© Н.П. Немчин, В.М. Лизункин, В.А. Козлов, А.А. Парыгин, 2006

УДК 622.248.381:539.4

Н.П. Немчин, В.М. Лизункин, В.А. Козлов, А.А. Парыгин

ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ В ОДИНОЧНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ С УЧЕТОМ РАЗРЫХЛЕНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И СОБСТВЕННОГО ВЕСА ПОРОД В ЗАПРЕДЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Предполагается, что при большом давлении в нетронутом массиве вокруг выработки возможно возникновение следующих зон деформирования: 1) внешняя упругая зона; 2) зона с постепенным снижением прочности и увеличением объема вследствие разрыхления; 3) зона предельно разрушенной породы с увеличивающимся разрыхлением; 4) зона предельно разрыхленной породы (рис. 1).

Математическому описанию этих зон посвящено много исследований, из которых отметим [1, 2, 3, 4]. Настоящая статья является развитием работы [1]. Используются некоторые элементы описания разрыхления и разрушения, приведенные в [2, 3, 5]. Обращено особое внимание на расчет границ между отмеченными зонами. Затруднение с определением границ между различными зонами деформирования отмечались в статье [4]. Там же был осуществлен учет собственного веса пород. Расчет горного давления в [4] доведен до рекомендаций в отношении конкретной крепи, но при этом подробный анализ различных зон деформирования заменен приближенным описанием неупругой области.

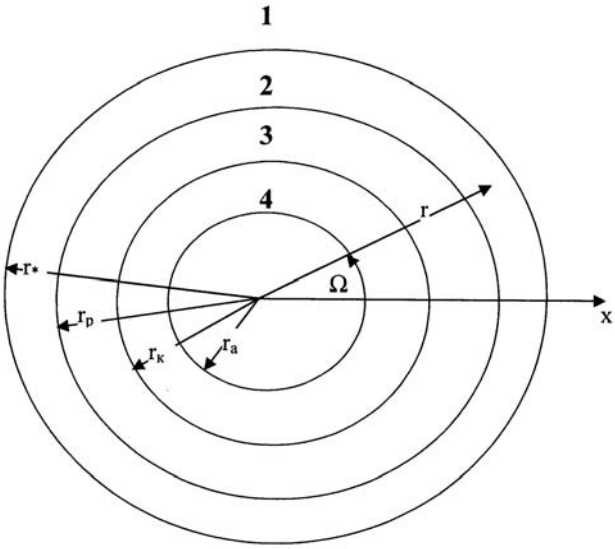

Схема зон вблизи выработки: *1* - упругая зона; *2* - постепенное снижение прочности; *3* - предельно разрушенная зона; *4* - предельно разрыхленная зона

Процесс деформирования в упругой зоне будем считать осесимметричным. Сжимающие напряжения и деформации приняты отрицательными. На границе упругой зоны и запредельной области справедливы следующие формулы, определяющие значения радиального перемещения U и напряжения σ_r:

$$U_* = -\frac{\tau_m^*}{2G} r_*,$$

(1)

$$\sigma_r^* = -q(1-\alpha) + \sigma_{сж}\frac{1-\alpha}{2}. \qquad (2)$$

В этих формулах: q – давление в нетронутом массиве на глубине заложения выработки; $\alpha = \sin\varphi$ - где φ – угол внутреннего трения; переход к запредельной зоне описывается условием прочности Мора-Кулона

$$\tau_m^* = \alpha q + \sigma_{сж}\frac{1-\alpha}{2}. \qquad (3)$$

Во второй зоне определяющими уравнениями являются:

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \gamma\sin\Omega = 0, \qquad (4)$$

$$\sigma_\theta = \beta\sigma_r - \sigma_{сж} + T\theta, \qquad (5)$$

$$d\theta = \alpha d\gamma_m. \qquad (6)$$

В этих формулах Ω – угол отсчитываемый от горизонтальной оси; γ – удельный вес породы вблизи выработки; $\beta = \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$; $\sigma_{сж} - T\theta$ - остаточная прочность; снижение прочности пропорционально относительному объемному расширению вследствие разрыхления $\theta = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta$ ($\varepsilon_z = 0$, а упругими изменениями объема пренебрегаем); $\gamma_m = \varepsilon_r - \varepsilon_\theta$; дилатансионное соотношение (6) следует из закона пластического течения, ассоциированного с условием прочности (5).

