

УДК 622.23562

Мец Ю.С. д-р техн. наук, профессор,
Антонов А.Ю. д-р техн. наук, профессор
(ГВУЗ «Криворожский национальный университет»)

Левицкий А.П., инженер
(ООО «МИ-ЦЕНТР»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА НА КАРЬЕРАХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Мец Ю.С. д-р техн. наук, професор,
Антонов А.Ю. д-р техн. наук, професор
(ДВНЗ «Криворізький національний університет»)

Левіцький А.П., інженер
(ООО «МИ-ЦЕНТР»)

РОЗРОБКА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГІЄЮ ВИБУХУ НА КАР'ЄРАХ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ

Mets Yu.S., D.Sc.(Tech.), professor,
Antonov A.Yu., D.Sc.(Tech.), professor
(SHEI "Kryvyi Rih National University")

Levitskiy A.P., M.S (Tech)
(LLC "ME-Centre")

DEVELOPMENT OF METHODS OF THE EXPLOSIVE ENERGY MANAGEMENT AT OPEN-PITS BASED ON LINEAR ELASTICITY

Аннотация: Работа посвящена разработке эффективных методов по управлению энергией взрыва на карьерах. Базисом в данной исследовании есть основные положения динамической теории упругости. Проведен анализ условий достижения равномерного дробления пород. Была подтверждена возможность достижения равномерного дробления путем применения в центральной части заряда взрывчатых веществ с пониженной скоростью детонации или путем изменения диаметра заряда. Проведенное сравнение эффективности данных способов позволило определить преимущество использования метода с изменением диаметра заряда, по критерию эффективности управления. Разработан математический метод определения значений детонационного давления для оптимального протекания процесса взрыва.

Ключевые слова: карьер, энергия взрыва, упругость.

Введение

Известно, что основным технологическим процессом добычи крепких железистых кварцитов является отделение части пород от массива с помощью энергии взрыва. Поэтому рациональные методы ведения взрывных работ на карьерах, обеспечивающих интенсивное дробление горных пород, позволяют обеспечить высокую эффективность выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, и, в конечном счете, повысить производительность работ.

Вопросами теории практики взрывного разрушения горных пород занимались многие ученые, что внесло значительный вклад в теорию и практику взрывных работ при разработке месторождений полезных ископаемых [1-7], а также О.Е. Власов (1958).

В частности, раскрытие физической сущности разрушения горных пород взрывом в значительной степени отражено в ряде их работ [8-10], а также Л. Ричард (1962).

Однако, в связи с исключительной сложностью и многообразием процессов, происходящих при взрыве зарядов ВВ и разрушений горных пород, существующие методы управления энергией взрыва еще не обеспечивают достаточно эффективное их использование на полезные формы работы.

Поэтому целью данной работы является разработка, исследование и оптимизация методов управления энергией взрыва.

Основной материал и результаты исследований.

На современном этапе наших представлений о механизме действия взрыва в основу описания может быть положена теория волн напряжений (динамическая теория упругости), где результатом воздействия образованной при взрыве заряда взрывчатого вещества ударной волны в непосредственной близости от заряда образуется волна сжатия, которая вызывает возникновение трещин в направлении свободной поверхности, а затем от последней к заряду. Процесс разрушения при этом осуществляется путем проникновения газообразных продуктов детонации в трещины, которые окончательно разрушают массив [8, 9], а также Л. Ричард (1962).

Задача управления энергией взрыва вызывает необходимость в математическом описании связей, существующих между параметрами заряда и результатами его действия.

Любое управление требует ввода в рассмотрение некоторой целевой или, точнее, критериальной функции. Управление в математическом плане сводится к созданию условий, обеспечивающих определенное поведение этой критериальной функции.

Нами в качестве критериальных выбраны функции, которые связывают напряженное состояние горного массива с характером его разрушения: это энергетическая функция, введенная в свое время известным механиком Мизесом, максимальное касательное напряжение и, как наиболее простой критерий, линейная деформация. Энергетическая функция описывает ту долю удельной упругой энергии, которая связана с отклонением компонент тензора напряжений от гидродинамических. Из теории прочности известно, что по достижении функцией Мизеса некоторого предельного значения начинается разрушение материала. То же относится к максимальным касательным напряжениям. [10, 11].

