© В.С. Вагин, В.И. Голик, О.З. Габараев, 2005

УДК 504.55.054:662 (470.6)

В.С. Вагин, В.И. Голик, О.З. Габараев

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ СКАЛЬНОГО МАССИВА

Семинар № 8

Сдвижение породного массива представляет собой следствие внутреннего деформирования и разрушения элементарных минеральных частиц, осложненного анизотропностью среды. Поэтому его можно описать моделью трехмерной упругой среды с объемными включениями, подчиняющейся закону Гука:

$$\Sigma\, \sigma = T_y \Sigma\, \varepsilon\kappa \qquad (1)$$

$$\Sigma\, \varepsilon = T_п \Sigma\, \sigma\kappa \qquad (2)$$

где σ - напряжения; ε - деформации; $T_у$ и $T_п$ эффективные тензоры, соответственно, упругости и податливости; κ - коэффициент дискретности.

Внутреннее поле напряжений структурных отдельностей массива связано с внешним полем напряжений зависимостью:

$$\sigma_{пор.} = [\sigma_{мас.}\, f\, \Sigma(1...n)\, T]\, k_{геол.} \qquad (3)$$

где $\sigma_{пор.}$- поле напряжений пород; $\sigma_{мас.}$ - поле напряжений массива; Т - тензоры упругих модулей неоднородностей, случайных упругих модулей, постоянных и др.; $k_{геол.}$- коэффициент дискретности.

В условиях объемного сжатия в массивах происходит закрытие тектонических структур с увеличением прочности и модуля деформации, в результате чего объемное напряженное состояние трансформируется от растяжения и сдвига на контуре пустот до сжатия в глубине массива. При кратковременном протекании процесса разрушения в запредельной стадии реологические процессы протекают в запредельной области. При длительном разрушении реологические процессы развиваются на допредельной стадии, поэтому потеря прочности меньше. Из совместного рассмотрения показателя деформирования при различных режимах пригрузки массива следует:

$$M_к\,(t) = M_\tau + (M_о - M_\tau)\, e^{-at} \qquad (4)$$

$$M_д\,(t) = M_б + (M_\tau - M_б)\, e^{-at} \qquad (5)$$

где $M_к$ - модуль спада при кратковременной нагрузке; $M_д$ - модуль спада при долговременной нагрузке; Mτ - модуль минимального для данных условий спада; Мб - модуль спада при бесконечно продолжительной нагрузке; а - параметр аппроксимации; t - время.

В массиве одновременно сосуществуют несколько областей разрушения. Вблизи разлома возникает зона нарушенных пород с минимальной несущей способностью. За ней следует зона ослабленных пород запредельного деформирования с возрастанием прочности по мере удаления от разлома. Наконец, существует зона нетронутых пород в стадии допредельного деформирования. Максимальная сохранность массива достигается при минимизации объемов первых двух зон и увеличение доли допредельного деформирования, при котором прочность определяется с учетом времени:

$$\sigma_{сж.м.}\,(t) = k_т\,[\sigma_{сж.д.} + (\sigma_{сж.м.} - \sigma_{сж.д.})]\, e^{-at} \qquad (6)$$

где $\sigma_{сж.м.}$ - предел мгновенной прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{сж.д.}$ - предел длительной прочности при одноосном сжатии, МПа; $k_т$ - коэффициент тектонической нарушенности; а - параметр аппроксимации; t - время.

Сохранность массива под влиянием напряжений:

$$Kt + \nu_р = f\,(\nu_н) \qquad (7)$$

где $\nu_р$ - интенсивность напряжений в ослабленном массиве; t - время ; $\nu_н$ - напряжения в нетронутом массиве.

