подвешивание мешков огнетушащего порошка. Эффект от применения пожаротушащего порошка достигался путем создания инерционной порошковой завесы принудительным распылением порошка в контейнерах зарядом ВВ одновременно с нулевой серией замедления. При этом максимально эффективное использование порошка наблюдалось в том случае, если контейнеры с ним равномерно разместить в подвешенном состоянии по всему контуру забоя;

– недопущение в зонах повышенной пористости вмещающих пород отставания укладки бетона в затюбинговое пространство ствола на величину более 2 тюбинговых колец с целью снижения газо- и нефтевыделения из породных стенок ствола;

– снятие напряжения подземной группы потребителей после выезда смены и мастера-взрывника из ствола.

Строгое соблюдение всех вышеперечисленных мероприятий позволило ОАО «Ростовшахтострой» пройти оставшуюся часть вентиляционно-вспомогательного ствола до проектной отметки без повторения подобных аварий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Материалы по расследованию аварии, происшедшей 22 ноября 2007 года в вентиляционно-вспомогательном стволе рудника «Удачный» АК «Алроса» – г. Удачный, 2007.

УДК 622.002.2

Андреев Б.Н., д.т.н., проф., зав. каф. СГТ КТУ, г. Кривой Рог, Украина
Сахно А.О., магистрант НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Для оценки устойчивости массива вокруг выработок, проводимых в сланцевых породах вдоль их простирания, необходимо учитывать анизотропные свойства среды, что целесообразно сделать с использованием трансверсально-изотропной модели. Свойства породного массива при этом описываются следующими параметрами: E_1, ν_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона в плоскости слоев; E_2, ν_2 – модуль упругости и коэффициент Пуассона в перпендикулярном плоскости слоев направлении.

Уравнения, которые выражают обобщенный закон Гука для однородного анизотропного тела, отнесенные к осям главных напряжений y_1 и y_3, имеют вид

$$\sigma_1 = B_{13}^{\Gamma}\sigma_3 + B_{11}^{\Gamma}\varepsilon_1, \quad \sigma_3 = B_{31}^{\Gamma}\sigma_3 + B_{33}^{\Gamma}\varepsilon_1,$$

где ε_1, ε_3 – деформации по направлениям главных осей напряжений σ_1 и σ_3

$$B_{13}^{\Gamma} = \frac{E_{13}}{E_{33}}; \quad B_{11}^{\Gamma} = E_{11} - \frac{E_{13}^2}{E_{33}}; \quad B_{31}^{\Gamma} = \frac{E_{13}}{E_{11}}; \quad B_{13}^{\Gamma} = E_{33} - \frac{E_{13}^2}{E_{11}};$$

где E_{ij} – модули упругости в главных координатных осях.

Определить напряженно-деформированное состояние породных массивов вблизи подземных сооружений, которые часто имеют сложную геометрическую форму аналитическими методами достаточно сложно и не всегда оправданно. Потому наиболее распространенным и универсальным является метод конечных элементов. Его использование позволяет получать не только упругие напряжения и деформации моделируемой среды, но и учитывать нелинейность деформаций. При этом вычисления выполняют, используя метод начальных напряжений (метод деформационной теории пластичности) [1].

Для решения нелинейных задач методом начальных напряжений следует определить процедуру нахождения теоретических напряжений, которые адекватно отвечали бы вектору деформаций, полученному при вычислениях на i-ом шаге итераций при действии вектора сил системы $\{R\}_{i-1}$.

В основу исследования разупрочняющихся пород с использованием |трансверсально-изотропной модели заложен ряд допущений. Так, полная диаграмма деформации разупрочняющегося массива представляется как кусочно-линейная аппроксимация в виде трехзвенного графика [2] со следующими характеристическими показателями: E_1, E_2 – модули упругости соответственно в плоскости слоев и в перпендикулярном плоскости слоев направления; ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона в соответствующих направлениях; M, β – аналоги модуля спада и коэффициента поперечных деформаций в запредельной зоне для условий плоской деформации; $S_{\text{зал}}$ – остаточная прочность пород в зоне руинного разрушения. Модуль спада M в состоянии разупрочнения принимается постоянным независимо от роста бокового давления, что отвечает хрупко разрушающимся породам. Коэффициент поперечных деформаций в зоне руинного разрушения, где объемная деформация практически равняется нулю, в условиях плоско-деформированного состояния принимается равным единице независимо от типа пород. Модуль спада M и коэффициент поперечных деформаций β трансверсально-изотропной среды в состоянии разупрочнения считается постоянными во всех направлениях.

