

*Т.Т. Исмаилов, О.З. Габараев, А.Х. Ногаев*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
РУДОВМЕЩАЮЩИХ МАССИВОВ И РАЗРУШЕННЫХ  
ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ  
СОСТОЯНИИ**

**М**еханические испытания материалов породной закладки в установках трехосного сжатия позволяют получать прочностные показатели и устанавливать закономерности деформирования горных пород в объемном напряженном состоянии. Сущность испытаний заключалась в установлении зависимостей между параметрами объемного нагружения и получаемыми деформациям и породной закладки. Кроме того, устанавливался коэффициент бокового распора, характеризующего подерживающие свойства породной закладки в условиях объемного сжатия. В качестве аппаратуры при проведении испытаний образцов породной закладки в объемно-напряженном состоянии использовалась установка длительного трехосного неравнокомпонентного сжатия. Закладочный материал загружали в испытательную камеру и разравнивали его поверхность. Для получения средней плотности материал уплотняли с помощью виброплиты. Затем на поверхность материала укладывали поршень. Верхняя плита пресса приводилась в контакт с поршнем и все регулирующие устройства устанавливали в нулевое положение. Посредством поршня создавалось уплотняющее давление  $\sigma_z^P$ . В результате горизонтального расширения образца возникает боковое давление на тонкую

стальную кольцевую перегородку. К пластине, окружающую подвижную перегородку, прикладывается давление, равное боковому  $\sigma_x^P$ . Для фиксирования параметров объемного сжатия использовали тензодатчики. Осевые деформации регистрировались линейными потенциометрами, установленными с внешней стороны камеры.

В процессе выполнения экспериментов через каждые 0,8МПа, создаваемые прессом испытательной машины, фиксировали уплотняющее давление  $\sigma_z^P$  и его прирост  $\Delta\sigma_z^P$ ; относительную деформацию  $\varepsilon$  и его прирост  $\Delta\varepsilon$ ; горизонтальное давление  $\sigma_x^P$  и его прирост  $\Delta\sigma_x^P$ ; давление, переданное через сыпучий материал на днище модели  $\sigma_z^I$  и его прирост  $\Delta\sigma_z^I$ .

На основании полученных данных устанавливали:

– модуль деформации при объемном сжатии

$$M = \frac{\sigma_z^P}{\varepsilon} \cdot 100; \quad (1)$$

– коэффициент бокового распора

$$K_6 = \frac{\sigma_x^P}{\sigma_z^P}; \quad (2)$$

– давление, передаваемое на основание модели

*Геомеханические свойства породной закладки  
в условиях объемного сжатия*

Уплотняющее давление $\sigma_z^p \cdot 10^{-4}$ , МПа	Боковое давление $\sigma_x^p \cdot 10^{-4}$ , МПа	Относительная деформация $\epsilon$ , %	Давление на основание камеры $\sigma_z^l \cdot 10^{-4}$ , МПа	Модуль деформации $M \cdot 10^{-4}$ , МПа	Коэффициент бокового распора $K_b$
34,2	11,6	4,49	30,6	761,6	0,339
68,7	24,1	6,98	56,3	984,2	0,350
99,6	38,5	9,41	82,1	1058,4	0,386
128,0	50,6	11,5	99,6	1113,0	0,395
106,0	46,4	11,6	107,0	918,0	0,435
135,0	59,26	11,65	107,6	1158,7	0,438
72,5	36,2	11,52	87,6	629,3	0,499
80,2	44,6	11,71	73,6	684,8	0,556
36,8	25,3	11,48	62,6	320,5	0,688

$$\sigma_z^l = \sigma_z^p (1 - f)(1 + f), \quad (3)$$

где  $f$  - коэффициент трения.

Результаты экспериментальных данных приведены в таблице.

Поддерживающие свойства разрушенных геоматериалов, подаваемых в камеру в качестве сыпучей закладки, определяются их давлением в плоскости, ориентированной по нормали к закладочному потоку  $\sigma_z^p$  и боковым давлением за счет горизонтального распора  $\sigma_x^p$ , которые зависят в значительной мере от плотности укладки закладки  $\gamma_p$ .

