

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.833.5

В.М. Волков, А.Е. Клыков

ВЛИЯНИЕ ДИЛАТАНСИИ ПОРОД НА СМЕЩЕНИЯ В ВЫРАБОТКЕ

Вокруг выработки радиуса R в гидростатическом поле с составляющей нетронутого массива q при прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{cж} < 2q$ формируется зона неупругих деформаций (ЗНД) радиусом R_p , точки которой на границе с упругой зоной находятся в предельном состоянии. В этом состоянии связь между главными напряжениями для прямолинейной огибающей предельных кругов Мора имеет вид:

$$\sigma_r = c\sigma_\theta + \sigma_{cж}, \quad (1)$$

где $\sigma_{cж}$ - прочность на одноосное сжатие пород, а $c = (1 + \sin\rho)/(1 - \sin\rho)$.

В упругой зоне напряжения связаны зависимостью $\sigma_r + \sigma_\theta = 2$, которая представлена прямой 3 на рис.1. На большом удалении от контура выработки напряжения равны q , что соответствует точке A. Уравнение (1) предельного состояния описывается прямой 1, точка пересечения которой с прямой 3 соответствует границе ЗНД с упругой зоной. Эта граница формирует вокруг выработки поверхность радиусом R_p . Внутри нее с уменьшением координаты r от радиуса R_p , т.е. с приближением к контуру выработки, напряжения уменьшаются. Если на диаграммах объемного сжатия осадочных пород при предельном состоянии есть горизонтальный участок, то вблизи границы ЗНД будет наблюдаться зона предельных напряжений, соответствующая участку MK на прямой 1. С этой зоной соседствует зона, напряжения в которой соответствуют участкам спада на диаграммах. Эти напряжения меньше предельных и для них точки располагаются на некотором участке KL ниже прямой 1. В непосредственной близости от контура выработки породы находятся в запредельном состоянии, и если выработка не закреплена, то на контуре напряжение равно остаточной прочности σ_o при одноосном сжатии. Этому напряжению соответствует точка N на рис.1, а участок NL запредельного состояния описывает зависимость остаточной прочности пород в приконтурной зоне выработки от минимального напряжения. До настоящего времени вид этой зависимости не установлен, однако эксперименты показывают [1] возрастание максимального напряжения от минимального и во всех известных решениях задачи о смещениях в выработке с учетом дилатансии угол

внутреннего трения пород на стадии остаточной прочности принимается равным ρ для предельного состояния. В этом случае участок NL параллелен прямой 1.

Если при решении задач о напряженном состоянии окрестности выработки принимать во внимание участки NL , LK и KM , то это сопряжено с определенными трудностями, заключающимися в необходимости определения положения точек K и L. Задача значительно упрощается при замене этих участков отрезком MN прямой. Это упрощение представляется приемлемым для практических задач. Кроме того, оно позволяет рассмотреть многие аспекты, неразрешимые в том случае, если учитывать полные диаграммы объемного сжатия, аппроксимируя их каким-либо образом.

Тогда связь между главными напряжениями для ЗНД примет вид:

$$\Phi_2 = k\Phi_r + \Phi_o. \quad (2)$$

Точка M не является фиксированной, поскольку представляет собой пересечение прямой 1, характеризующей прочность пород, и прямой 3, положение которой зависит от напряжений нетронутого массива. С ростом составляющей q при одинаковых свойствах пород точка M вместе с прямой 3 перемещается вверх и наклон прямой MN уменьшается, в связи с чем уменьшится и величина коэффициента k .

Таким образом, коэффициент k в (2) яв-

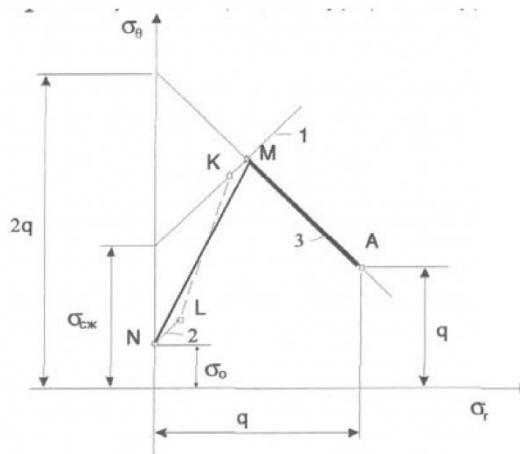


Рис.1. Графическое представление напряженного состояния пород за контуром выработки

ляется параметром, характеризующим состояние массива в окрестности выработки.

