1$  – предельное относительное удлинение);

2) конструкцию ВВ ( $d$  – диаметр ВВ;  $H$  – высота УКЗ;  $h$  – высота кумулятивной выемки;  $d_k$  – диаметр кумулятивной выемки;  $\delta_1$  – толщина облицовки кумулятивной выемки;  $\delta_2$  – толщина оболочки);

3) взрывные вещества ( $\rho_{ВВ}$  – плотность;  $D$  – скорость детонации;  $m_{ВВ}$  – масса ВВ, приходящаяся на единицу длины УКЗ, т.е. линейная плотность ВВ);

4) разрушаемую горную породу ( $\rho_2$  – плотность;  $c_2$  – скорость звука;  $\sigma_2$  – динамическая прочность);

5) взаимное расположение УКЗ и разрушаемого горного массива, т.е. в некотором смысле оптимальное расстояние между ними ( $F$  – величина фокусного расстояния УКЗ).

Тогда функциональную зависимость глубины кумулятивного ножа  $L$ , характеризующую эффективность параметров УКЗ, в общем случае представим в виде

$$L = f(\rho_1, c_1, \sigma_1, \varepsilon_1, d, H, h, d_k, \delta_1, \delta_2, D, m_{ВВ}, \rho_2, c_2, \sigma_2, F). \quad (1)$$

Используя  $\pi$ -теорему подобия преобразуем аргументы функции (1) в безразмерные величины, являющиеся критериями подобия [3]. В результате функциональная зависимость (1) примет вид

$$L = df_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_{ВВ}}, \frac{\sigma_1}{\rho_{ВВ} D^2}, \frac{H}{d}, \frac{h}{d}, \frac{d_k}{d}, \frac{\delta_1}{d}, \frac{\delta_2}{d}, \frac{m_{ВВ}}{\rho_1 d^2}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{\sigma_2}{\rho_{ВВ} D^2}, \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}, \frac{F}{d} \right). \quad (2)$$

Функциональная зависимость (2) упрощается, если учесть тот факт, что, как правило, в УКЗ используются один и тот же материал оболочки и состав ВВ, а именно:

$$L = df_2 \left( \frac{H}{d}, \frac{h}{d}, \frac{d_k}{d}, \frac{\delta_1}{d}, \frac{\delta_2}{d}, \frac{m_{ВВ}}{\rho_1 d^2}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{\sigma_2}{\rho_{ВВ} D^2}, \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}, \frac{F}{d} \right). \quad (3)$$

Когда УКЗ применяется для разрушения одного и того же типа горной породы, функциональная зависимость

$$L = df_2 \left( \frac{H}{d}, \frac{h}{d}, \frac{d_k}{d}, \frac{\delta_1}{d}, \frac{\delta_2}{d}, \frac{m_{ВВ}}{\rho_1 d^2}, \frac{F}{d} \right). \quad (4)$$

Выражение (4) характеризует функциональную зависимость эффективности УКЗ от его конструктивных параметров и способа установки при постоянстве типа разрушаемой горной породы, материала оболочки УКЗ и свойств ВВ.

Процесс варьирования критериями подобия [3], например на основе организованного перебора возможных вариантов по принятому критерию оптимальности, сводится к задаче оптимизации:

$$\begin{cases} E = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max(\min), \\ g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq A_j, \\ a_i \leq x_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m, \end{cases} \quad (5)$$

где  $E$  – целевая функция;  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – переменные (параметры системы);  $a_i, b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) – граничные условия для

переменных;  $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $j=1, 2, \dots, m$  – функции ограничений.

В качестве целевой функции для УКЗ, как было показано выше, выбран параметр  $L$ , характеризующий глубину внедрения кумулятивного ножа в горную породу. Целевая функция принимает вид

$$E = \frac{L}{d} = f_2 \left( \frac{H}{d}, \frac{h}{d}, \frac{d_k}{d}, \frac{\delta_1}{d}, \frac{\delta_2}{d}, \frac{m_{\text{ВВ}}}{\rho_1 d^2}, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{\sigma_2}{\rho_{\text{ВВ}} D^2}, \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}, \frac{F}{d} \right) \rightarrow \max. \quad (6)$$

В роли функций ограничений  $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $j=1, 2, \dots, m$  в (5) принимаются функциональные зависимости, определяющие как активную массу заряда ВВ, так и величину воздействия УКЗ в законтурную часть массива горных пород [1, 3].