Условие устойчивости массивов:

$$\Sigma\,(\sigma_3 + K\,\sigma_2\,\sigma_1) \le \Sigma\,\sigma_о K \le \Sigma\,\sigma_н K$$

$$\Sigma\,\sigma_н K = f\,(\sigma_{ост}, h_{с.}, \Pi_{min}, \Pi_{max}) \qquad (8)$$

$$\Sigma\,\sigma_о K\, K_{рн} = f\,(\sigma_н, H, B)$$

где $\sigma_{3,2,1}$ - главные напряжения в массиве; $\sigma_н$, $\sigma_о$ - напряжения в зонах нарушенных и ослабленных пород, соответственно, МПа; $h_с$ - высо-

та зоны влияния разлома, м; $П_{max}$ и $П_{min}$ - максимальное и минимальное значения технологического воздействия; $\sigma_{ост.}$ - остаточная прочность пород при одноосном сжатии, МПа; Н и В - высота и ширина зоны технологического воздействия, м; К- коэффициент влияния тектонических нарушений; $К_{рн}$- коэффициент разгрузки напряжений.

Разгрузка массива от напряжений до уровня заданных деформаций происходит в пределах зон нарушенности и ослабленности пород:

$$\sigma^{разгр} = \begin{cases} \sigma_н = \sigma_{остю} + \sigma_к = \int fx(dx_1, dx_2, ...dx_n), \\ \sigma_о = \sigma_{пр.} - \sigma_г = \int fx(dx_1, dx_2, ...dx_n), \\ \sigma_п = К\ (\sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1) \end{cases} \quad (9)$$

где $\sigma_г$ - напряжения распора структурных блоков пород в зоне запредельных деформаций, МПа.

Параметры напряженно-деформированного состояния массива изменяются в пределах участка литосферы высотой:

$$Н_{ндс} = h_р + h_о + h_н \quad (10)$$

где h_h, $h_о$ и $h_н$, соответственно, высоты зон разрушенных, ослабленных и нетронутых пород, м.

Деформированию подлежит участок с наклонной высотой:

$$Н = m_{р\ т} + m_{н\ п} + m_н \quad (11)$$

где $m_{р\ т}$ - мощность; $m_{нп}$ - мощность налегающих пород; $m_н$ - мощность рыхлых отложений.

$$\Sigma\sigma = \gamma Н = \gamma\Sigma\ (h) = \gamma\Sigma(m) \quad (12)$$

Модель управления массивом имеет вид:

$$\Sigma\varepsilon = Тк\sigma_{разгр} = \begin{cases} \sigma_н = \sigma_{ост.} + \sigma_г \\ \sigma_о = \sigma_{пр.} - \sigma_г \\ \sigma_п = К\ (\sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1) \end{cases} = f(t, m_{рт,}, h_{з.д,}, Э_р) \quad (13)$$

где $h_{зд}$ - высота зоны развития запредельных деформаций; $Э_р$- энергия разгрузки массива от напряжений.

Управление напряженно-деформированным состоянием массивов заключается в создании условий, когда обеспечивается неравенство:

$$\left[\sigma_{н.м}\right] < \sigma^{ост} < \left[\sigma^{ост}\right]_{крит} \quad (14)$$

где $\left[\sigma^{ост}\right]_{крит}$ - критические напряжения в нарушенных породах перед их дезинтеграцией.

Напряжения в массиве при прочих равных условиях зависят от комплекса переменных, действующих нередко одновременно:

$$\sigma_{техн} = f\left(t, k_t, П_n\right) \quad (15)$$

где t - время; k_t - коэффициент совпадения работ во времени; $П_n$ – параметры технологического воздействия.

Управление состоянием массива регулированием уровня напряжений сводятся к графоаналитическому прогнозу поведения пород при экстремальной нагрузке. Высота зоны распространения критических напряжений определяется из условия:

$$H = f\left[\sigma\right]_{крит}^{ост} > h_{техн} = f\left[\sigma\right]_{техн} \quad (16)$$

где $h_{техн}$ - высота зоны техногенного влияния, м;

$$h_{техн} = \int_{min}^{max} fV \int_{min}^{max} fS \int_{min}^{max} fm \quad (17)$$

где Н' - высота зоны возможных деформаций под влиянием критических напряжений, м; $S_р$ - площадь ослабления, м^2; α_H - угол падения, град; $m_н$ - мощность по нормали, м.

