

УДК 622.83

*А.И. Федоренко***ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Семинар № 17

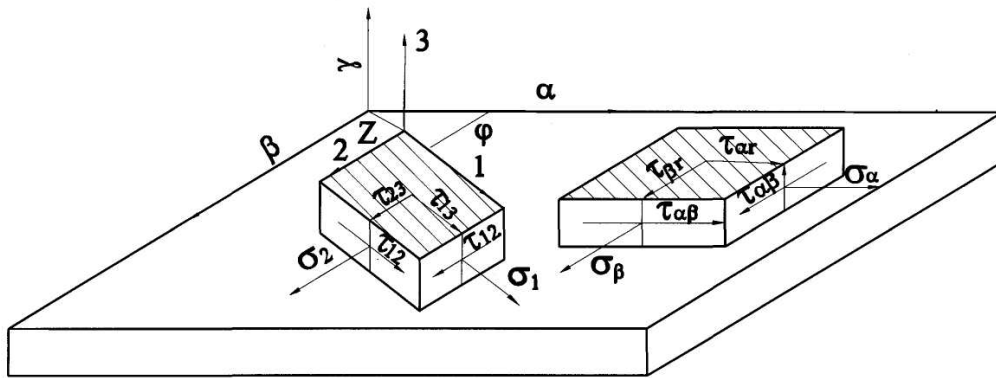
Эффективность и безопасность отработки месторождений подземным способом во многом зависит от характера и величины горного давления, а также от принятого метода управления им. Поскольку скальные горные породы по своим свойствам могут рассматриваться как упругие тела, при образовании в их массиве любой выемки происходит перераспределение напряжений вокруг нее, а следовательно, происходит изменение напряженно-деформированного состояния массива, особенно в его приконтурной части. Форма проявления горного давления может быть различной и зависит в основном от свойств горного массива, величины и характера изменения напряженного состояния. Большую роль играет исходное напряженно-деформированное состояние нетронутого массива. Зная напряженное состояние массива и его физико-механические свойства можно производить оценку проявления горного давления в удароопасных условиях в том или ином подземном сооружении.

Особенностью отработки рудных месторождений Алтае-Саянского района является наличие высоких тектонических напряжений.

В настоящее время очистные работы ведутся на глубине 600-750 м от уровня земной поверхности, подготовительные достигают 850-900 м и неуклонно понижаются. С глубиной происходит рост исходного поля напряжений горного

массива. Проходка выработок, отработка рудных блоков вызывают дополнительную концентрацию напряжений в отдельных частях массива, напряжения здесь могут в несколько раз превышать исходные значения. Их уровень сопоставим с пределами прочности горных пород на разрушение и поэтому при отработке блоков в рудном и вмещающем массивах регистрируется большое количество динамических проявлений горного давления в виде заколообразований, стреляний, толчков [1]. Глубокие рудники характеризуются значительным ухудшением горно-геологических условий и переходом горного массива в предельно-напряженное состояние. Это ведет к пересмотру положений по управлению состоянием приконтурного массива. Ведутся интенсивные исследования в вопросах крепления горных выработок путем использования самого массива горных пород в качестве крепящего материала в сочетании с анкерами, решетчатой затяжкой набрызгбетоном и т.д. Однако, до настоящего времени недостаточно изученными остаются вопросы взаимодействия горных пород, окружающих выработанное пространство с элементами крепей в удароопасных условиях, методы управления состоянием такого массива.

На наш взгляд существенную роль в управлении состоянием массива горных пород, окружающих выработку, играют горные породы, оснащенные анкерами, установленными особым образом.



Элемент однородного слоя в осях 1, 2, 3, связанных с направлением армирования и осях α, β, γ массива

Однако, теоретического обоснования расположения анкеров в массиве в литературных источниках практически не встречается. Поэтому за основу были приняты исследования, выполненные в работе [2], на основании которых композиционные материалы с однонаправленным армированием обладают высокими механическими характеристиками только при нагружении вдоль армирования. При нагружении поперек армирования и при сдвиге жесткость и особенно прочность материала оказываются весьма низкими, так как они определяются свойствами матрицы. В связи с этим однонаправленные материалы в чистом виде практически не используются в конструкциях.