Решение задачи с физическим уравнением (2) для ЗНД при осесимметричном распределении напряжений вокруг выработки радиусом $R = 1$ с реакцией крепи p приводит к следующим результатам [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{[(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} - \sigma_0}{k-1}; \\ \sigma_\theta &= \frac{k[(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} - \sigma_0}{k-1}; \\ R_p &= \left[\frac{(2q-\sigma_0)(k-1)/(k+1) + \sigma_0}{(k-1)p + \sigma_0} \right]^{1/(k-1)} \quad (3) \\ k &= [2qc + \sigma_{c\infty} - \sigma_0(c+1)] / (2q - \sigma_{c\infty}); \\ \sigma_r(R_p) &= (2q - \sigma_{c\infty})/(c+1).\end{aligned}$$

Смещение пород внутрь выработки обусловлено перемещением границы упругой зоны и дилатансией пород в ЗНД. Радиус ЗНД и напряжение на её границе можно определить по формулам (3), а затем найти упругую составляющую смещения контура выработки [2]:

$$u_y/R = \frac{q}{E} [2(1-\mu^2) - (1+\mu)\sigma_r(R_p)/q] \frac{R_p^2}{R^2}, \quad (4)$$

где E и μ - соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона породы в окрестности выработки.

С переходом в предельное и запредельное состояние происходит увеличение объема пород в ЗНД, дилатансия, что приводит к дополнительным смещениям контура выработки.

На основании экспериментальных данных [1] с учетом граничных условий можно принять относительную объемную деформацию ε_v в ЗНД связанной с минимальным напряжением зависимостью:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^0 \frac{\sigma_r(R_p) - \sigma_r}{\sigma_r(R_p) + \sigma_r}, \quad (5)$$

где ε_v^0 – объемная деформация в запредельном состоянии при одноосном сжатии.

Увеличение объема ЗНД связано со смещением u_∂ контура выработки, которое определяется интегрированием:

$$\begin{aligned}u_\partial &= \\ &= \varepsilon_v^0 \int_{(k-1)\sigma_r(R_p)}^{R_p} \frac{[(k-1)\sigma_r(R_p) - [(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} + \sigma_0]}{[(k-1)\sigma_r(R_p) + [(k-1)p + \sigma_0]r^{k-1} - \sigma_0]} r dr.\end{aligned} \quad (6)$$

Для вычисления этого интеграла можно, например, применить квадратурку Симпсона.

Расчеты показали, что дилатансионная составляющая смещения (6) на порядок больше упругой, рассчитываемой по формуле (4).

Полученные формулы реально отражают влияние прочностных свойств горных пород, начальных напряжений в массиве и сопротивления крепи на смещения в выработке. Уменьшение прочности на сжатие на 40% приводит к росту смещений в 3 раза, а увеличение составляющей массива на 33% - в 3 – 4 раза. Увеличение сопротивления крепи значительно снижает смещения при низких значениях остаточной прочности и сопротивления крепи и становится неэффективным при отношении этого сопротивления к составляющей массива $p/q > 0,006$.

Полученные формулы позволяют определить смещения в выработке при наличии в ней начального свободного закрепленного пространства и проанализировать его влияние.

Примем размер закрепленного пространства на момент установки крепи равным Δ и выраженным в долях от радиуса R_n выработки в проходке. По мере проведения выработки и последующего развития горных работ давление q в окрестности выработки возрастает, растут и смещения пород. При этом до появления контакта между крепью и окружающими породами отпора со стороны крепи нет и на этой стадии $p = 0$. Данные натурных наблюдений [3] показывают, что в условиях развившихся деформаций породы на контуре выработки находятся в руинном состоянии. Примем на этой стадии развития смещений остаточную прочность при одноосном сжатии $\sigma_o = 0$.