Несмотря на учет собственного веса пород в уравнении (4) процесс деформирования в запредельной зоне считаем близким к осесимметричному, что находит свое выражение в пренебрежении слагаемым с касательными напряжениями $\tau_{r\theta}$. После интегрирования условия (6):

$$\theta = \alpha\left(\gamma_m - \frac{\tau_m^*}{G}\right). \qquad (7)$$

Здесь $\frac{\tau_m^*}{G}$ имеет смысл упругой деформации γ_m^* в момент прохождения радиуса r_* через рассматриваемую точку. Из уравнения (3) видно, что эта величина не зависит от радиуса.

Решение системы (4), (5), (7) получено в виде:

$$U = U_*\left(\frac{r_*}{r}\right)^\beta + \frac{\alpha\tau_m^*}{2G}r_*\left[\left(\frac{r_*}{r}\right)^\beta - \frac{r}{r_*}\right]; \qquad (8)$$

$$\theta = -\frac{U_*(\beta-1)}{r}\left(\frac{r_*}{r}\right)^\beta - \frac{\alpha\tau_m^*}{2G}\left[\left(\frac{r_*}{r}\right)^{\beta+1}(\beta-1)+2\right] \qquad (9)$$

$$\sigma_r = \sigma_r^*\left(\frac{r}{r_*}\right)^{\beta-1} - \frac{\gamma\cdot r}{2-\beta}\sin\Omega\left[\left(\frac{r_*}{r}\right)^{2-\beta} - 1\right] +$$
$$+\frac{\sigma_{сж}}{\beta-1}\left[1-\left(\frac{r}{r_*}\right)^{\beta-1}\right] + T\frac{(\beta-1)}{2\beta}\frac{1}{r}\left[U_* + \frac{\alpha\tau_m^*}{2G}r_*\right]\times$$
$$\times\left[\left(\frac{r_*}{r}\right)^\beta - \left(\frac{r}{r_*}\right)^\beta\right] + \frac{\alpha T\tau_m^*}{(\beta-1)G}\left[1-\left(\frac{r}{r_*}\right)^{\beta-1}\right] \qquad (10)$$

В третьей зоне остаточная прочность в формуле (5)

$$\sigma_{сж} - T\theta = 0. \qquad (11)$$

Формулы (8) и (9) остаются в силе. Формула (10) переходит в

$$\sigma_r = \sigma_r^p\left(\frac{r}{r_p}\right)^{\beta-1} - \frac{\gamma\cdot r}{2-\beta}\sin\Omega\left[\left(\frac{r_p}{r}\right)^{2-\beta} - 1\right] \qquad (12)$$

Здесь σ_r^p - радиальное напряжение на границе между второй и третьей зонами. Радиус $r = r_p$, определяющий вторую зону от третьей, находится подбором из формулы (11) при заданном r_*. Радиус $r = r_k$, разделяющий третью и четвертую зоны находится подбором при заданных r_* и найденном r_p из условия

$$\theta = \theta_{пр}, \qquad (13)$$

Результаты расчетов для рассматриваемого примера

1. r_* / r_a	2,0	2,25	2,75	3,00	3,25
2. r_p / r_a	1,769	1,990	2,432	2,653	2,874
3. $r_к / r_a$	-	-	1,162	1,267	1,373
4. Объёмное расширение θ_a	0,0506	0,0927	0,12	0,12	0,12
5. Перемещение контура u_a, см	4,32	7,64	18,3	24,5	31,2
6. Давление в кровле $P_{кр}$, кПа	247	181	111	91,9	78,2
7. Давление в боках $P_б$, кПа	225	158	86,1	66,2	52,0
8. Давление в почве $P_п$, кПа	204	135	61,0	40,5	25,8

где $\theta_{пр}$ - предельное значение относительного объемного расширения в условиях объемно сжатого массива. Это же условие должно заменить в определяющих уравнениях для четвертой зоны дилатансионное соотношение (7).