Рассмотрим слой, отнесенный к координатам 1, 2, 3 связанным с направлением армирования (рисунок).

В однонаправленном материале ось 1 совместима с направлением армирования. Предположим, что элемент слоя находится в условиях плоского напряженного состояния. Поскольку оси координат 1, 2 являются осями ортотропии, закон Гука для слоя может быть записан в виде

$$l_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{12} \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad l_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1} \quad (1)$$

$$l_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}},$$

где E_1, E_2 и G_{12} – модули упругости в направлениях 1, 2 и модуль сдвига в плоскости слоя; μ_{12}, μ_{21} – коэффициенты Пуассона.

Из выражения (1) определим напряжения

$$\sigma_1 = \bar{E}_1 (l_1 + \mu_{12} l_2),$$

$$\sigma_2 = \bar{E}_2 (l_2 + \mu_{21} l_1),$$

$$(2)$$

$$\tau_{12} = G_{12} \cdot l_{12},$$

$$\text{где } \bar{E}_{12} = E_{12} / (1 - \mu_{12} \mu_{21}).$$

Здесь имеет место условие симметрии упругих постоянных

$$E_1 \mu_{12} = E_2 \mu_{21}. \quad (3)$$

Введем ортогональные координаты α, β, γ и предположим, что ось 1 армированного слоя составляет с осью α угол φ (рисунок).

Статические соотношения, связывающие напряжения в системах координат α, β и 1, 2 следующие:

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi - \tau_{12} \sin 2\varphi,$$

$$\sigma_\beta = \sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_2 \cos^2 \varphi - \tau_{12} \sin 2\varphi, \quad (4)$$

$$\tau_{\alpha\beta} = (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{12} \cos 2\varphi.$$

Геометрические соотношения, позволяющие выразить деформации в системе координат 1,2 через деформации в осях α, β , можно записать следующим образом [3]

$$\begin{aligned} l_1 &= l_\alpha \cos^2 \varphi + l_\beta \sin^2 \varphi + l_{\alpha\beta} \sin \varphi \cos \varphi, \\ l_2 &= l_\alpha \sin^2 \varphi + l_\beta \cos^2 \varphi + l_{\alpha\beta} \sin \varphi \cos \varphi, \quad (5) \\ l_{12} &= (l_\beta - l_\alpha) \sin 2\varphi + l_{\alpha\beta} \cos 2\varphi \end{aligned}$$

Получим теперь соотношения, связывающие напряжения $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \tau_{\alpha\beta}$ с деформациями $l_\alpha, l_\beta, l_{\alpha\beta}$. С этой целью подставим деформации l_1, l_2, l_{12} в закон Гука (2), а полученные в результате этой подстановки напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ в соотношения (4). После некоторых преобразований с помощью условия симметрии (3) запишем физические соотношения для слоя, армированного под углом φ к оси α :

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= A'_{11} l_1 + A'_{12} l_2 + A'_{13} l_{\alpha\beta}, \\ \sigma_\beta &= A'_{21} l_\alpha + A'_{22} l_\beta + A'_{23} l_{\alpha\beta}, \quad (6) \\ \tau_{\alpha\beta} &= A'_{31} l_\alpha + A'_{32} l_\beta + A'_{33} l_{\alpha\beta}, \end{aligned}$$

где $A'_{11} = E_1 \cos^4 \varphi + E_2 \sin^4 \varphi +$

$$+ 2(E_1 \mu_{12} + 2G_{12}) \sin^2 \varphi \cos \varphi,$$

$$A'_{12} = A'_{21} = E_1 \mu_{12} + [E_1 + E_2 - 2(E_1 \mu_{12} + 2G_{12})] \times \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi,$$

$$A'_{22} = E_1 \sin^4 \varphi + E_2 \cos^4 \varphi +$$

$$+ 2(E_1 \mu_{12} + 2G_{12}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi,$$

$$A'_{13} = A'_{31} = \sin \varphi \cos \varphi [E_1 \cos^2 \varphi - E_2 \sin^2 \varphi - (E_1 \mu_{12} + 2G_{12}) \cos 2\varphi],$$

$$A'_{23} = A'_{32} = \sin \varphi \cos \varphi [E_1 \sin^2 \varphi -$$

$$- E_2 \cos^2 \varphi + (E_1 \mu_{12} + 2G_{12}) \cos 2\varphi],$$

$$A'_{33} = (E_1 + E_2 - 2E_1 \mu_{12}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi.$$

Для получения обратных соотношений можно разрешить уравнение (6) относительно деформаций. Однако проще повторить их вывод, используя статические и геометрические соотношения, обратные (4) и (5). Разрешая (4) относительно напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ и (5) относительно $l_\alpha, l_\beta, l_{\alpha\beta}$ имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_\alpha \cos^2 \varphi + \sigma_\beta \sin^2 \varphi + \tau_{\alpha\beta} \sin 2\varphi, \\ \sigma_2 &= \sigma_\alpha \sin^2 \varphi + \sigma_\beta \cos^2 \varphi + \tau_{\alpha\beta} \sin 2\varphi, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\tau_{12} = (\sigma_\beta - \sigma_\alpha) \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{\alpha\beta} \cos 2\varphi,$$

$$l_\alpha = l_1 \cos^2 \varphi + l_2 \sin^2 \varphi - l_{12} \sin \varphi \cos \varphi,$$

$$l_\beta = l_1 \sin^2 \varphi + l_2 \cos^2 \varphi + l_{12} \sin \varphi \cos \varphi, \quad (9)$$

$$l_{\alpha\beta} = (l_1 - l_2) \sin 2\varphi + l_{12} \cos 2\varphi.$$

Равенство (8) может быть получено, если сложить первое соотношение (4) умноженное на $\cos^2 \varphi$, второе – умноженное на $\sin^2 \varphi$ и третье – умноженное на $\sin 2\varphi$. Остальные выводятся аналогичным образом. Подставляя теперь напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ (8) в Закон Гука (1), а полученные таким образом деформации l_1, l_2, l_3 – в правые части равенства (9), запишем выражения, обратные (4)

$$\begin{aligned} l_\alpha &= \frac{\sigma_\alpha}{E'_\alpha} - \mu'_{\alpha\beta} \frac{\sigma_\beta}{E'_\beta} + \eta'_{\alpha,\alpha\beta} \frac{\tau_{\alpha\beta}}{G'_{\alpha\beta}}, \\ l_\beta &= \frac{\sigma_\beta}{E'_\beta} - \mu'_{\beta\alpha} \frac{\sigma_\alpha}{E'_\alpha} + \eta'_{\beta,\alpha\beta} \frac{\tau_{\alpha\beta}}{G'_{\alpha\beta}}. \quad (10) \end{aligned}$$

где

$$\frac{1}{E'_\alpha} = \frac{\cos^4 \varphi}{E_1} + \frac{\sin^4 \varphi}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\mu_{21}}{E_1} \right) \times \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi,$$

$$\frac{1}{E'_\beta} = \frac{\sin^4 \varphi}{E_1} + \frac{\cos^4 \varphi}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\mu_{21}}{E_1} \right) \times \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi, \quad (11)$$

$$\frac{1}{G'_{\alpha\beta}} = \sin^2 2\varphi \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \frac{\cos^2 2\varphi}{G_{12}}.$$

где E'_α , E'_β , $G_{\alpha\beta}$ – модули упругости слоя в направлении α и β и модуль сдвига в плоскости армирования в этих осях; $\mu'_{\alpha\beta}$, $\mu'_{\beta\alpha}$ – коэффициенты Пуассона; η – коэффициенты, определяющие влияние касательных напряжений на удлинение и нормальных напряжений на деформацию сдвига. Наличие этих коэффициентов показывает, что слой, ортотропный в координатах 1, 2, является анизотропным в координатах α , β .

На основе изложенного примем, что $x = 0,01$. Это объемное содержание анкеров в породе; $x_1 = 0,3$ – доля вертикальных анкеров, установленных в приконтурном массиве; $x_2 = 0,5 (1 - x_1)$ – доля наклонных анкеров второго семейства; $x_3 = 1 - x_1 - x_2$ – доля наклонных анкеров третьего семейства; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости породы, МПа; $G = 1000$ МПа – модуль сдвига породы с трещинами; $\mu = 0,25$ – коэффициент Пуассона; $E_1 = E \cdot x + E_n(1 - x)$ – породный модуль упругости породы с анкерами.

Деформация на единицу напряжения равны

$$L_1 = E \cdot x + \frac{1 - x}{E_n} \quad (12)$$

Деформация массива с анкерами при сдвиге на единицу напряжения равна:

$$L_{12} = \frac{1 - x}{G} \quad (13)$$

Поперечный модуль упругости поперек анкеров равен:

$$E_2 = \frac{1}{L} \quad (14)$$

$$\text{Модуль сдвига в осях } 1, 2 \quad G_{12} = \frac{1}{L_{12}}.$$

Деформация массива с анкерами, расположенными под углом α на основе выражения (11) равна:

$$L_z(\alpha) = \frac{\cos^4 \alpha}{E_1} + \frac{\sin^4(\alpha)}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2M}{E_1} \right) \times \sin^2(\alpha) \cdot \cos^2(\alpha) \quad (15)$$

Модуль упругости массива с анкерами, расположенными под углом α равен:

$$E_{z(\alpha)} = \frac{1}{L_{z(\alpha)}} \quad (16)$$

Деформация массива с анкерами, расположенными под углом α равна:

$$L_{xz(\alpha)} = 4 \left(\frac{\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{E} + \frac{\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{E_2} \right) + \frac{\cos^2(2\alpha)}{G_{12}} \quad (17)$$

Модуль сдвига массива с анкерами, расположенными под углом α в осях x , z равен:

$$G_{xz(\alpha)} = \frac{1}{L_{xz(\alpha)}} \quad (18)$$

Модуль упругости массива, оснащенного анкерами всех семейств равен:

$$E_{3(\alpha)} = x_1 \cdot E_{z(0)} + (x_2 + x_3) E_{z(\alpha)} \quad (19)$$

Модуль сдвига массива, оснащенного анкерами всех семейств равен:

$$G_{z(\alpha)} = (x_1 + x_2) G_{xz(0)} + x_3 \cdot G_{xz(\alpha)} \quad (20)$$

Модуль сдвига для всех семейств во второй плоскости равен:

$$G_{32(\alpha)} = (x_1 + x_2) G_{xz(0)} + x_3 \cdot G_{xz(\alpha)} \quad (21)$$

Угол расположения анкеров в массиве приведен в радианах и изменяется от 0 до 1.

На основании выполненных расчетов установлено, что по сравнению с вертикальным расположением анкеров наклонное расположение под углом 45° увеличивает несущую способность массива до 16 %. Однако, с технической точки зрения устанавливать анкера следует под углом 50-60° и даже в этом случае устойчивость системы «порода-крепь» будет выше более чем на 10 %. Для повышения несущей способности кровли выработок особенно в удароопасных условиях целесообразно применять трубчатые анкера взрывно-

го закрепления, которые в процессе взрывной установки уменьшают напряжения в кровле выработок. Кроме того, шпурсы с установленными в них трубчатыми анкерами остаются полыми (свободными), что способствуют разгрузке массива постоянно.

В породах третьей и четвертой категорий устойчивости целесообразно на анкера навешивать сетку и на кровлю выработки наносить набрызгбетон регулируемой толщины в зависимости от состояния массива. Таким образом, использование горных пород как прочного заполнителя крепи в сочетании с анкерами, расположенными особым образом, сеткой и набрызгбетоном создают в кровле выработки замкнутую устойчивую систему, способную работать в широком диапазоне горно-геологических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куреня М.В. Техногенные механические поля напряжений / М.В. Куреня, В.М. Серяков, А.А. Еременко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 269 с.
2. Васильев В.В. Методика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с. **ИДБ**

Коротко об авторах

Федоренко Анатолий Иванович – кандидат технических наук, профессор, директор Осиниковского филиала СибГИУ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 17 симпозиума «Неделя горняка-2006». Рецензент д-р техн. наук, проф. Е.В. Кузьмин.



ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Абаканское железорудное месторождение находится в пределах сейсмически активной зоны, в которой имеют место современные тектонические движения земной коры с деформациями сжатия. Анализ ранее выполненных работ на Абаканском месторождении показывает, что руды и вмещающие породы характеризуются высоким модулем продольной упругости ($E = (5 \div 9) \cdot 10^4$ МПа), обладают способностью накапливать энергию упругих деформаций и хрупко разрушаться.

Массив рудных полей месторождения подвергнут тектоническому сжатию силами, действующими в плоскости, близкой к горизонтальной и имеет максимальный тензор напряжений в северо-западном направлении. Величина горизонтальных напряжений ненарушенного массива имеет следующие величины:

- по простиранию $\sigma_1 = 2,5 \cdot \gamma H$;

- вкрест простирания

$$\sigma_2 = 3,5 \cdot \gamma H.$$

В зоне влияния очистных работ главные нормальные напряжения составляют:

- по простиранию $\sigma_1 = 3,5 \cdot \gamma H$;

- вкрест простирания

$$\sigma_2 = 2,5 \cdot \gamma H.$$

Как известно, проведение горных выработок сопровождается распределением первоначальных напряжений в массиве. Вокруг них возникают зоны

повышенных концентраций напряжений, которые, достигая максимальных значений, вызывают разрушение пород в приконтурном массиве. Исследования по определению напряжений в массиве вокруг одиночной выработки на шахтах Таштагольского и Шерегешского рудоуправлений установлено [1], что максимальные напряжения распространяются на 0,4-1,3 м от контура выработки, которые увеличиваются с глубиной горных работ.

Кроме того, установлено [2], что основная часть потенциальной нагрузки, определяемая гравитационными силами, воспринимается окружающими горными породами и только около 2 % нагрузки воспринимается крепью. В тоже время для возводимых крепей в большинстве случаев достаточно воспринимать нагрузку до 2,5 % от потенциальной. Если передать еще около 1 % нагрузки с крепи горному массиву, то выработки с достаточной степенью надежности можно будет крепить более дешевыми и менее материалоемкими видами крепей. Особенно это актуально для горнорудных предприятий.

Для подтверждения расчетов устойчивости горных выработок в конкретных горно-геологических условиях на шахтах Абаканского и Таштагольского рудоуправления ОАО «Евразруда» были установлены и проведены