В момент возникновения контакта между крепью и боковыми породами перемещение пород внутрь выработки $u_\partial = \Delta$ и это соответствует определенному радиусу R'_p ЗНД. Принимая $p = 0$ и $\sigma_o = 0$, из формулы (6) получим:

$$R'_p / R_n = \sqrt{1 + 2\Delta / R_n \varepsilon_v^0}. \quad (7)$$

При отсутствии отпора со стороны крепи и остаточной прочности $\sigma_o = 0$ напряжения σ_r и σ_θ в зоне запредельного состояния согласно формулам (3) равны нулю, поэтому породы внутри этой зоны до появления контакта с крепью находятся в ненапряженном состоянии. Поскольку при этом предполагается, что остаточная прочность $\sigma_o = 0$, то тогда и коэффициент сцепления здесь $k_o = 0$. Это характерно для сыпучей среды и, рассматривая действие крепи на неё, можно воспользоваться уравнениями статики сыпучей среды, принимая σ_r активной, а σ_θ пассивной составляющими.

После ликвидации зазора Δ в работу вступает крепь и по контуру радиусом R оказывает давление p , равное её сопротивлению, на окружающие породы. В результате этого на границе предварительно сформировавшейся запредельной зоны возникает давление p' , которое при постоянном отпоре p сохраняется с ростом смещений: $p' = p / (R_p / R)^{(c-1)/c}$.

После перекрытия закрепного пространства деформирующими породами с дальнейшим ростом давления q зона запредельного состояния увеличивается и её радиус в зависимости от давления p' из формулы (3) $R_p = R_p' [2q/p'(k + 1)]^{1/(k - 1)}$.

Перемещение u_∂' границы радиусом R_p' , возникающее при действии отпора p со стороны крепи, записывается из формулы (5):

$$u_\partial = \varepsilon_v^0 R_p' \int_{(k-1)\sigma_r(R_p)}^{R_p'} \frac{(k-1)\sigma_r(R_p) - (k-1)p'r^{k-1}}{(k-1)\sigma_r(R_p) + (k-1)p'r^{k-1}} r dr, \quad (8)$$

где линейные размеры под интегралом выражаются в долях от R_p' .

Это приводит к дополнительному перемещению пород внутрь выработки с момента их контакта с крепью, которое равно её смещению: $u_\partial = u_\partial' R_p' / R_p$.

Результаты расчета смещений крепи со свободным закрепленным пространством согласуются с практическими данными: оставление свободного закрепленного пространства размером 5-10 см приводит к росту деформаций крепи в 2-3 раза, а увеличение пространства до 20-25 см - в 4-5 раз.

Полученные формулы можно применить для расчета смещений в выработке с забуренным закрепленным пространством, которое при заполнении размельченной породой может рассматриваться как сыпучая среда с углом внутреннего трения ρ . Можно также оценить эффективность взрывной забутовки закрепленного пространства.

Согласно этим расчетам эффект воздействия забутовки закрепленного пространства является существенным: смещения при тщательно выполненнном забуривании снижаются более чем в три раза. Качество забутовки значительно влияет на смещения. Обеспечение её плотности на 80% приводит к росту смещений в 1,5-2 раза в сравнении с плотной забутовкой.

Взрывное забуривание закрепленного пространства приводит к снижению смещений примерно в 1,4 – 1,5 раза.

Результаты расчета смещений в окрестности выработок с учетом дилатансии пород по приведенным выше формулам соответствуют реальным величинам, однако не отражают некоторые особенности проявления горного давления. Так, при одинаковых свойствах окружающих пород смещения кровли, почвы и боков горизонтальной выработки, закрепленной кольцевой крепью с одинаковым закрепленным пространством, по расчетам одинаковы. В действительности смещение кровли превышают смещения боков и почвы. Кроме того, при отсутствии отпора со стороны крепи и остаточной прочности пород, равной нулю, смещения в выработке по расчету стремятся к бесконечности. Однако в реальных условиях смещение незакрепленной почвы,

состояние которой может быть близким к руинному, имеет конечную величину. Такое расхождение объясняется тем, что в расчетах не учитывается сила тяжести пород, находящихся в ЗНД.