В смысле эффективности прогноза характера разрушения обе функции – Мизеса и максимальных касательных напряжений – почти идентичны, ибо пер-

вая почти пропорциональна квадрату второй. В то же время функция Мизеса более доступна для управления с помощью ЭВМ, чем функция максимальных касательных напряжений. Это связано с различной сложностью их зависимости от параметров состояния скважины при взрыве (точнее, внутрискважинного давления). Функция Мизеса определяется формулой

$$F = \frac{1}{3} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{xz}^2 + 6\tau_{yz}^2 \right\} \quad (1)$$

Максимальные касательные и главные напряжения находятся при решении уравнения

$$S^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)S^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xz}^2)S - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_y\tau_{xz}^2) = 0 \quad (2)$$

В этом случае задача управления – найти такие значения внутрискважинного давления, при которых максимизируется значение выражения

$$\left| \frac{1}{3} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xz}^2 \right\} - F_{кр} \right| \quad (3)$$

Нас интересует решение, доступное для численной реализации, к тому же при параметрах взрыва, близких к действительным. В частности, мы считаем необходимым отказаться от обычно применяемой предпосылки о бесконечности скорости детонации. При этом в основу расчета поля напряжений положена идея аппроксимации детонационных давлений ступенчатой функцией и линейного заряда некоторым числом элементарных сферических зарядов. Скорость детонации предполагается конечной и рассматривается два случая:

а) давление описывается функцией вида

$$P = P(t - \tau); \quad (4)$$

$$\text{где } \tau = \begin{cases} \frac{\xi - l_0}{D} - \text{при иницировании сверху;} \\ \frac{l - \xi}{D} - \text{при иницировании снизу;} \end{cases}$$

ξ - ордината произвольной точки; l - глубина скважины; l_0 - глубина забойки; D - скорость детонации; б) давление произвольным образом зависит от времени и глубины скважины и имеет вид: $P = P(t, \xi)$.

В результате аппроксимации (ступенчатой функцией) в первом случае получаем выражение:

$$P(t') = P_0\sigma(t') + (P_1 - P_0)\sigma(t' - t_1') + \dots + (P_{n-1} - P_{n-2})\sigma(t' - t_{n-1}') - P_n\sigma(t' - t_n') \quad (5)$$

во втором:

$$P(t, \xi) = P_{ок}\sigma(t - \tau_k) + (P - P_{ок})\sigma(t - \tau_k - \lambda) + (P_{2k} - P_{1k})\sigma(t - \tau_k - 2\lambda) - (P_{n-1,k} - P_{n-2,k})\sigma[(t - \tau_k) - (n-1)\lambda] - P_n\sigma(t - \tau_k - n\lambda), \quad (6)$$

где λ - шаг аппроксимирующей функции.

Для сферического заряда компоненты тензора напряжений (согласно исследованиям Е.И. Шемякина и Н. Сельберга) могут быть представлены формулами (Ф.А. Баум, 1962)

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\lambda + 2\mu}{r} \varphi''(t - \frac{r-r_0}{C}) + \frac{4\mu C}{r^2} \varphi''(t - \frac{r-r_0}{C}) + \frac{4\mu C^2}{r} \varphi(t - \frac{r-r_0}{C}); \\ \sigma_\theta &= \frac{\lambda}{r} \varphi''(t - \frac{r-r_0}{C}) + \frac{2\mu C}{r^2} \varphi''(t - \frac{r-r_0}{C}) + \frac{2\mu C^2}{r^3} \varphi(t - \frac{r-r_0}{C}); \\ U_r &= -\frac{C}{r} \varphi''(t - \frac{r-r_0}{C}) - \frac{C^2}{r^2} \varphi(t - \frac{r-r_0}{C}), \end{aligned} \quad (7)$$

где потенциал φ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$-P(t) = \frac{\lambda + 2\mu}{r_0} \varphi(t) + \frac{4\mu C}{r_0^2} \varphi'(t) + \frac{4\mu C^2}{r_0^3} \varphi(t); \quad (8)$$

где C - скорость продольных волн; r_0 - радиус элементарного сферического источника.

Аппроксимация давления $P(t)$ ступенчатой функцией позволяет при решении уравнения (8) использовать операционный метод.