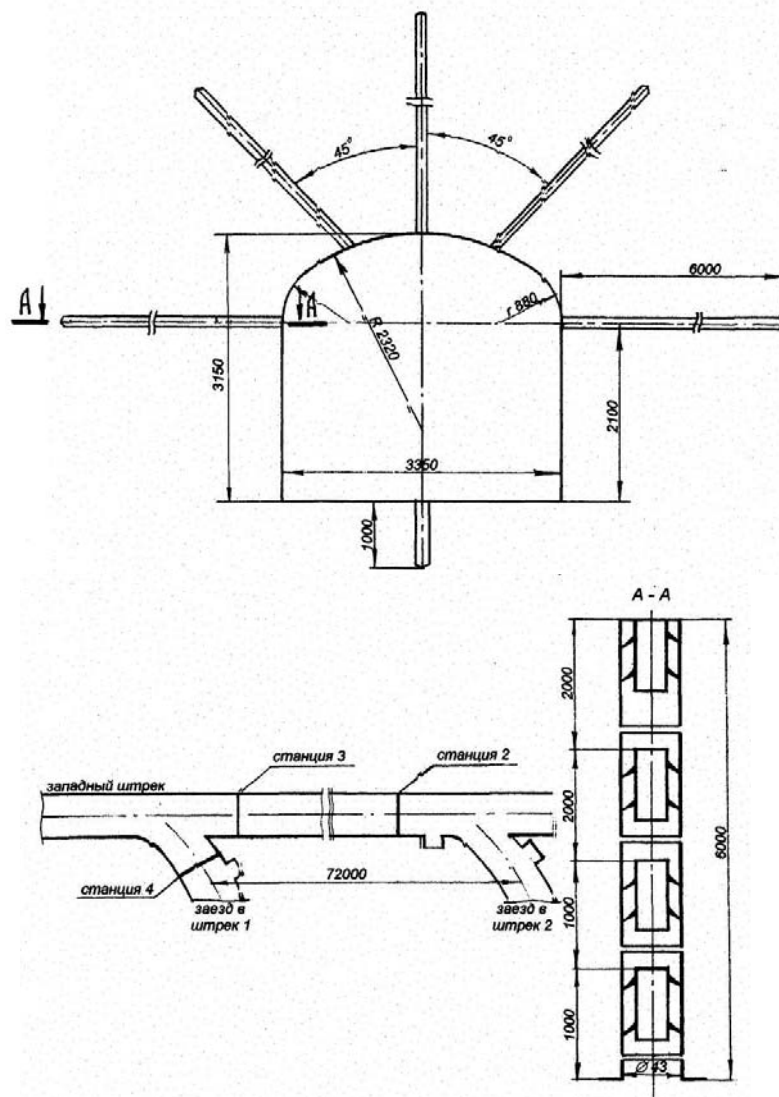


Рис. 1. Схема установки наблюдательных станций на Абаканском руднике

наблюдения за контурными и глубинными реперами. На шахте Абаканского РУ на горизонте +225 м в западном поле в штреке были установлены три наблюдательные станции, состоящие из контурных и глубинных реперов. Западный штрек сечением $9,8 \text{ м}^2$ пройден по туфопесчаникам, туфоагломератам зеленоватого цвета и песчаникам. Коэф-

фициент крепости горных пород 8-10 по М.М. Протоdjаконову. Выполненные расчеты устойчивости выработок, где устанавливались реперные станции, показывают, что они относятся к первой категории устойчивости и крепятся только торкретбетоном. Сопряжение заезда с западного штрека закреплено монолитным бетоном. Наблюдательные

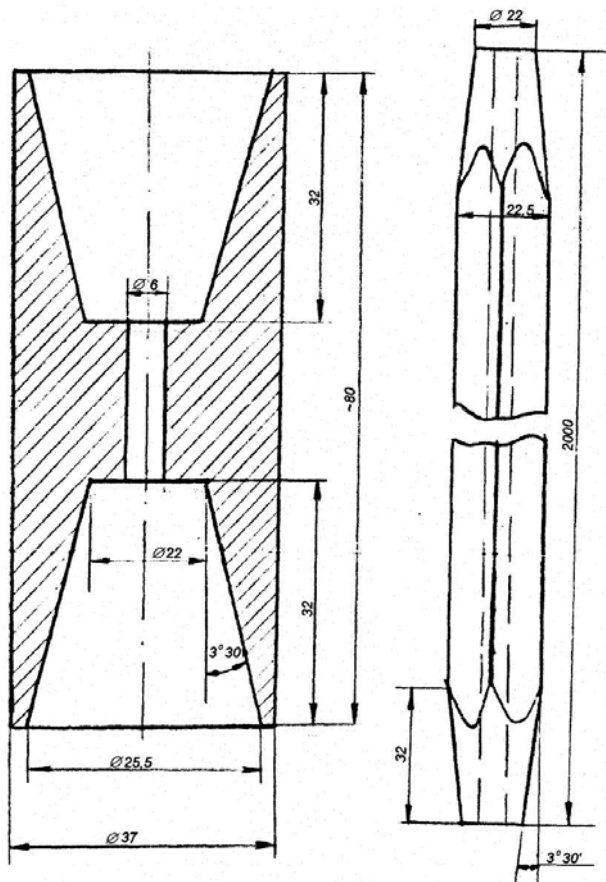


Рис. 2. Соединительная муфта и штанга

На шахте Таштагольского РУ на горизонте -280 м также были установлено две аналогичные наблюдательные станции (орт 19 и 20).

Наблюдения велись на Абаканском руднике в течение года, а на Таштагольском – в течение двух месяцев.