На элементарный объем вертикальной оси симметрии выработки действуют главные напряжения σ_r и σ_θ и объемный вес γ . Решая уравнение равновесия с учетом этих составляющих, аналогично (3) для кровли получим:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\sigma_\theta/(k-1) + [\sigma_\theta/(k-1) + p]r^{(k-1)} + \gamma R[r - \\ &\quad r^{(k-1)}]/(k-2); \\ R_p^{(k-1)}[\sigma_\theta/(k-1) &+ p - \gamma R/(k-2)] + R_p \gamma R/(k-2) \\ &- [2q(k-1) + 2\sigma_\theta]/(k^2 - 1) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Определение R_p из последнего уравнения осуществляется приближенным способом.

В качестве примера были произведены расчеты для следующих условий.

Выработка пройдена на глубине $H = 1000$ м сечением в проходке $S = 13,85 \text{ м}^2$, закреплена замкнутой крепью с сопротивлением $p = 50$ кПа = 0,05 МПа. Характеристики пород: $\sigma_{cyc} = 30$ МПа; $\rho = 30^\circ$; $\sigma_0 = 0$; $\varepsilon_v^0 = 0,1$; $\gamma = 25$ кН/м³.

Давление пород в нетронутом массиве на глубине расположения выработки: $q = \gamma H = 25$ МПа. Радиус равновеликой выработки кругового очертания: $R = \sqrt{S/\pi} = 2,1$ м. Тогда $\gamma R = 0,0525$ МПа. Параметры, имеющие размерность давления, в долях от составляющей q : $p = 0,002$; $\sigma_{cyc} = 1,2$; $\gamma R = 0,0021$. Характеристики состояния массива: $k = 9$; $\sigma_r(R_p) = 0,2$.

Согласно расчетам смещения контура выработки составляют: в кровле – 0,147, в почве - 0,132, в боку - 0,139 м. Сближение кровли и почвы равно 0,279, а боков - 0,278 м.

Таким образом, смещения кровли, почвы и боков выработки, закрепленной замкнутой крепью, установленной вплотную к окружающим породам, различаются незначительно.

Аналогичные расчеты были произведены для тех же условий при наличии свободного закрепленного пространства $A = 10$ см. Смещение кровли увеличивается до 0,61 м, т.е. более чем в 4 раза, а боков – до 0,342 м, т.е. почти в 2,5 раза, и если в случае крепления без зазоров разница в смещениях кровли и боков несущественна, то при зазоре 10 см смещение кровли почти в два раза превышает смещение боков.

Расчет напряжений и размера ЗНД почвы выработки с учетом силы тяжести пород производится по формулам (9) с противоположным знаком перед γ . Эти формулы позволяют рассчитать смещение незакрепленной почвы. При этом оно имеет конечную величину и в том случае, когда остаточная прочность пород при одноосном сжатии равна нулю.

Согласно этим расчетам наиболее заметное влияние на подъем почвы в выработке оказы-

вает угол внутреннего трения. Уменьшение его от 30 до 20° сопряжено с увеличением смещения почвы более чем в два раза.

«Пучащие» породы зачастую требуют дополнительных мероприятий по уменьшению смещений почвы, например, анкерования. При расчете параметров анкерования задаются длиной анкеров. Поскольку концы анкеров необходимо располагать в упругой зоне, то радиус R_p ЗНД оказывается определенным и из формулы (9) находят сопротивление крепи p , соответствующее этому радиусу, после чего находят плотность установки анкеров.

Расчеты показали, что применение анкеров для укрепления почвы может снизить пучение более чем в 5 раз. Плотность установки анкеров может быть уменьшена с увеличением их длины, однако при этом необходимо учитывать неизбежность возрастания смещений. При больших значениях допускаемого смещения почвы применение анкеров становится нерациональным вследствие требуемой большой их длины, которая на практике не превышает 2 м. В этом случае возможно применение замкнутой крепи, обладающей большой вертикальной податливостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра, 1992.
2. Волков В.М., Клыков А.Е., Широколобов Г.В. Влияние прочностных свойств горных пород на устойчивость выработок. – В сб. «Научно-технические проблемы подземной разработки месторождений». – Кемерово: КузПИ, 1991.
3. Заславский Ю.З., Дружко Е.Б. Новые виды крепи горных выработок. – М.: Недра, 1989.

□ Авторы статьи:

Волков

Владимир Матвеевич
– канд. физ.-мат. наук, доц. каф.
прикладной математики

Клыков

Александр Ефимович
– канд. техн. наук, доц. каф. сопро-
тивления материалов

.

.