Наличие поверхностей ослабления анизотропных массивов превращает его в анизотропный по свойствам его прочности. Прочность массива зависит от значения угла, который составляет направление действия максимальных

|напряжений в массиве σ_1 с плоскостью структурного ослабления. Анизотропию свойств прочности массива можно учесть, рассматривая разрушение массива по двум направлениям – в направлении, совпадающем с плоскостью контакта слоев, которые являют собой поверхность ослабления прочности, а также во всех других направлениях, не совпадающих с плоскостью контакта слоев.

Результаты определения границы сопротивления анизотропного по свойствам прочности массива напряжениям, растягивающим его в направлении y_3, приведены в [3]. Выражение предельного сопротивления в области сжимающих напряжений анизотропного по прочности массива по направлению σ_1 определяется условием Кулона

$$\sigma_1 = \min\begin{cases} S + \mathrm{ctg}\psi \cdot \sigma_3; \\ S_{\text{п}} + \mathrm{ctg}\psi_{\text{п}} \cdot \sigma_3, \end{cases}$$

где $S = 2C\ \mathrm{ctg}\left(45^\circ - \dfrac{\varphi}{2}\right)$ – граница прочности при одноосном сжатии; C,– сцепление и угол внутреннего трения массива; $\mathrm{ctg}\psi = \dfrac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$; $S_{\text{п}}$ и $\psi_{\text{п}}$ – приведенные к осям главных напряжений прочность пород при одноосном сжатии и угол ψ для условий сдвига по контактам.

Разрушение породного массива в результате сдвиг по контактам будет происходить в случае, когда касательные напряжения на контактах породных слоев превысят предельные допустимые значения. Ограничиваясь значениями $0° \le \alpha' < 90°$ и $-90° < \alpha' \le 0°$, такое состояние массива будет иметь место при $0^\circ < |\alpha'| < 90^\circ - \varphi_{\text{т}}$. Когда же $90^\circ - \varphi_{\text{т}} < |\alpha'| < 90^\circ$, величины $S_{\text{п}}$ и $\mathrm{ctg}\psi_{\text{п}}$ принимают отрицательные значения, что не имеет физического смысла, поскольку при этом $\sigma_1 < \sigma_3$. То есть, при $90^\circ - \varphi_{\text{т}} < |\alpha'| < 90^\circ$ разрушение массива может происходить только по площадкам, не совпадающим с контактами наслоений.

Границы прочности пород, выраженные через главные деформации для трансверсально-изотропной среды в области растяжения имеют вид

$$f_2(\varepsilon_1, \varepsilon_3) = (-T - A_{13}\varepsilon_1)/E_{33} - \varepsilon_3.$$

В области сжатия (критерий Кулона) границы прочности пород

$$f_1(\varepsilon_1, \varepsilon_3) = [(B_{11}\varepsilon_1 - S)(1 - \mathrm{ctg}\psi B_{31})/(\mathrm{ctg}\varphi - B_{13}) - SB_{31}]/B_{33} - \varepsilon_3.$$

При переходе среды в состояние руинного разрушения, полные деформации в области разупрочнения пород от предельных упругих деформаций вплоть до руинного разрушения находятся по закону текучести пород в зоне разупрочнения

$$\varepsilon_1^{\text{розм.}} = \frac{S - S_{\text{зал}}}{M} + \sigma_3 \frac{(\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}})}{M}; \qquad \varepsilon_3^{\text{розм.}} = -\beta\varepsilon_1^{\text{розм.}}.$$