При моделировании процессов разрушения скальных массивов их состояние в развитие представлений С.В. Ветрова описывается условием:

$$\sigma к_з = \int_{l_{min}}^{l_{max}} fx\left(dx_1, dx_2, ...dx_n\right) \to n, R = \quad (18)$$

$$= \int_{l_{min}}^{l_{max}} f \cdot x\left(dh_з + dh_n\right)$$

где σ - напряжения в зоне влияния выработок, МПа; $К_з$ – коэффициент корректировки напряжений; l_{max}, l_{min} – пролеты обнажения пород, м; $x_1 ... x_n$ – технологические, физико-механические и иные характеристики; П - потери руд, доли ед.; R – разубоживание руд породами, доли ед.; $h_з$ – высота закладочного массива, м; $h_п$ - высота влияния горных выработок, м.

Отличие предложенной модели состоит в использовании коэффициента корректировки напряжений $К_з$. При закладке пустот твердеющими смесями уровень напряжений снижается за счет характеристик материала твердеющей закладки. Степень безопасности технологий по развитию критических напряжений и деформаций оценивается коэффициентом $К_1$:

$$К_1 = f\ (V_о - V_з \cdot К_т) \quad (19)$$

где $V_о$ - объем образованных в массиве пустот, м^3; $V_з$ - объем заполненных закладкой пустот, м^3; $К_т$- коэффициент доли твердеющей закладки.

При объемном сжатии прочность закладки повышается в 1,5-3 раза, а эффективность работы зависит от соотношения пригрузки массива породами и бокового подпора стенок искусственного массива. Состояние массивов и

величина потерь и разубоживания определяются объемом пустот, объемом выданных на поверхность руд и прочностью пород.

Гипотезы управления состоянием массива исходят из условия не превышения высоты зоны влияния горных работ по сравнению с глубиной расположения рудного тела:

$$H > \eta h_c. \qquad (20)$$

где H - глубина месторождения от рудного тела до поверхности, м; h_c - высота зоны влияния пустоты по вертикали, м; η - коэффициент запаса.

В соответствии с гипотезой С.В. Ветрова устойчивость массива обеспечивается при условии:

$$L_{пред} > 2\alpha = d_1\left(\frac{R_{сж}}{KH\gamma} - 1\right), \qquad (21)$$

где *a* - полупролет свода заклинивания пород, м; d_1 - горизонтальный размер структурного блока пород, м; $R_{сж}$ - сопротивление горных пород структурного блока сжатию, т/м^2; γ - объемный вес пород, кг/м^3; *H* - глубина расположения пяты свода заклинивания пород, м; *K* - коэффициент запаса.

При закладке пустот твердеющими смесями разгрузка напряжений стабилизирует состояние массива с достижением эффекта за счет уменьшения потерь и разубоживания. В зависимости от степени деформирования пород в массиве сосуществуют несколько областей разрушения. Вблизи контура возникает зона нарушенных пород с минимальной прочностью. За ней следуют зона ослабленных пород с возрастанием прочности по мере удаления от пустот и зона нетронутых пород. Максимальная сохранность массива обеспечивается при увеличение доли третьей зоны, при котором прочность при одноосном сжатии с учетом времени:

$$\sigma_{vg}(t) = k_n[\sigma_{vg} + (\sigma_{vg} - \sigma_{lg})]\, t^{-at} \qquad (22)$$

где $\sigma_{мп}$ - предел мгновенной прочности, МПа; $\sigma_{дп}$ - предел длительной прочности, МПа; $k_т$ - коэффициент тектонической нарушенности; a - параметр аппроксимации; t - время.

Предложенная модель предполагает возможность управления напряжениями посредством ограничения деформаций с помощью закладки пустот твердеющими смесями:

$$\sigma_1 \le \sigma_2 \le \sigma_3 = \sigma_н \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \qquad (23)$$

где σ_1 – напряжения в зоне нетронутых пород, МПа; σ_2 - напряжения в зоне влияния очистных работ, МПа; σ_3 - напряжения в закладочном массиве, МПа; $\sigma_н$ - нормативное сопротивление сжатию закладки, МПа; K_1 - коэффициент неоднородности закладочного массива; K_2 - коэффициент увеличения прочности закладки со временем; K_3- коэффициент увеличения прочности закладки в массиве; K_4- коэффициент условий работы.