Учитывая, что давление аппроксимируется формулой (5), для потенциала находим решение:

$$\varphi(t') = -\frac{1}{a^2} \{P_0\sigma(t') + (P_1 - P_0)\sigma(t' - t_1') + \dots - P_n\sigma(t' - t_n')\} + A(t)l^{-\sigma'} \cos(\omega t' + \alpha) \quad (9)$$

Слагаемое $A(t)l^{-\sigma'} \cos(\omega t' + \alpha)$ соответствует собственным колебаниям сферы и очень быстро затухает. Оценка декремента затухания σ и частоты ω для кристаллических пород показала, что указанным слагаемым можно пренебречь. С учетом этого для компонент тензора напряжений от элементарного сферического заряда после перехода от сферической к прямоугольной системе координат получим формулы:

$$\sigma_x = \frac{r_0^3}{r^5} \frac{\bar{z}^{-2} - 2\bar{x}^{-2}}{2} \left\{ P\sigma\left(t - \tau - \frac{r-r_0}{C}\right) + (P_1 - P_0)\sigma\left(t - (\tau + \lambda) - \frac{r-r_0}{C}\right) + \dots - \right. \\ \left. - P_n\sigma\left(t - (\tau + n\lambda) - \frac{r-r_0}{C}\right) \right\}; \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{r_0^3}{r^5} \frac{\bar{x}^{-2} - 2\bar{z}^{-2}}{2} \left\{ P_0\sigma\left(t - \tau - \frac{r-r_0}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau + n\lambda) - \frac{r-r_0}{C}\right) \right\};$$

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \frac{r_0^3}{r^3} \left\{ P_0\sigma\left(t - \tau - \frac{r-r_0}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau + n\lambda) - \frac{r-r_0}{C}\right) \right\};$$

$$\tau_{xz} = -\frac{3}{2} \frac{r_0^3}{r^5} \bar{x}\bar{z} \left\{ P_0\sigma\left(t - \tau - \frac{r-r_0}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau + n\lambda) - \frac{r-r_0}{C}\right) \right\};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{xy} = 0,$$

где \bar{x}, \bar{z} - проекции на соответствующие оси радиуса-вектора r .

После сложения влияний элементарных сферических зарядов по всем скважинам получим выражения для компонент тензора напряжений системы линейных зарядов:

$$\sigma_x = \sum_{m=1, K=1}^{M_1 K_m} \frac{r_0^3}{r_{km}^5} \frac{\bar{z}_{km}^{-2} - 2\bar{x}_m^{-2}}{2} \left\{ P\sigma\left(t_{km} - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau_{km} + n\lambda) - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) \right\};$$

$$\sigma_z = \sum_{m=1, K=1}^{M_1 K_m} \frac{r_{0m}^3}{r_{km}^5} \frac{\bar{x}_m^{-2} - 2\bar{z}_{km}^{-2}}{2} \left\{ P_0\sigma\left(t_{km} - \tau_{km} - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau_{km} + n\lambda) - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) \right\};$$

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \sum_{m=1, K=1}^{M_1 K_m} \frac{r_{0m}^3}{r_{km}^5} \left\{ P\sigma\left(t - \tau_{km} - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau_{km} + n\lambda) - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) \right\}; \quad (11)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{3}{2} \sum_{m=1, K=1}^{M_1 K_m} \frac{r_{0m}^3}{r_{km}^5} \left\{ P_0\sigma\left(t - \tau_{km} - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) + \dots - P_n\sigma\left(t - (\tau_{km} + n\lambda) - \frac{r_{km} - r_{0m}}{C}\right) \right\};$$

где m - количество линейных зарядов; K_m - количество элементарных зарядов, на которые разбивается m -ный линейный заряд.

Наличие свободных поверхностей может быть учтено путем построения фиктивных зарядов, симметрично расположенных относительно свободных поверхностей к реальным источникам. Наряду с управлением по критерию Мизеса или максимальных касательных напряжений, как уже отмечалось, можно использовать и другие критерии. При исследовании схем со встречным и параллельным инициированием нами использовалась структура поля деформаций.

В связи с тем, что поле деформаций имеет ту же структуру, что и поле скоростей по О.Е. Власову, для оценки действия взрыва в этом случае можно использовать введенные им критерии.