При построении математической модели максимальных значений глубины проникания кумулятивного ножа использовалась статистика штатных испытаний различных типов УКЗ по разрушению моделей горных пород [1, 3]. На основе этих данных целевая функция  $E$  задачи оптимизации (5) с учетом предварительной нормировки параметров по формулам

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\min} x_{\max}} + 1, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

примет вид [1]

$$\begin{aligned} \frac{L}{d} = & 2,565 \left( \frac{\sigma_2}{\rho_{\text{ВВ}} D^2} \right)^{-0,1} \left( \frac{H}{d} \right)^{0,01} \times \\ & \times \left( \frac{h}{d} \right)^{0,2} \left( \frac{d_k}{d} \right)^{-0,57} \left( \frac{\delta_1}{d} \right)^{-0,73} \left( \frac{\delta_2}{d} \right)^{0,1} \\ & \times \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{-11,86} \left( \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right)^{10,76} \rightarrow \max. \quad (8) \end{aligned}$$

Граничные условия на параметры задавались в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned} & 0,05 \leq \frac{H}{d} \leq 0,35; \\ & 0,05 \leq \frac{h}{d} \leq 0,6; \quad 0,1 \leq \frac{d_k}{d} \leq 0,8; \\ & 0,03 \leq \frac{\delta_2}{d} \leq 0,5; \\ & 0,001 \leq \frac{\delta_1}{d} \leq 0,3; \quad 0,3 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 0,876; \\ & 0,01 \leq \frac{\sigma_2}{\rho_{\text{ВВ}} D^2} \leq 0,61; \\ & 0,38 \leq \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \leq 1,09. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Поставленная задача оптимизации (8), (9) (функции ограничений в силу громоздкости [1] не приводятся) относится к задаче нелинейного программирования, для решения которой применяется метод случайного поиска [2].

В результате численного решения поставленной задачи оптимизации (8), (9) была получена оптимальная конструкция УКЗ со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} \frac{H}{d} = 0,94; \quad \frac{h}{d} = 0,35; \quad \frac{d_k}{d} = 0,37; \\ \frac{\delta_1}{d} = 0,056; \quad \frac{\delta_2}{d} = 0,17. \end{aligned} \quad (10)$$

Отметим, что полученная конструкция заряда имеет меньшую массу ВВ, чем применяемые в настоящее время УКЗ того же диаметра (на 40-50 %), что приводит к снижению импульса воздействия в законтурную часть массива горных пород примерно в 2 раза. На блоках гранита и мрамора для проверки эффективности разрушения горных пород разработанными конструкциями УКЗ были проведены маломасштабные лабораторные эксперименты. В этих испытаниях УКЗ замерялись глубины внедрения кумулятивного ножа, т.е. величины длин первичных трещин.

Результаты проведенных экспериментов показали, что конструкции УКЗ с гео-

метрическими параметрами (10) обеспечили относительную глубину внедрения в граните  $L/d=1,16$ , в мраморе  $L/d=1,09$  (для сравнения у применяемых штатных зарядов эта величина составила в граните – 0,96, в мраморе – 0,91).

Таким образом, предложенная модель конструкции УКЗ с заданными параметрами разрушения, учитывающими свойства горных пород, может быть использована для проектирования рациональных конструкций удлиненных кумулятивных зарядов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалевский Н.Н. Параметры воздействия удлиненных кумулятивных зарядов на горные породы / Н.Н.Ковалевский, М.А.Нефедов, А.Н.Мурахин // Записки ЛГИ. Л., 1984. Т.99. С.72-75.
2. Ортега Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Дж.Ортега, В.Рейнболдт. М.: Мир, 1975. 558 с.
3. Система автоматизированного проектирования удлиненных кумулятивных зарядов для разрушения горных пород / Н.Н.Ковалевский, А.Н.Мурахин, М.А.Нефедов, В.Н.Пылинин // Совершенствование технологических процессов при подземной разработке мощных рудных месторождений / КФ АН СССР. Апатиты, 1986. С.86-89.
4. Седов Л.Н. Методы подобия и размерность в механике. М.: Наука, 1981. 448 с.