

ЛАЗУТКИН Александр, УШАКОВ Леонид
НОРДИН Виктор, КЛИМОВ Юрий
АЛЬСЕНОВ Женыс, ФАБРИЧНЫЙ Юрий

Политехнический институт, Караганда - СССР

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД УДАРНЫМИ И АЛМАЗНЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ

Резюме. Одним из способов, заменяющих буровзрывное разрушение крепких и средней крепости пород, характеризующееся рядом известных недостатков, является разрушение ударными и алмазными исполнительными органами с высокой энерговооруженностью. В Карагандинском политехническом институте в течение ряда лет ведутся работы по созданию таких исполнительных органов для горных машин различного назначения. Разработан и изготовлен ряд экспериментальных образцов исполнительных органов, испытанных в различных лабораторных и промышленных условиях.

Параметры разрушения и режимы работы исполнительных органов исследовались с целью оптимизации процесса разрушения методами математического и физического моделирования, осциллографирования и тензометрирования протекающих явлений. Определены наиболее многофакторные математические модели процессов разрушения, анализом которых найдены рациональные значения геометрических, кинематических, динамических параметров и их взаимные соотношения. Исследования проводились с помощью ЭВМ. Результаты исследований в виде рекомендации переданы ряду промышленных предприятий.

Неуклонно возрастающий объем проведения подготовительных работ в угольных и рудных месторождениях, ухудшение горно-геологических условий их отработки, снижение содержания полезного компонента определяют значительное увеличение трудовых затрат на отбойку и переработку горной массы.

Применяющийся в настоящее время в основном буро-взрывной способ отбойки крепких и средней крепости пород характеризуется рядом недостатков: цикличностью, многооперационностью, нарушением сплошности непосредственной кровли, необходимостью проветривания после взрывания, невозможностью автоматизации процесса и др.

Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы, проводимые в последние годы показывают, что перспективными являются изыскания, направленные на создание ударно-скалывающих и алмазных породоразрушающих исполнительных органов, обеспечивающих за счет больших величин развиваемых усилий на инструменте повышение эффек-

тивности отбойки крепких горных пород и, как следствие, увеличение производительности труда.

Изыскание математических моделей процесса разрушения горных пород необходимо для определения рациональных режимных и конструктивных параметров исполнительных органов. Сложность и нестационарность процесса, изменчивость свойств горного массива не позволяют на основании классической механики сплошной среды получить математические модели, описывающие с достаточной адекватностью реальный процесс разрушения. Из этих соображений для решения поставленной задачи использованы методы теорий подобия, размерностей, моделирования и многофакторного эксперимента.

Исследования разрушения горных пород полноразмерными исполнительными органами с высокой энерговооруженностью с целью определения комплексных математических моделей процесса затруднительно провести из-за значительной трудоемкости и сложности изменения силовых и кинематических характеристик в необходимом диапазоне. Поэтому осуществлен переход от натурного процесса разрушения к его модели в уменьшенном масштабе при соблюдении условий подобия.

Реальная ударная система в наших исследованиях моделировалась следующим образом (рис. I). Ударник массой m_1 , сбрасываемый с разных высот на копровом стенде, ударяет по инструменту массой m_2 (или двум инструментам массами m_2' и m_2''). Инструмент своим допотопным лезвием внедряется в блок породы и производит отделение некоторого объема V_p .

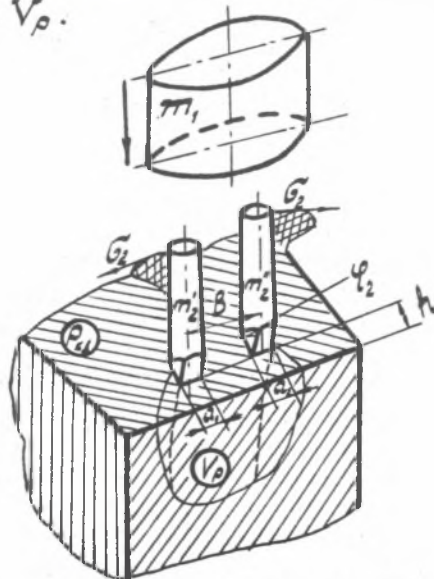


Рис. I. К определению параметров, влияющих на процесс ударного разрушения

В соответствии с \mathcal{L} -теоремой теории подобия и моделирования после отбрасывания неизменяемых безразмерных факторов получим безразмерные критериальные уравнения процесса ударного разрушения в следующей форме:

при разрушении одним инструментом

$$V_p/k^2 a_1 = f(\sigma_2/\rho_{сд}, a_1/k, m_1/m_2, \varphi_2), \quad (1)$$

при разрушении двумя инструментами

$$V_p/k^2 b = f(\sigma_2/\rho_{сд}, b/k, a_1/a_2, m_1/m_2, \varphi_2), \quad (2)$$

где: σ_2 - напряжение, генерируемое в инструментах; $\rho_{сд}$ - контактная динамическая прочность разрушаемой породы; a_1 и a_2 - значения ширины лезвий инструментов; b - расстояние между осями инструментов; k - толщина стружки; m_1 и m_2 - массы ударника и инструментов (при разрушении двумя инструментами m_2 определяется суммированием m_2 и m_2''); φ_2 - угол заострения инструментов.

Для проведения модельного эксперимента были определены уровни изменения критериев подобия, входящих в (1) и (2), причем численные значения уровней должны быть одинаковыми для модели и натуре. Обозначим в этих выражениях выходной безразмерный показатель через y , а входные безразмерные влияющие факторы через x_i , тогда выражения (1) и (2) примут общий вид

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (3)$$

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). \quad (4)$$

Определение зависимостей вида (3) и (4) являлось задачей модельных экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с теорией многофакторного эксперимента [2], на первом этапе которых проверялась возможность интерпретации процесса разрушения линейными регрессионными моделями. Однако, статистическая проверка показала, что линейные модели неадекватно описывают реальный процесс разрушения. Дальнейшие исследования проводились в соответствии с матрицами планирования эксперимента 2-го порядка, характеристики и порядок построения которых для любого числа влияющих факторов определяются методами матричной алгебры [2]. Каждый фактор изменялся на 5 уровнях.

Регрессионные модели 2-го порядка имеют вид

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (5)$$

где k - число влияющих факторов.

Численные значения коэффициентов регрессии полиномиального уравнения (5) определяются из выражения

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T y), \quad (6)$$

где: B - матрица-столбец коэффициентов регрессии; X - матрица планирования эксперимента; X^T - транспонированная матрица планирования; y - матрица-столбец результатов эксперимента.

После проведения многофакторного эксперимента его результаты проверялись на возможные выбросы в ряду наблюдений, нормальность распределения, воспроизводимость эксперимента, статистическую значимость коэффициентов регрессии: адекватность полученных моделей реальному процессу [2]. Результаты эксперимента обрабатывались с помощью ЭВМ по программе на языке ФОРТРАН. После обработки получены нелинейные математические модели процесса ударного разрушения горных пород, выраженные в виде полиномиальных зависимостей относительных объемов разрушенной за единичный удар породы и удельных энергозатрат разрушения от влияющих факторов. Эти модели после перехода от кодированных значений переменных к натуральным, например, для схемы разрушения с двумя вырожденными поверхностями выглядят следующим образом:

при разрушении одним инструментом

$$V_p = k^2 a_1 [0,2(a_1/k)^2 + 0,3(a_1/k)(m_1/m_2) + 2b_2/P_{ср} - 1,5a_1/k - 0,2 m_1/m_2 + 0,5], \quad (7)$$

$$\begin{aligned} H_w \cdot 10^{-6} = & 3,1(a_1/k)^2 + 0,1(m_1/m_2)^2 - 5,2(b_2/P_{ср})\varphi_2 + \\ & + 1,55(b_2/P_{ср})(m_1/m_2) - 0,4(a_1/k)(m_1/m_2) - 0,9b_2/P_{ср} - \\ & - 9,8a_1/k + 2,4\varphi_2 - 1,3m_1/m_2 + 12,6, \text{ Дж/м}^3, \end{aligned} \quad (8)$$

при разрушении двумя инструментами

$$V_p = k^2 b [1,78 (\sigma_2 / P_{ср})^2 + 0,02 (\mu_1 / \mu_2)^2 - 0,96 \sigma_2 / P_{ср} + 0,06 b / k + 0,30 a_1 / a_2 - 0,07 \mu_1 / \mu_2 - 0,40 \varphi_2 - 0,13], \quad (9)$$

$$\begin{aligned} H_w \cdot 10^{-6} = & 24,88 (\sigma_2 / P_{ср})^3 + 2,11 (a_1 / a_2)^3 + 2,07 \varphi_2^3 - 13,72 (\sigma_2 / P_{ср})^2 \times \\ & \times (b / k) \chi (a_1 / a_2) + 20,93 (\sigma_2 / P_{ср}) (b / k) \varphi_2 + 67,3 (\sigma_2 / P_{ср}) \chi (a_1 / a_2) \varphi_2 + \\ & + 4,25 (b / k) \chi (a_1 / a_2) \varphi_2 - 3,04 (\sigma_2 / P_{ср}) (b / k) - 11,42 (\sigma_2 / P_{ср}) \chi (a_1 / a_2) + \\ & + 2,12 (\sigma_2 / P_{ср}) \chi (\mu_1 / \mu_2) - 155,7 (\sigma_2 / P_{ср}) \varphi_2 + 1,48 (b / k) \chi (a_1 / a_2) - \\ & - 133 (b / k) \varphi_2 - 41,46 (a_1 / a_2) \varphi_2 + 59,64 (\sigma_2 / P_{ср}) + 5,28 (b / k) + \\ & + 12,87 (a_1 / a_2) - 0,57 (\mu_1 / \mu_2) + 75,65 \varphi_2 - 38,9, \text{ Дж/м}^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Сравнение математических моделей (7), (8) с моделями (9), (10) показывает, что процесс разрушения массива двумя инструментами является более сложным. Детальный анализ математических моделей с помощью ЭВМ позволил расположить безразмерные факторы по степени влияния на процесс разрушения, определить рациональные значения влияющих факторов и их соотношений, которые повышают эффективность процесса разрушения.

Процесс взаимодействия комбинированного исполнительного органа, включающего различные по типу и последовательности воздействия на массив рабочие инструменты, с неоднородным забоем, характеризующимся случайным распределением его физико-механических характеристик, может быть изучен с использованием методов исследования сложных систем. В нашем случае комбинированный исполнительный орган состоит из режущего диска, оснащенного алмазными сегментами и гидравлического отрывника с тарельчатым рабочим элементом для отделения надшелевого породного целика. Процесс разрушения является циклическим и заключается в прорезании диском щели в массиве параллельно поверхности забоя на определенную глубину с последующим отделением образованного породного целика рабочим элементом отрывника. Затем цикл "резание - отрыв" повторяется многократно до пол-

ного разрушения забоя. Перемещение режущего диска вдоль забоя осуществляется гидравлическим механизмом подачи.

Система "забой - исполнительный орган" в этом случае может быть представлена структурной схемой в виде четырех агрегатов, взаимодействующих между собой и с внешней средой, что характеризуется наличием между ними соответствующих связей (рис.2). На агрегат A_1 подаются внешние входные сигналы в виде вектора X : $x_1 = Q_n$; $x_2 = S_n$; $x_3 = P_n$, представляющего собой характеристики гидравлического насоса и гидроцилиндра подачи. В агрегате A_1 , в результате взаимодействия операторов перехода H и выхода G /3/ происходит преобразование входных величин и формирование на выходе вектора Y : $y_1 = F_n$ - усилие подачи; $y_2 = V_n$ - скорость подачи, который является входным для агрегата A_2 . Кроме того, входной вектор агрегата A_2 дополняется внешними входными величинами: $x_4 = P_c$; $x_5 = N$; $x_6 = b_d$; $x_7 = b_g$; $x_8 = R$; $x_9 = b_{d2}$; $x_{10} = \tau_{cm}$; $x_{11} = \rho_p$ ($\tau_{отр}$); $x_{12} = b_s$; $x_{13} = d$; $x_{14} = \Delta X$. Здесь фактор $x_4 = P_c$ - средневзвешенная контактная прочность породы, является характеристикой забоя и относится к случайным величинам. Все другие факторы детерминированные, причем $x_5 = N$ - мощность привода режущего диска; $x_6 = \rho_p$ - глубина прорезаемой диском щели за цеки; ΔX - шаг дискретизации, остальные факторы являются конструктивными характеристиками режущего инструмента.

Взаимодействие первых двух агрегатов состоит в следующем. При $t = 0$ в агрегат A_2 поступают в виде входных сигналов все перечисленные выше факторы. Выполняется розыгрыш средневзвешенной контактной прочности породы в забое на первом шаге $X = 0$. Определяется фактическая скорость подачи $V_{нф}$, исходя из заданной мощности привода и N и значения P_c /4/. С учетом $V_{нф}$ и P_c находится допустимое значение усилия подачи $F_{нф}$ и по фактическим значениям $V_{нф}$ и $F_{нф}$ вводится корректировка значений Q_n и P_n на величины соответственно ΔQ_n и ΔP_n , которые передаются агрегату A_1 . На выходе из A_1 будем иметь значения F_n и V_n , приведенные в соответствие с $F_{нф}$ и $V_{нф}$. При поступлении в управляющего сигнала из A_2 в момент времени $t_1 > 0$, в A_1 поступают входные сигналы и он приступает к работе.

До момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$, где $\Delta t = \frac{\Delta X}{V_n}$, состояние системы не изменяется, а в момент t_2 на вход A_2 поступает новое значение P_c , что вызывает изменение V_n и Q_n . При

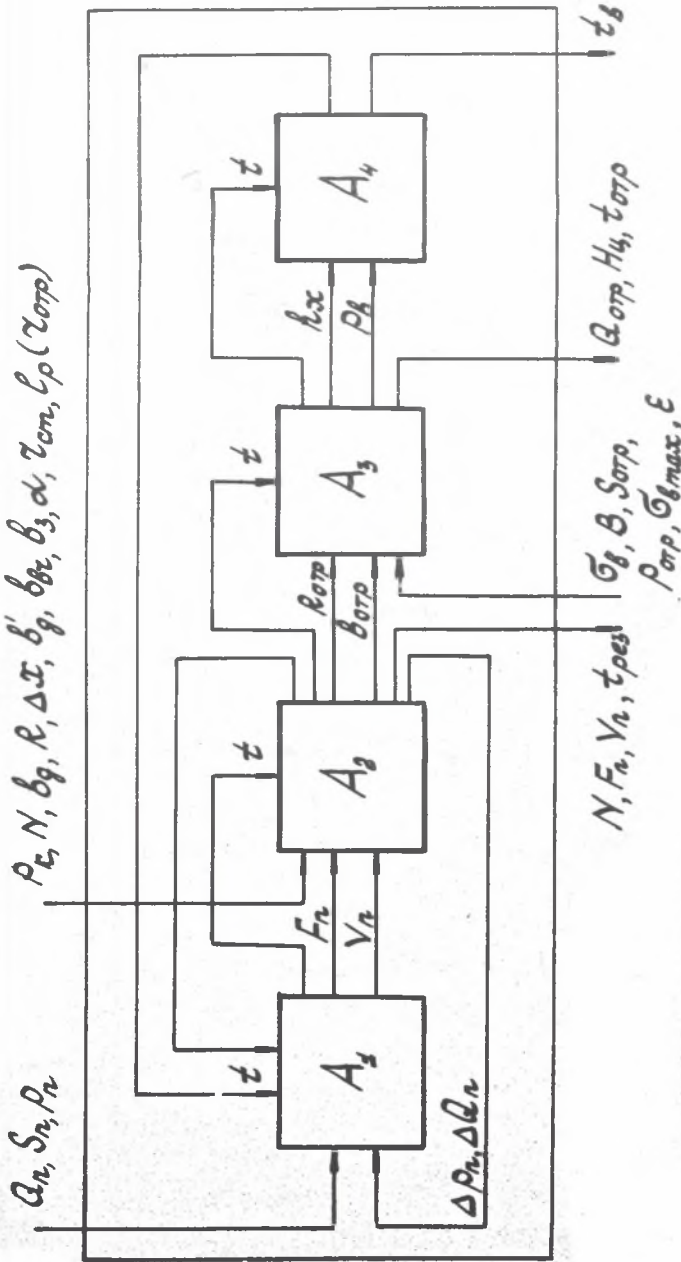


Рис.2. Структурная схема агрегированной системы "забой - исполнительный орган"
 A_1 - механизм подачи; A_2 - режущий орган; A_3 - гидравлический отрывник;
 A_4 - механизм возврата отрывника

этом, очередное значение ΔQ_n в виде входного сигнала поступает в A_1 , а из A_1 в виде выходного сигнала на вход A_2 поступает очередное значение V_n , которое не изменяется до момента времени t_3 и т.д. Такая работа A_1 и A_2 продолжается до момента времени $T = \sum \Delta t_i$, где $n = \frac{L_0}{\Delta x}$ и $\Delta t_i = \frac{\Delta x}{V_{ni}}$. В момент времени $t = \frac{L_0}{V_n}$, равный продолжительности цикла резания, расход жидкости Q_n и скорость подачи V_n становятся равными нулю. Из A_2 поступает управляющий сигнал в A_3 , извещающий о начале процесса отрыва подрезанного целика.

Одновременно в агрегат A_3 поступает вектор входных внешних и внутренних сигналов X : $x_1 = \sigma_{\text{ср}}$; $x_2 = S_{\text{отр}}$; $x_3 = P_{\text{отр}}$; $x_4 = \epsilon$; $x_5 = \sigma_{\text{вmax}}$; $x_6 = R_{\text{отр}}$; $x_7 = V_{\text{отр}}$. Здесь $\sigma_{\text{ср}}$ - средневзвешенное сопротивление породы изгибу, являющееся величиной случайной. Значения $S_{\text{отр}}$, $P_{\text{отр}}$ и ϵ - характеристики гидropневматического привода отрывника; $R_{\text{отр}}$ и $V_{\text{отр}}$ - конструктивные параметры тарельчатого рабочего элемента отрывника.

Преобразование входных сигналов в выходные в агрегате A_3 сопровождается изменением его состояния и приводит к определению допустимой толщины отрываемого целика H_4 при максимальном значении сопротивляемости породы изгибу $\sigma_{\text{вmax}}$ и к формированию выходных сигналов $y_1 = h_x$ - длины хода рабочего элемента отрывника и $y_2 = P_0$ - давление в цилиндре возврата рабочего элемента.

Эти выходные сигналы поступают на вход агрегата A_4 одновременно с управляющим сигналом, в результате чего происходит срабатывание A_4 и цикл отрыва надцелевого целика завершается возвратом рабочего элемента отрывника в исходное положение. В этот момент A_4 подает на вход A_1 управляющий сигнал на начало следующего цикла резания. Функционирование системы продолжается до окончания времени моделирования $T_{\text{мод}}$.

В процессе моделирования по окончании каждого цикла срабатывания агрегатов A_2 , A_3 и A_4 для анализа поведения системы фиксируются выдаваемые ими выходные сигналы, служащие для формирования целевой функции при оптимизации и синтезе параметров системы. Наибольший интерес в этом плане представляют силовые и энергетические параметры: мощность резания N , усилие подачи F_n и отрыва целика $Q_{\text{отр}}$, а также режимные параметры: скорость подачи режущего органа V_n , время резания $t_{\text{рез}}$, толщина отрываемого целика H_4 , время отрыва $t_{\text{отр}}$ и время возврата рабочего элемента отрывника t_0 . За исключением F_n все остальные выходные параметры суть величины случайные, так как они в различной степени зависят от случайных характеристик забоя P_c и $\sigma_{\text{ср}}$, т.е. от их законов распределения. Для определения законов распределения средневзвешенных значений

R_c и B_f была разработана имитационная модель неоднородного забоя со случайным расположением твердых включений различной крепости и различных размеров. Эта модель состоит из двух алгоритмов, один из них реализует статистическую обработку на основе зарисовок реальных забоев, полученных экспериментальным путем в производственных условиях. Другой - имитирует изменчивость параметров забоя в зоне работы исполнительного органа в соответствии с математической моделью.

Результаты исследований по представленным методам использованы при создании экспериментальных образцов выемочных и проходческих машин с ударными и комбинированными исполнительными органами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дазуткин А.Г., Нордин В.В.: Многофакторные математические модели ударного разрушения горных пород. - В сб. докладов У-го международного симпозиума ТАТАРАМАН-88 (СССР). - Кошице, 1988, ч. 1, сс. 117-120.
- [2] Ушаков Л.С., Нордин В.В.: Методические особенности модельных исследований ударного разрушения горных пород и обработки их результатов. - Караганда, 1979. - 15 с. - Рукопись деп. в ЦНИИ Иуголь 5 апр. 1979, № 1445.
- [3] Бусленко Н.П.: Моделирование сложных систем. - М.: Наука 1978, с.400.
- [4] Алмазный инструмент для разрушения крепких горных пород А.Ф. Кичигин, С.Н. Игнатов, Ю.И. Климов и др. - М.: Недра 1980, с. 160

MODELOWANIE PROCESÓW URABIANIA SKAŁ ORGANAMI UDAROWYMI I DIAMENTOWYMI

S t r e s z c z e n i e

Jednym ze sposobów zastępowania urabiania materiałami wybuchowymi skał zwięzłych i średniej zwięzłości, charakteryzującego się szeregiem znanych wad, okazuje się urabianie udarowymi i diamentowymi organami o wysokiej energii. W Politechnice Karagandzkiej od szeregu lat prowadzone są prace nad stworzeniem organów urabiających tego typu dla maszyn górniczych o różnym przeznaczeniu. Opracowano i wykonano szereg doświadczalnych modeli organów urabiających, które przebadano w różnych warunkach laboratoryjnych i przemysłowych.

Parametry urabiania i warunki pracy organów urabiających były badane w celu optymalizacji procesu urabiania. Stosowano metody modelowania matematycznego i fizycznego oraz oscylograficzne i tensometryczne badania przebiegu występujących zjawisk. Opracowane wieloczynnikowe nieliniowe

modele matematyczne procesów urabiania doprowadziły po przeanalizowaniu do określenia racjonalnych wielkości parametrów geometrycznych, kinematycznych i dynamicznych oraz ich wzajemnych związków. Badania prowadzono z wykorzystaniem EMC. Rezultaty badań w postaci zaleceń przekazano szeregu zakładom przemysłowym.

MODELLING THE PROCESSES OF ROCK BREAKING
WITH IMPACT AND DIAMOND WORKING ORGANS

S u m m a r y

One of the means of substituting boreblasting breaking of hard rocks and rocks of medium hardness characterized by a number of known defects is breaking with the impact and diamond working organs which have powerful source of energy. For some years the Karaganda Polytechnical Institute has been working at creating such working organs for mining machines of various appointment. A number of experimental samples of working organs has been worked out and tested in various laboratories and at the industrial enterprises.

The parameters of breaking and working conditions of working organs has been investigated for optimization of breaking processes with the methods of mathematical and physical modelling, oscelographing and tensoring the phenomena which take place. Discrete multifactor mathematical models of breaking processes have been defined and analysing then it was possible to find the rational meanings of geometrical, kinematical, dynamic parametres and their mutual correlation. The investigations were carried out with the help of computers. The results of the investigations in the form of recommendations have been given to a number of industrial enterprises.