При энергетическом подходе, на основании теории разрушения, развитой в работах Г.И. Покровского, О.Е. Власова, Д. Пирсона и др., в качестве эффективного показателя действия взрыва рассматривается насыщение единицы объема разрушаемой породы энергией или распределение импульса мгновенных

скоростей. В этом случае предполагается, что среда ведет себя как несжимаемая жидкость.

Энергетический подход используется нами при изучении вопроса об управлении взрывом при взрывании высоких наклонных уступов. Основная проблема – это выяснение условий, при которых будет обеспечена равномерность дробления по всей высоте. При обычных конструкциях заряда в верхней и нижней частях уступа наблюдается выход негабарита, в центральной части – переизмельчение. В качестве критериальной функции нами использовано распределение удельного импульса по высоте вдоль откоса уступа. При этом о форме функции детонационного давления были приняты допущения, изображаемые формулой

$$P(r, t) = \varphi(\eta) f(t) \tau(t = t'), \quad (12)$$

где τ - функция Хевисайда; t - время, отсчитываемое с момента инициирования; t' - время пробега детонационной волны от точки инициирования к исследуемой точке.

Из формулы (12) видно, что в скважине до момента $t = t'$ давление предполагается равным нулю, потом изменяющимся по закону $\varphi(\eta) f(t)$.

Наличие множителя $\varphi(\eta)$ предусматривает возможность изменения амплитуды детонационного давления от точки к точке по оси скважины. Задача решена путем аппроксимации линейного заряда элементарными сферическими зарядами.

Допускается переменная энергоемкость заряда (фактически, переменная скорость детонации), переменный диаметр скважины, диссипация энергии в массиве. Получена формула для нормальной составляющей импульса при самых широких допущениях о конструкции заряда.

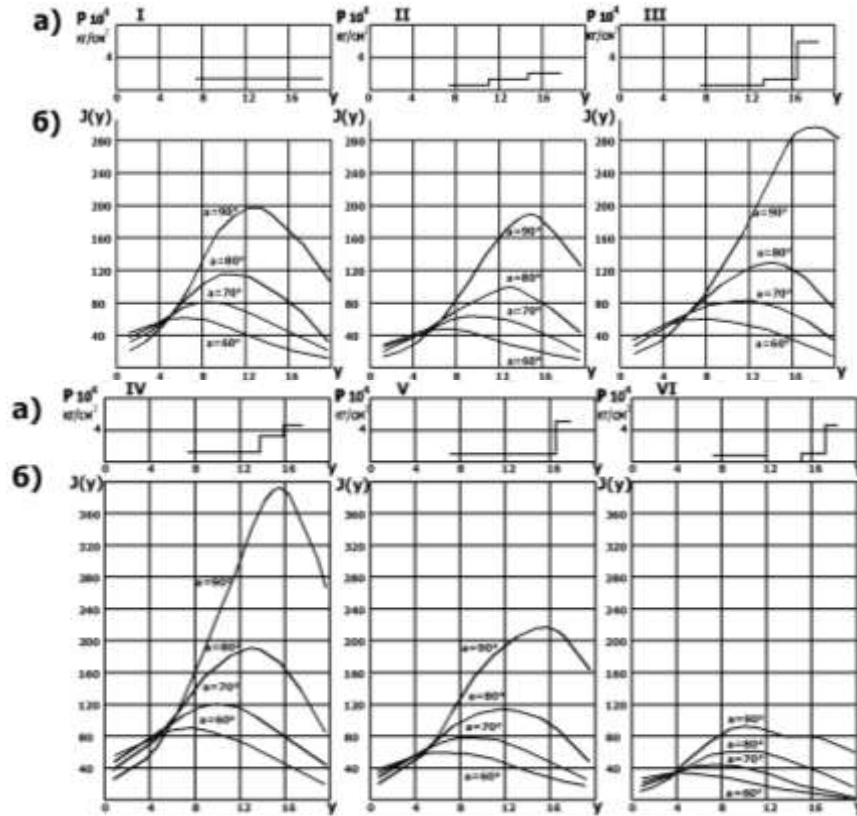
$$I_n(y) + \bar{I}_n(y) = K \int_{\eta_0}^l P(\eta) D^2(\eta) \delta^3(\eta) \exp \left[-\beta \sqrt{(W + y \operatorname{ctg} \alpha)^2 + (y - \eta)^2} \right] \times \\ \times \frac{\eta \cos \alpha + W \sin \alpha}{(\sqrt{(W + y \operatorname{ctg} \alpha)^2 + (y - \eta)^2})^3} d\eta, \quad (13)$$

где K - коэффициент пропорциональности; η_0 - глубина забойки; β - коэффициент диссипации; W - ЛНС; α - угол наклона уступа; y, η - фиксированная и текущая ординаты.