Показания реперов снимались в первую неделю через день-два, вторую неделю – через 2-3 дня. Когда смещения пород стабилизировались, замеры проводились раз в неделю. Кроме того, замеры проводились после каждого массового и технологического взрывов, когда он проводился вблизи наблюдательных станций.

Отработка результатов показаний наблюдательных станций по всем трем позициям

станции были заложены вне закрепленной части выработок. Каждая наблюдательная станция состояла из 26 реперов. В кровле и боках выработки шпуров обуривались глубиной шесть метров, а в почве – один метр. В каждый шпур были установлены по пять реперов: контурный и далее через 1, 2, 4 и 6 м. В почве выработки устанавливался один репер – контурный (рис. 1).

Для бурения шпуров глубиной до 6-8 м под реперные станции было разработано и изготовлено специальное соединение буровых штанг (рис. 2). Шпуров диаметром 42 мм бурили установкой СБКМ-2М.

Наблюдательные станции друг от друга находились на расстоянии 20 м.

в западном штреке показала, что абсолютное смещение приконтурного массива не превышало 5 мм, что позволяет сделать вывод об устойчивом состоянии массива.

Анализ результатов обработки наблюдений показал, что на шахте Абаканского РУ существенных смещений практически не установлено, ни в кровле, ни в боках выработки. Максимальное относительное смещение было зафиксировано 0,8 мм/м.

На шахте Таштагольского РУ в орте 19 в первый месяц наблюдались незначительные смещения реперов (до 1 мм/м). Однако в дальнейшем их показания были нестабильны. Наблюдались смещения до 3,1 мм/м, особенно в боках выработки,

причем левый бок смещался практически полностью.

Предположительно можно сделать вывод, что в данный период происходило движение всего массива. Тем более что при бурении шпуров в кровле глубиной до 6 м произошел прорыв воды под большим напором. По-видимому, понижение уровня воды через несколько суток дало пригрузку массиву, и это зафиксировали репера.

Вторая станция показала смещение контурного репера в кровле выработки до 1,6 мм/м в первый месяц проходки. В дальнейшем изменений практически не наблюдалось.

Расчеты устойчивости показывают, что кровля выработки относится ко 2-й категории устойчивости и требует крепления, а бока – к первой. В целом, методом контурных и глубинных реперов можно производить оценку устойчивости горных выработок.

По измеренным и определенным деформациям рассчитывают напряжения из следующего выражения:

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon \cdot E}{\mu / 1 - \mu} = \varepsilon \cdot E \cdot \frac{1 - \mu}{\mu}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где ε – максимальные деформации растяжения (сжатия), мм/м; μ – коэф-

фициент Пуассона, доли ед.; E – модуль упругости пород, МПа;

$$E = c \cdot \bar{E}, \text{ МПа} \quad (2)$$

где \bar{E} – среднее значение модуля упругости пород по данным испытания образцов, МПа; c – коэффициент снижения модуля упругости пород в массиве за счет трещиноватости, доли ед.

По полученным смещениям пород в конкретных горно-геологических условиях определялась нормативная нагрузка на крепь.

Выводы

1. Для практического подтверждения состояния контура выработок, выполненного расчетным методом, целесообразно устанавливать реперные станции.

2. Бурение шпуров глубиной до 6 м под реперные станции возможно осуществлять при помощи специальных соединительных муфт.

3. Осмотр состояния горных выработок и показания наблюдательных реперных станций позволят своевременно принять меры к повышению устойчивости горных выработок путем, например, нанесения дополнительного слоя набрызгбетона на кровлю выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М. Предотвращение горных ударов / И.М. Петухов, П.В. Егоров, Б.М. Винокур. – М.: Недра, 1984 – 230 с.
2. Максимов Н.П. Новые комбинированные крепи капитальных горных выработок

с направленным использованием несущей способности приконтурного массива. – Шахтное строительство, 1985, № 5. – С. 13-16. **ИЛАС**

Коротко об авторах

Федоренко Анатолий Иванович – кандидат технических наук, профессор, директор Осиниковского филиала СибГИУ.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 17 симпозиума «Неделя горняка-2006». Рецензент д-р техн. наук, проф. Е.В. Кузьмин.