Рассмотрим горизонтальный слой толщиной  $dH$  на некоторой глубине от поверхности закладочного массива. В результате статического давления и динамических нагрузок вышерасположенных слоев  $\sigma_z^p$  частицы выделенного слоя будут уплотняться. Плотность закладочного массива в слое будет зависеть от высоты заложенной камеры  $H_k$  и аппроксимируется достаточно точно экспоненциальной зависимостью вида:

$$\gamma_p = b e^{\lambda H_k}, \quad (4)$$

где  $b$  и  $\lambda$  - коэффициенты уравнения регрессии:

$$b = \frac{\gamma K_p}{1,55}, \text{ кг/м}^3; \lambda = 0,0043 \text{ м}^{-1}. \quad (5)$$

где  $\gamma$  и  $K_p$  - объемный вес и коэффициент разрыхления породной закладки подаваемой в камеру.

В выделенном слое возникают горизонтальные (сжимающие) напряжения, а в целом на слой будут действовать в горизонтальном направлении создаваемые ими равные по абсолютной величине и обратные по направлению силы  $dP = \sigma_x^p dH$ . Со стороны стенок камеры на элементарный слой будут действовать реактивные силы  $dR = -dP$ . Каждую из сил  $dP$  разложим на две составляющие по нормали к стенкам камеры  $dN$  и в вертикальном направлении  $dF_d$ . Силы  $dN$  вызывают силы трения  $dF_{тр}$  между частицами сыпучей закладки выделенного слоя и стенками камеры. Силы же  $dF_d$  будут иметь направление, совпадающее с породным потоком, и тем самым способствовать перемещению выделенного слоя в сторону основания камеры. Кроме того, на элементарный слой действуют: вертикальная сила  $P_b$  от давления вышележащих слоев закладки, сила тяжести слоя  $dG$  и реакция нижних слоев массива  $R$ . Все эти силы, действующие

на выделенный слой, могут быть определены по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} P_b &= \sigma_z^p (M_0 + 2H \operatorname{ctg} \beta); \\ dG &= \gamma_p \cdot g (M_0 + 2H \operatorname{ctg} \beta) dH; \\ R &= -(\sigma_z^p + d\sigma_z^p) (M_0 + 2H \operatorname{ctg} \beta); \\ dR &= -dP = -\sigma_z^p n dH; \quad dH = \frac{dP}{\sin \beta}; \\ dF_{Tp} &= -2fdN = -2f \sigma_z^p n \frac{dH}{\sin \beta}; \\ dF_d &= \sigma_z^p n dH \operatorname{ctg} \beta, \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $\gamma_p$  – плотность несвязанной сыпучей закладки;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $f$  – коэффициент трения закладки о стенки камеры;  $n$  – коэффициент бокового давления,

$$n = \frac{\sigma_x^p}{\sigma_z^p}. \quad (7)$$

В условиях предельного равновесия сумма вертикальных проекций всех сил, действующих на выделенный слой, равна нулю, то есть

$$P_b + dG - R + dF_{Tp} \sin \beta + dF_d = 0. \quad (8)$$

Подставив выражения (4-6) в формулу (9), после некоторых преобразований, получим:

$$\frac{d\sigma_z^p}{dH} + \frac{2n(f - \operatorname{ctg} \beta)}{M_0 + 2H \operatorname{ctg} \beta} \cdot \sigma_z^p = g b e^{\lambda H_k}. \quad (9)$$

При  $\beta = 90^\circ$  выражении (9) принимает вид:

$$\frac{d\sigma_z^p}{dH} + \frac{2nf}{M_0} \cdot \sigma_z^p = g b e^{\lambda H_k}. \quad (10)$$

Для дифференциального уравнения (10) можно поставить следующее граничное условие:

$$\text{при } H=0 \quad \sigma_z^p = 0. \quad (11)$$

Общее решение уравнения (10) имеет следующий вид:

$$\sigma_{z(H)}^p = e^{\frac{2nf}{M_0} \cdot H_k} \left[ c + g \frac{b}{\lambda + \frac{2nf}{M_0}} \cdot e^{\left(\lambda + \frac{2nf}{M_0}\right) H_k} \right] \quad (12)$$