В программе Excel выполнено исследование частных случаев общего решения: когда скорость детонации и диаметр скважины постоянны и функция детонационного давления $f(t)$ аппроксимируется прямоугольным импульсом большой ширины - больше, чем длительность взрыва; при тех же предположениях, но переменной скорости детонации вдоль скважины. На рис.1 представлены вычисленные при таких предположениях графики импульса, при произ-

вольной скорости детонации, переменном диаметре и допущении, что ширина импульса детонационного давления меньше длительности взрыва. В этом случае решение получено в виде

$$I_n(y) + \bar{I}_n(y) = K \int_{\eta_0}^l P(\eta) D^2(\eta) \delta^3(\eta) \frac{\eta \cos \alpha + W \sin \alpha}{(\sqrt{(W + y \operatorname{ctg} \alpha)^2 + (y - \eta)^2})^3} d\eta, \quad (14)$$



а) график функции $\varphi(\eta) = \frac{\rho D^2}{8}$; б) графики распределения удельного импульса

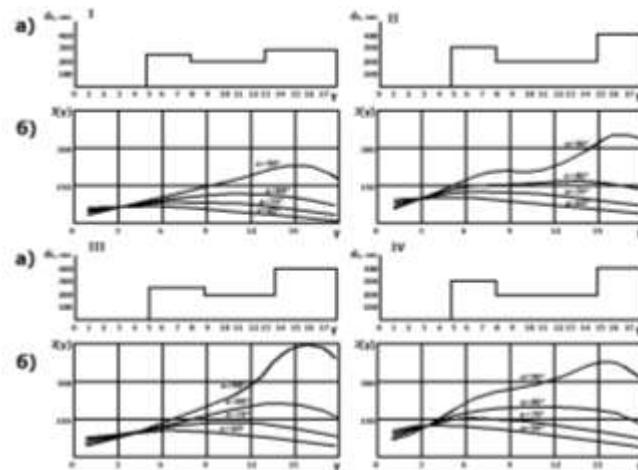
Рисунок 1 - Графики функции $\varphi(\eta) = \frac{\rho D^2}{8}$ и удельного импульса при ступенчатой функции внутрискважинного давления и переменной скорости детонации

На рис. 2 показаны графики изменения импульса при переменном диаметре. Сопоставляя рис. 1 и 2, видим, что изменение диаметра является более сильным средством управления взрывом, чем изменение скорости детонации [12,13].

Для решения вопроса о том, можно ли создать в скважине условия, обеспечивающие строгое постоянство импульса, была решена обратная задача: равенство (14) рассматривалось как интегральное уравнение, из которого определялось произведение

$$\varphi(\eta) = \rho(\eta) D^2(\eta) \delta^3(\eta),$$

где ρ - плотность ВВ; D - скорость детонации; δ - диаметр скважины.



а) графики изменения диаметра скважины по ее глубине; б) графики распределения удельного импульса: I, II, III, IV - варианты
 Рисунок 2 - Графики распределения удельного импульса при взрыве скважинного заряда переменного диаметра с одним типом ВВ

В результате было установлено, что строгое постоянство импульса при реальных условиях не может быть выдержано. Можно ставить вопрос лишь о создании условий в скважине, обеспечивающих достаточную пологость графиков[14,15].

ВЫВОДЫ

Условия для равномерного дробления можно обеспечить путем применения в центральной части заряда ВВ с пониженной скоростью детонации или путем изменения диаметра заряда, причем второй способ является более эффективным средством управления, чем первый.