Тогда решением для четвертой зоны является

$$U = \frac{C}{r} + \frac{\theta_{пр}}{2} r, \qquad (14)$$

где $C = r_k U_k - \frac{\theta_{пр}}{2} r_k^2$, (15)

а также формулы (12) и (13).

Пример расчета

Пусть $r_a = 2,39$ м; $q = 19,6$ МПа. Характеристики породы в массиве:

$\sigma_{сж} = 21,6$ МПа; $\varphi = 37^0$;

$G = 6,037 \cdot 10^3$ МПа;

$\mu = 0,28$; $\theta_{пр} = 0,12$;

$T = 1,578 \cdot 10^4$ МПа;

$\gamma = 2,44 \cdot 10^{-5}$ Н/мм^3. Ориентировочно, эти условия соответствуют конгломератам на глубине 800 м с лабораторными характеристиками: $\sigma_{сж} = 72$ МПа; модуль Юнга $E = 3,17 \cdot 10^4$ МПа. Оценка значения T в условии прочности (5) была проведена следующим образом.

Для одноосного сжатия дилатансионное соотношение с использованием принципа нормальности [5] установлено в виде

$$d\theta = -(\beta - 1)\, d\varepsilon,$$

где ε – продольная деформация. После интегрирования с пренебрежением упругой сжимаемостью

$$\theta = -(\beta - 1)\left(\varepsilon + \frac{\sigma_{сж}}{E}\right).$$

Уравнение (5) для одноосного сжатия

$$\sigma = -\sigma_{сж} - T\theta$$

После подстановки в него θ можно получить

$$L = \left|\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right| = (\beta - 1)T,$$

откуда

$$T = \frac{L}{\beta - 1}. \qquad (16)$$

Для пластичных материалов $\beta = 1$ и коэффициент хрупкости $L = 0$. Конечное выражение для T тогда получается, если искать зависимость между коэффициентом хрупкости L и модулем Юнга E в виде

$$L = k\alpha E. \qquad (17)$$

На основании экспериментов [5], коэффициент

$$k = 2,5 \pm 1 \qquad (18)$$

для пород с пределом прочности $\sigma_{сж} > 70$ МПа. В приведенном далее примере было взято $k = 2{,}5$.

Для расчетов по предложенному методу создана программа Ves2, в которой значения r_p и r_k при заданных r_* подбираются в диалоговом режиме. Результаты расчетов сведены в таблице.

Анализ этой таблицы позволяет вырабатывать рекомендации по креплению выработок. Следует однако, более точно подходить к определению коэффициента хрупкости L, так как результаты расчетов сильно зависят от конкретного значения коэффициента k в указанном диапазоне изменения формулы (18).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Немчин Н.П.* Горное давление в массиве, ослабленном одиночной горизонтальной выработкой, в случае образования вокруг нее разрыхленной зоны. Автореферат кандидатской диссертации. - Днепропетровск: ДГИ, 1972. – 30 с.
2. *Баклашов И.В.* Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Изд. МГГУ, 2004. – Т. 1. Основы геомеханики. – 208 с.
3. *Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н.* Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Изд. МГГУ, 2004. – Т. 2. Геомеханические процессы. – 249 с.
4. *Клыков А.Е.* Сопротивление и податливость крепи выработок при дилатансии горных пород // Изв. ВУЗов. Горный ж-л, 2003. № 6. – С. 87-91.
5. *Прочность* и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.В. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

Коротко об авторах

Немчин Н.П. – кандидат технических наук, доцент,
Лизункин В.М. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой,
Козлов В.А. – инженер,
Парыгин А.А. – инженер,

Читинский государственный университет.