Постоянная интегрирования с определяется с помощью граничного условия (11)

$$c = -g \frac{b}{\lambda + \frac{2nf}{M_0}}. \quad (13)$$

Подставим выражение с в выражение (12):

$$\sigma_{z(H)}^p = \frac{g b}{\lambda + \frac{2nf}{M_0}} H_k \left[ e^{\left(\lambda + \frac{2nf}{M_0}\right) H_k} - 1 \right] \frac{g b}{\lambda + \frac{2nf}{M_0}}. \quad (14)$$

Раскрывая скобки, получим:

$$\sigma_{z(H)}^p = \frac{g b}{\lambda + \frac{2nf}{M_0}} \left( e^{\lambda H_k} - e^{\frac{2nf}{M_0} H_k} \right). \quad (15)$$

При  $\beta = 180^\circ - \alpha$ , то есть для камеры с параллельными стенками нормальное давление несвязанной сыпучей закладки определяем из дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_z^p}{dH} + \frac{2nf}{\lambda + (1 + f \operatorname{ctg} \alpha)} &= \\ = g \frac{\sin \alpha - f \cos \alpha}{1 + f \operatorname{ctg} \alpha} b e^{\lambda H_k} & \end{aligned} \quad (16)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$\sigma_{z(H)}^p = e^{-\frac{2nf}{M_0(1+f \operatorname{ctg}\alpha)} H_k} \times \left[ c + g \frac{\sin \alpha - f \cos \alpha}{1 + f \operatorname{ctg}\alpha} \cdot b \frac{2e^{\left(\lambda + \frac{2nf}{M_0(1+f \operatorname{ctg}\alpha)}\right) H_k}}{\frac{2nf}{M_0(1+f \operatorname{ctg}\alpha)} + \lambda} \right] \quad (17)$$

Учитывая граничное условие (11), получим:

$$\sigma_z^p = g \frac{\sin \alpha - f \cos \alpha}{1 + f \operatorname{ctg}\alpha} b \frac{1}{\lambda + \frac{2nf}{M_0(1+f \operatorname{ctg}\alpha)}} \times \left[ e^{\lambda H_m} - e^{-\frac{2nf}{M_0(1+f \operatorname{ctg}\alpha)} H_k} \right] \quad (18)$$

при  $\alpha = 90^\circ$ .

$$\sigma_z^p = \frac{gbM_0}{\lambda M_0 + 2nf} \left( e^{\lambda H_m} - e^{-\frac{2nf}{M_0} H_k} \right). \quad (19)$$

Подставив значения коэффициентов уравнения регрессии  $b$  и  $\lambda$  из выражения (5) в формулу (19), величину нормального давления породной закладки при  $\alpha = 90^\circ$  определяем из уравнения:

$$\sigma_z^p = \frac{g\gamma K_p M_0}{(0,0043M_0 + 2nf) \cdot 1,55} \times \left( e^{0,0043H_k} - e^{-\frac{2nf}{M_0} H_k} \right), \quad (20)$$

Аналогично, путем ввода коэффициентов  $b$  и  $\lambda$  в выражении (18), получаем уравнение для расчета  $\sigma_z^p$  при  $\alpha = 90^\circ$ . Величину  $\sigma_x^p$  можно определить из формулы:

$$\sigma_x^p = m\sigma_z^p. \quad (21)$$

В результате выполнения исследований установлено:

- в условиях объемного сжатия снижается усадка закладочного массива, повышаются значения модуля деформации и коэффициента бокового распора, обеспечивая в целом повышение его несущей способности в 1,9-2,1 раза;

- давление закладочного массива из сыпучей породной закладки на бока и основание выработанного пространства рассчитывают по методике, разработанной с учетом уплотнения материала закладки с увеличением конструктивных параметров камеры в условиях объемно-напряженного состояния;

- повышение несущих свойств закладки в условиях объемного сжатия позволяют оценивать потенциальную способность породной закладки как средства поддержания при отработке определенных зон прикарьерного массива.

### Коротко об авторах

*Исмаилов Тахир Турсунович* – доцент, кандидат технических наук, Московский государственный горный университет,

*Габараев Олег Знаурович* – профессор, доктор технических наук,

*Ногаев Алан-Бек Хаджи-Муратович* – аспирант,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ).