Реализация разработанного математического метода обеспечила возможность определения соответствующих оптимальному протеканию процесса взрыва значений детонационного давления – во времени и пространстве (по длине одиночного и по всей совокупности системы зарядов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузов, Б. Н. Совершенствование буровзрывных работ на основе применения новых видов взрывчатых веществ и зарядной техники / Б.Н. Кутузов, А.В. Старшинов, Ж. Жамьян // Горный журнал. – 2010. - №7. - С.61-64.
2. Фокин, В.А. К вопросу обоснования интервалов замедления при производстве массовых взрывов в карьерах / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Семкин // Горный журнал. -2012. - №2. - С.44-46.
3. Добрынин, В.Н. Система интеллектуального управления технологией дробления / В.Н. Добрынин, В.А. Эндерев, А.А. Миловидова // Обогащение руд. – 2014. - №6. - С.38-40.
4. Фокин, В.А. К вопросу оценки качества дробления взорванной горной массы при производстве буровзрывных работ в карьерных условиях / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Семкин // Горный журнал. – 2013. - №12. - С.54-56.
5. Гончаров, С.А. О нецелесообразности увеличения удельного расхода ВВ при буровзрывном дроблении железистых кварцитов в карьере КМА / С.А. Гончаров // Горный журнал. – 2013. - №4. – С.80-85.

6. Макаров, А.Б. К определению природного напряженного состояния массива Малявского месторождения / А.Б. Макаров, С.В. Огороднов, К.К. Калмурзаев // Горный журнал. – 2013. - №5. - С. 57-59.
7. Баум, Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко.- М.: Наука, 1975.- 704 с.
8. Ханукаев, А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом / А.Н. Ханукаев.- М.: Недра, 1974.- 222 с.
9. Еременко, А.А. Опыт проведения массового взрыва с применением параллельно-сближенных зарядов ВВ увеличенного диаметра / А.А. Еременко, Е.В. Щетинин, С.К. Шултаев // Горный журнал. – 2013. - №3. – С.73-75.
10. Покровский, Г.И. Взрыв / Г.И. Покровский. -М.: Недра, 1980.- 192 с.
11. Фокин, В.А. Методологические аспекты качества эмульсионных взрывчатых веществ по результатам замеров скорости детонации / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов // Горный журнал. – 2013. - №4.- С.77-79.
12. Щукин, Ю.Г. Специальные заряды в технологии заоткоски уступов в карьере ОАО «Карельский окатыш» / Ю.Г. Щукин, И.А. Коломинов, Е.О. Астахов // Горный журнал. – 2013. - №10. - С. 86-88.
13. Дойников, Ю. А. Ресурсосберегающие технологии бурения взрывных скважин на алмазорудных карьерах Якутии / Ю.А. Дойников, А.Е. Беляев // Горный журнал. – 2012. - №4. - С. 42-45.
14. Кутузов, Б.Н. Испытание различных типов боевиков для повышения действия скважинных зарядов / Б.Н. Кутузов, И.Н. Тимофеев, А.В. Токаренко // Горный журнал. – 2012. - №9. - С. 88-90.
15. Жариков, С.Н. Методология оценки энергоемкости технологических процессов в цикле "бу-ровзрывное дробление - механическое дробление - измельчение" при открытой разработке рудных месторождений / С.Н. Жариков, В.Г. Шеменев // Горный журнал. - 2013.- №10. - С. 83-86.