Граница перехода среды из зоны разупрочнений в зону руинного разрушения описывается прямой, уравнение которой имеет вид

$$\varepsilon_3 = б\varepsilon_1 + b,$$

где $a = \frac{B_{11}}{B_{33}} \cdot \frac{M(1 - B_{31}\text{ctg}\psi) - \beta B_{33}(\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}})}{M(\text{ctg}\psi - B_{13}) + B_{11}(\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}})}$;

$$b = \frac{a}{M} \cdot \left[S\left(\frac{\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}}}{\text{ctg}\psi - B_{13}} - 1 \right) + S_{\text{зал}} \right] - \frac{\beta}{M}\left[S\left(B_{31}\frac{\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}}}{1 - B_{31}\text{ctgш}} + 1 \right) - S_{\text{зал}} \right] -$$
$$- \frac{S}{MB_{33}} \cdot \frac{M(1 - B_{31}\text{ctg}\psi) - \beta B_{33}(\text{ctg}\psi - \text{ctg}\psi_{\text{зал}})}{1 - B_{31}\text{ctg}\psi}\left(\frac{1 - B_{31}\text{ctg}\psi}{\text{ctg}\psi - B_{13}} + B_{31} \right).$$

Предельные значения полных деформаций для минимальных напряжений, при которых разрушенная до руинного состояния среда из объемного напряженного состояния перейдет в состояние одноосного сжатия, когда среда разрывается в направлении е3 определяются из условия

$$[\varepsilon_1^{\text{зал}}]_{\min} = \frac{S}{B_{11}} + \frac{S - S_{\text{зал}}}{M}; \qquad [\varepsilon_3^{\text{зал}}]_{\min} = \frac{SB_{31}}{B_{33}} - \beta\frac{S - S_{\text{зал}}}{M},$$

где $S_{зал}$ – остаточная прочность пород в состоянии руинного разрушения при одноосном сжатии.

В случае, когда среда разорвана в направлении ($\sigma_3^{\text{т}} = 0$), но y_1 при этом отвечает продольной деформации e_1 в условиях разупрочнения пород, вычисление составляющей теоретических напряжений $\sigma_1^{\text{т}}$ выполняется соответственно с принятым законом текучести пород

$$\varepsilon_3 - [\varepsilon_3]_{\text{о.с.}} = -\beta(\varepsilon_1 - [\varepsilon_1]_{\text{о.с.}}), \text{ где } \qquad [\varepsilon_1]_{\text{о.с.}} = S/B_{11}; \quad [\varepsilon_3]_{\text{о.с.}} = S \cdot B_{31}/B_{33}.$$

Теоретические напряжения в состоянии одноосного сжатия в зоне разупрочнения находятся из выражений:

$$\sigma_1^{\text{т}} = S - M(\varepsilon_1 - [\varepsilon_1]_{\text{о.с.}}); \qquad \sigma_3^{\text{т}} = 0.$$

Если деформации ε_1 не превышают допустимых значений $[\varepsilon_1]_{\text{о.с.}}$ при одноосновном сжатии, а суммарные деформации точки $F''(e_1,e_3)$ выходят за пределы упругости, то среда окажется разорванной в направлении e_3. Поскольку продольные деформации e_1 в этом случае меньше предельной величины, теоретические напряжения в зоне V определяются законом Гука в условиях одноосного сжатия

$$\sigma_1^{\text{т}} = B_{11}\varepsilon_1;\ \sigma_3^{\text{т}} = 0.$$

Когда же среда выходит за предельную границу растяжения в направлении e_3, а $e_1<0$, она окажется разорванной в обоих направлениях. При этом теоретические напряжения будут равны

$$\sigma_1^{\text{т}} = 0;\ \sigma_3^{\text{т}} = 0.$$

Полученные теоретические напряжения позволяют решить задачу упруго-пластичной деформации трансверсально-изотропной среды методом деформационной теории пластичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике|. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
2. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение| горных массивов|. – М.: Недра, 1989. – 271 с.
3. Андреев Б.Н., Сахно А.О. Оценка упруго-пластического деформирования анизотропной породной среды с учетом условий его разрушения // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 7 – С. 10 – 12.

УДК 622.831.3

Пронский Д.В., Кобзарь Ю.И., Должиков Ю.П., АФГТ ВНУ им. В.Даля

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УЧАСТКАХ ИНТЕНСИВНОГО ВОДОПРИТОКА

При проектировании строительства горных выработок, нагрузка на крепь определяется весом свода расслоившихся, разупрочненных и разбитых на блоки пород. Область распространения таких пород вокруг выработки получила