Высота зоны деформирования из условия заклинивания блоков пород:

$$h_c = a\ v \qquad (24)$$

где a = B/2 - полупролет свода естественного заклинивания пород Ветрова; v - коэффициент надежности заклинивания:

$$v = 2d_2/d_1\ R_2/_1 \qquad (25)$$

где R_1 и R_2 - прочность пород в вертикальном и горизонтальном направлениях; d_2 - вертикальный размер структурных блоков, м; d_1- горизонтальный размер структурных блоков, м.

Максимальные напряжения в системе:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_т, \qquad (26)$$

где $\sigma_т$ - напряжения, создаваемые технологическими процессами, МПа.

Напряжения в результате заполнения пустот:

$$\sigma_м = n_1\sigma_{п.3} + n_2\sigma_{с.3} + n_3\sigma_{т.3} + n_4\sigma_{н.3} + n_5\sigma^{ост} = \sum_1^{\lambda} n_\lambda \sigma_m^y \qquad (27)$$

где $\sigma_{п.3}$, $\sigma_{с.3}$, $\sigma_{т.3}$, $\sigma_{н.3}$ - величины подпора, соответственно, прочного, среднепрочного и мало прочного состава твердеющей смесей; λ - число упрочняющих элементов; $n_1, \ldots, n_5$ - массовое число материала в количестве смеси; σ_m^y - прочность смесей.

Предлагаемая модель управления состоянием массива разгрузкой от напряжений описывается уравнениями:

$$\sigma_1 \le \sigma_2 \le \sigma_3 = \sigma_н \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \qquad (28)$$

$$П\,у_т = Ц_T - З_T - У_{T_{БаТ}} - У_{T_{БВЗ}} - У_{T_{БВР}} \qquad (29)$$

$$В_а = В_с \cdot Э_в, \qquad (30)$$

где σ_1 – напряжения в зоне нетронутых пород, МПа; σ_2- напряжения в зоне влияния очистных работ, МПа; σ_3- напряжения в закладочном массиве, МПа; $\sigma_н$- нормативное сопротивление сжатию, МПа; K_1- коэффициент неоднородности закладочного массива; K_2 - коэффициент увеличения прочности закладки со временем;

K_3- коэффициент увеличения прочности закладки в массиве; K_4- коэффициент условий работы; $П_{у_т}$ - прибыль от добычи и переработки руды, руб/т; $Ц_{Т_Б}$ – ценность добытой руды, руб/т; $З_т$ – полные затраты на добычу и переработку руды, руб/т; $У_{T_{RS}}$ – ущерб от 1т разубоживающей массы по контуру блока, руб/т; $У_{T_{RP}}$ – ущерб от переработки 1 т разубоживающей массы внутри блока, руб/т.; $В_а$ - количество альтернативных вяжущих, вес. ед.; $В_с$ - количество стандартных вяжущих, вес. ед.; $Э_в$ – коэффициент эквивалентности вяжущего.

Коротко об авторах

Вагин В.С. – кандидат физико-математических наук,
Голик В.И. – доктор технических наук, профессор,
Габараев О.З. – доктор технических наук, профессор,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт.

НОВИНКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Кутузов Б.Н., Нишпал Г.А. Технология и безопасность изготовления и применения взрывчатых веществ на горных предприятиях: Учебное пособие. — 2-е изд., стер. — 246 с.

ISBN 5-7418-0057-2 (в пер.)

Приведены классификация и характеристики промышленных ВВ, изготавливаемых на горных предприятиях. Дана характеристика компонентов, изложены технологии приготовления и применения сухих гранулированных и водосодержащих взрывчатых веществ. Описано оборудование для приготовления и применения этих ВВ. Приведены сведения о ВВ, полученных из утилизированных боеприпасов, для использования их в качестве компонентов промышленных ВВ. Показана техническая, экономическая и экологическая эффективность приготовления промышленных ВВ на горных предприятиях. Рассмотрены основные вопросы безопасности приготовления и применения ВВ, условия возникновения и развития аварийных ситуаций, а также методы их предупреждения и локализации.

Для студентов горных вузов и факультетов, обучающихся по специальностям «Открытые горные работы», «Физические процессы горного производства», «Взрывное дело» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.235.2+622.235.4