REFERENCES

1. Kutuzov, B.N., Starshinov, A.V. and Zhamyran, Zh. (2010), "Improving of rock blasting operations through the application of new types of explosives and charging equipment", *Gorny zhurnal*, no.7, pp. 61-64.
2. Fokin, V.A., Togunov, M.B. and Semkin, S.V. (2012), "On the issue of justification of the delaying intervals in the production of the massive explosions in open-pits", *Gorny zhurnal*, no. 2, pp. 44-46.
3. Dobrynin, V.N., Enderev, V.A. and Milovidova, A.A. (2014), "System of intelligent management of the technology of crushing", *Obogashcheniye rud*, no. 6, pp. 38-40.
4. Fokin, V.A., Togunov, M.B. and Semkin, S.V. (2013), "On the issue of assessing the quality of crushing of the blasted rock mass in the production of rock blasting operations in the open-pit conditions", *Gorny zhurnal*, no.12, pp.54-56.
5. Goncharov, S.A. (2013), "About inexpediency of increasing the specific consumption of explosives in the rock blasting crushing of the ferruginous quartzites in the KMA's open-pit", *Gorny zhurnal*, no.4, pp. 80-85.
6. Makarov, A.B., Ogorodnov, S.V. and Kalmurzaev, K.K. (2013), "To the definition of the natural stress state of the massive of Malyavske field", *Gorny zhurnal*, no.5, pp. 57-59.
7. Baum, F.A. and Orlenko, L.P. (1975), *Fizika vzryva* [The physics of explosion], Nauka, Moscow, SU.
8. Khanukaev, A.N. (1974), *Fizicheskiye protsessy pri otboypke gornnykh porod vzryvom* [The physical processes during the breaking of rocks by explosion], Nedra, Moscow, SU.
9. Eremenko, A.A., Shchetinin, E.V. and Shultaev, S.K. (2013), "Experience of carrying out the mass explosion with closely spaced parallel explosive charges of increased diameter", *Gorny zhurnal*, no.3., pp.73-75.
10. Pokrovskiy, G.I.(1980), *Vzryv* [The explosion], Nedra, Moscow, SU.
11. Fokin, V.A. and Togunov, M.B. (2013), "Methodological aspects of the quality of emulsion explosives based on the results of measurements of the velocity of detonation", *Gorny zhurnal*, no.4, pp.77-79.
12. Shchukin, Yu.G., Kolominov, I.A. and Astakhov, E.O. (2013), "Special charges of the benching technology in the "Karel'skij okatysh" open-pit", *Gorny zhurnal*, no.10, pp. 86-88.
13. Doynikov, Yu. A. and Belyaev, A. E. (2012), "Resource-saving technologies of blast holes drilling in the gold open-pits of Yakutia", *Gorny zhurnal*, no.4, pp. 42-45
14. Kutuzov, B.N., Timofeev, I. N. and Tokarenko, A. V. (2012), "Testing of various types of the primers for enhancing the action of blasthole charges", *Gorny zhurnal*, no.9, pp. 88-90.

15. Zharikov, S.N. and Shemenov, V. G. (2013), "The evaluation methodology of energy intensity of technological processes in the cycle of "blasting crushing - mechanical crushing - grinding" at the open-pit mining of the ore deposits", *Gorny zhurnal*, no.10, pp.83-86.

Об авторах

Мец Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор, кафедра открытых горных работ, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина, knu@alba.dp.ua

Антонов Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра открытых горных работ, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина, knu@alba.dp.ua

Левицкий Андрей Павлович, генеральный директор ООО «МИ-ЦЕНТР», Кривой Рог, Украина, levitskyyp-micentre@ukr.net

About the authors

Mets Yuriy Semenovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Department of surface mining, SHEI "Kryvyi Rih National University", Kryviy Rih, Ukraine, knu@alba.dp.ua

Antonov Andriy Yuriyovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Department of surface mining, SHEI "Kryvyi Rih National University", Kryviy Rih, Ukraine, knu@alba.dp.ua

Levitskiy Andriy Pavlovich, M.S (Tech), General Director of LLC "ME-Centre", Kryviy Rih, Ukraine, levitskyyp-micentre@ukr.net

Анотація: Робота присвячена розробці ефективних методів управління енергією вибуху на кар'єрах. Базисом даного дослідження є основні положення динамічної теорії пружності. Проведено аналіз умов досягнення рівномірного дроблення порід. Була підтверджена можливість досягнення рівномірного дроблення шляхом застосування в центральній частині заряду вибухових речовин, зі зниженою швидкістю детонації, або шляхом зміни діаметру заряду. Проведене порівняння ефективності даних способів дозволило визначити перевагу використання методу зі зміною діаметра заряду, за критерієм ефективності управління. Розроблено математичний метод визначення показників детонаційного тиску для оптимального протікання процесу вибуху.

Ключові слова: кар'єр, енергія вибуху, пружність.

Abstract: The work is dedicated to the development of the effective energy management techniques of explosion at open-pit mines. The basis of the given research is basic provisions of linear elasticity. The analysis of the conditions for achieving the evenly crushing of the rocks was conducted. The possibility of achieving the evenly crushing, by application the explosive with low velocity of detonation in the center part of the explosive charge, or by changing the diameter of the charge, was confirmed. Carried out comparison of the effectiveness of these methods has allowed to determine the advantage of using the method of changing the diameter of the charge by criterion of management efficiency.

Keywords: open-pit mine, energy of explosion, elasticity.

Статья поступила в редакцию 13.04.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко