

УДК 622.25

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ В РАЙОНАХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

Дрибан В. А., Севрюков А. О.
(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

У роботі вивчено процес формування напружено-деформованого стану пристволового масиву і навантажень на кріплення ствола поблизу геологічних порушень.

The paper studies the process of formation of strain-stress state of shaft bottom mass and loads on shaft support near geological faults.

Одной из актуальных научно-технических проблем развития угольной промышленности Украины является поиск и разработка эффективных решений по интенсификации строительства шахтных вертикальных стволов. При этом особое внимание следует уделить мероприятиям по обеспечению их устойчивости в зонах геологических нарушений, так как при прохождении стволов через эти зоны возникают значительные трудности.

Как уже было отмечено в [1], наибольшее снижение устойчивости вмещающих пород и ухудшение условия строительства и эксплуатации стволов наблюдается в Красноармейском угленосном районе Донбасса. Условия сооружения стволов усложняются вследствие низкопрочностных параметров пород, наличия геологических нарушений и водопритоков, что приводит к сниженным скоростям проходки.

Одним из примеров указанных условий может служить сооружение воздухоподающего ствола № 2 ш/у «Покровское» (в прошлом шахта Красноармейская-Западная № 1). Ствол прохо-

дился на глубину 860 м диаметром в свету 8 м буровзрывным способом (БВР). Условия проходки были осложнены волнистостью и мелкоамплитудной нарушенностью. Крепление ствола в его большей части осуществлялось монолитным бетоном толщиной 500 мм.

При проходке ствола в интервале глубин 696-698 м с севера и северо-востока в бетонной крепи в течение суток образовался закол, а в последующие два дня отмечено интенсивное образование заколов и трещин раскрытием до 40-60 мм (рис. 1, 2).

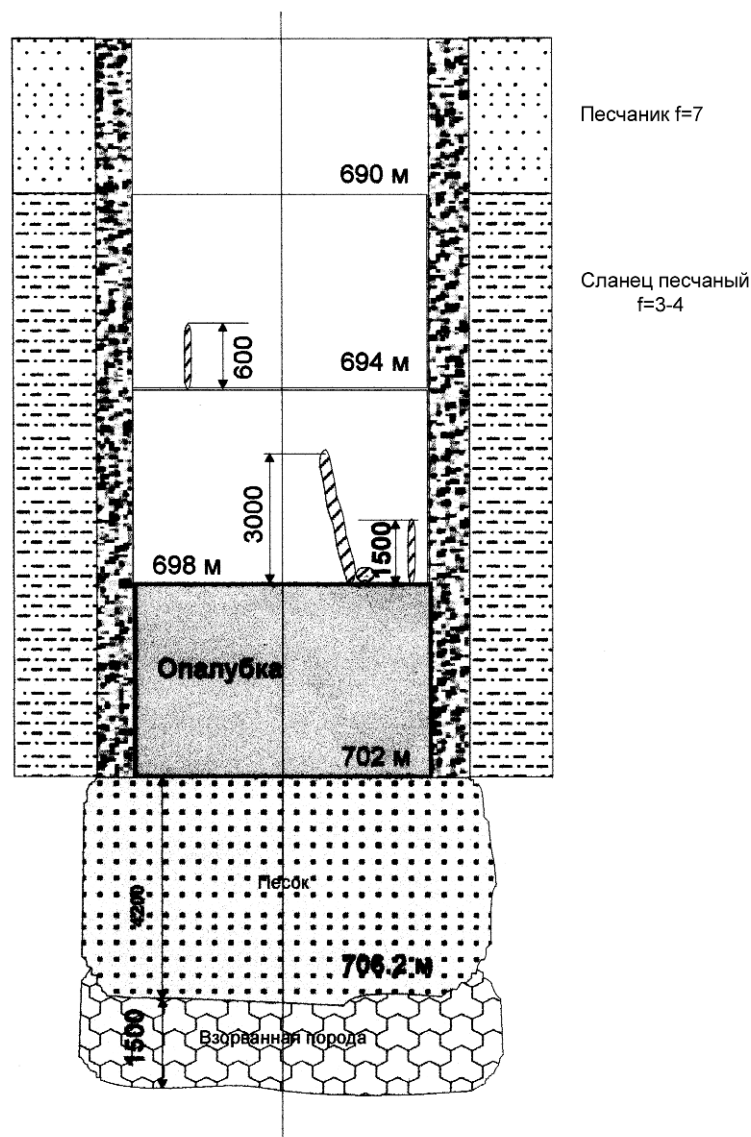


Рис. 1. Разрез по ВПС № 2 в интервале глубин 690 – 706 м

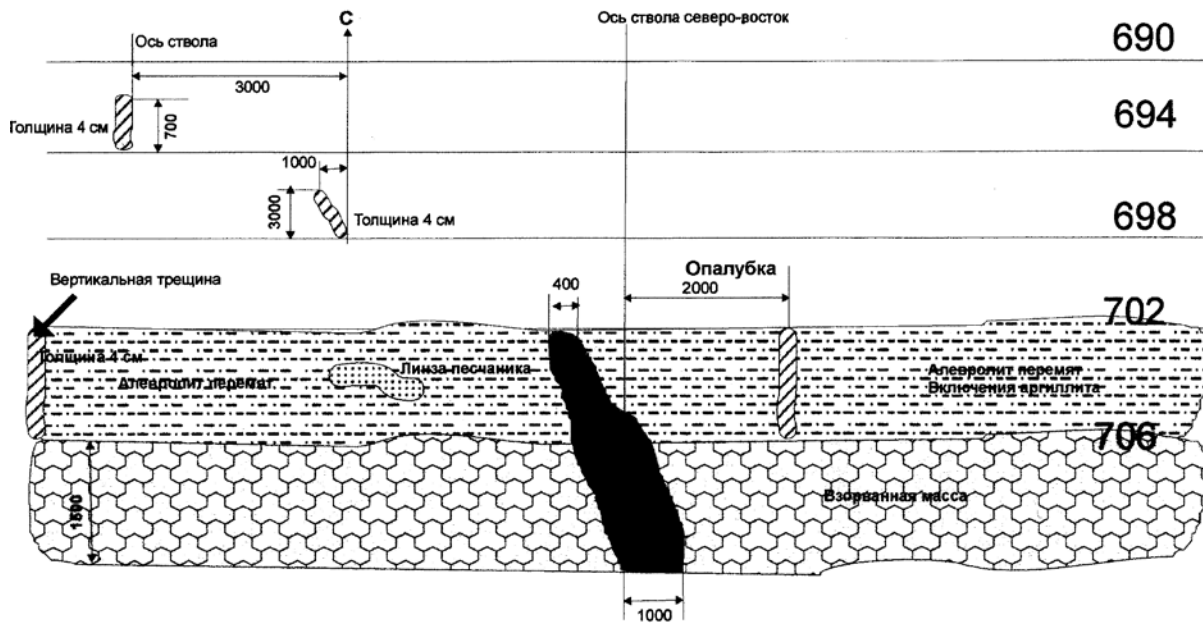


Рис. 2. Развертка крепи ВПС №2 в месте нарушения

В обнаженной части забоя (702-706 м) с севера наблюдалась вертикально-ориентированная зона перемятых пород представленных аргиллитом шириной 0,4 - 1 м, а также прослеживались две вертикальные трещины раскрытием до 40 мм со стороны восстания и падения, между которыми сформировался активный процесс выдавливания внутрь ствола перемятых пород. Горное давление проявилось настолько сильно, что защемило опалубку на отметках 698-702 м, а обнаженная часть забоя изменила геометрию.

Для обеспечения устойчивости ствола были приняты следующие мероприятия:

- в местах выхода перемятых пород сделана дополнительная разделка стен забоя на 0,3-0,5 м в виде разгрузочных щелей и смонтирована временная ограждающая крепь;
- крепление ствола железобетоном толщиной 700 мм с использованием армокаркасов из двойной арматурной сетки и установкой колец из СВП-33 с шагом 0,5 м на анкерах длиной 2,8 м.
- бетонирование выполнять короткими заходками по 1 м, чтобы бетон набирал несущую прочность до начала сдвижения горных пород.

Для изучения данной ситуации построена аналитическая модель. К особенностям ситуации относятся: наличие почти вертикальной узкой (до 1 м) зоны перемятых пород; появление в обнаженной части забоя ствола вертикально расположенных трещин с видимым раскрытием; развитие в крепи ствола ряда сквозных горизонтальных трещин, что, вероятно, свидетельствует о кручении массива, обусловленного изменением положения и толщины зоны перемятых пород по вертикали [1].

Аналитическая модель. Схема расчетной модели представлена на рисунке 3. Суть модели сводится к тому, что породный массив вокруг ствола с трещиной длиной $l = r_1 - r_2$ представлен как кривой круговой брус изгибаемый силой P , приложенной к незакрепленному концу и моментами M в плоскости своей кривизны. Через r_1 и r_2 обозначены внутренний и внешний радиусы соответственно. При этом изгибающие силы и моменты обусловлены величиной напряжений действующих в массиве вне зоны перемятых пород.

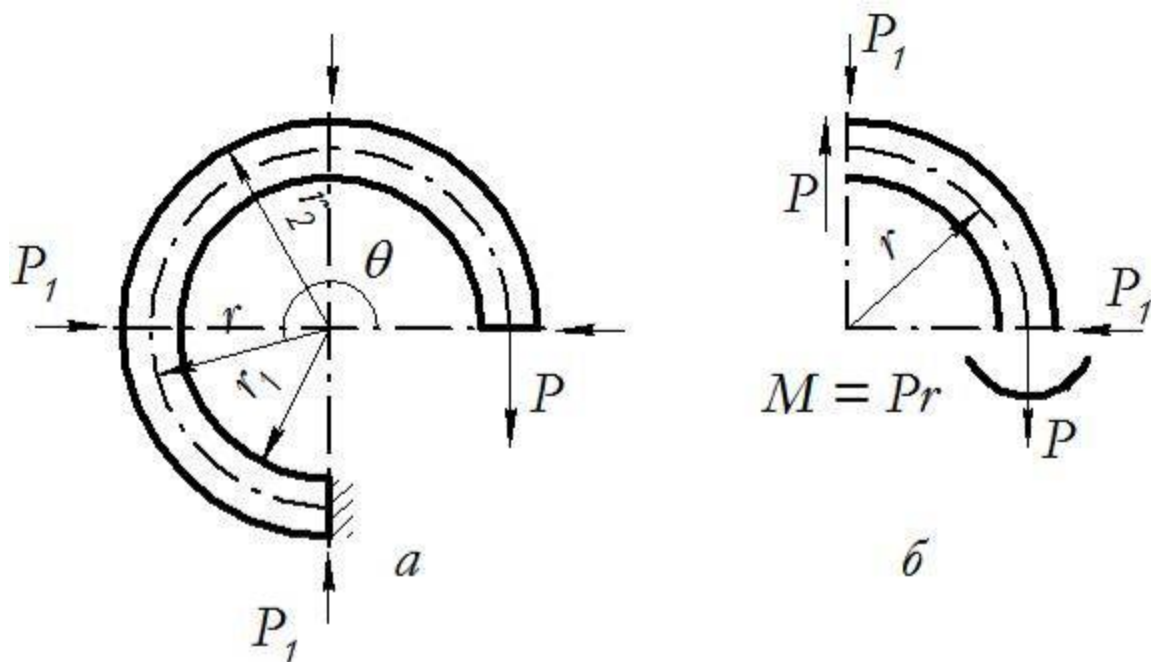


Рис. 3. Расчетная схема модели полная (а) и с раскладкой сил и моментов (б)

Данная модель может быть описана следующим образом. Кроме дополнительной силы P в модели необходимо учесть нагрузки от окружающего массива горных пород P_1 , которые действуют равномерно вокруг ствола (силы в массиве, возникающие при проходке ствола). Напряжения, которые вызывает нагрузка от ненарушенного массива горных пород P_1 , можно определить при решении задачи Ламе (полый цилиндр под действием равномерного внутреннего и внешнего давления) [2] для условий равномерно распределенной внешней нагрузки и отсутствия внутренней.

Решение задачи Ламе при отсутствии внутренней нагрузки имеет вид:

$$\sigma_{rr}^0 = \frac{-p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right), \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^0 = \frac{-p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right). \quad (2)$$

Кроме силы P_1 в модели действует сила P – это дополнительная сила возникающая в массиве горных пород при наличии в нем тектонического нарушения (Величина P является функцией ряда параметров: P_1 , степени деформируемости зоны перемятых пород, физико-механических свойств вмещающих пород и т.д.).

Напряжения возникающие от действия силы P можно определить используя решения Х.С. Головина (изгиб кривого бруса узкого прямоугольного сечения силой, приложенной к незакрепленному концу) [2].

Напряжения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = & \frac{P}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - r \right) \cos \theta - \frac{2P(r_1 + r_2)}{D_2} \left(r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + \right. \\ & \left. + r_2^2 \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - 3r \right) \cos \theta - \frac{2P(r_1 + r_2)}{D_2} \left(r_2^2 - r_1^2 + r_1^2 \ln \left(\frac{r_1}{r} \right) + r_2^2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{P}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - r \right) \sin \theta, \quad (5)$$

где

$$D_1 = r_1^2 - r_2^2 + (r_1^2 + r_2^2) \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right); \quad (6)$$

$$D_2 = (r_1^2 - r_2^2)^2 - 4r_1^2 r_2^2 \left(\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right)^2. \quad (7)$$

Согласно предложенной модели сила P действует на свободный незакрепленный конец кривого бруса. В нашем случае эта сила характеризует дополнительные напряжения, возникающие при проведении вертикальной выработки в зоне геологического нарушения (пересечение выработкой геологического нарушения одной стороной).

При этом следует учесть, что зона геологического нарушения (сместитель) представляет собой участок раздробленной перемятой или значительно трещиноватой породы, т.е. в кривом бруске свободный конец имеет некоторую «подушку» (препятствие). Поэтому в модели сила P будет частично компенсирована этим участком нарушенных пород. Следовательно на кривой бруске будет действовать сила P' , которая равняется произведению силы P на разность $(1 - k_b)$:

$$P' = P(1 - k_b), \quad (8)$$

где k_b – коэффициент восстановления, изменяющийся от 0 (при выдавливании перемятой породы внутрь ствола) до 1 (соответствует условиям ненарушенного массива).

На основе вышесказанного можно определить, что напряжения в массиве горных пород возникающие при проведении

круглой вертикальной выработки пересекающей геологическое нарушение одной стороной равняется сумме напряжений от воздействия сил P_1 и P' , тогда окончательные формулы для расчета имеют вид:

$$\sigma_{rr}^M = (1 - k_b)\sigma_{rr} + \sigma_{rr}^0 = \frac{P'}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - r \right) \cos \theta - \frac{2P'(r_1 + r_2)}{D_2} \left(r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + r_2^2 \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right) - \frac{p_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^M = (1 - k_b)\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\theta\theta}^0 = \frac{P'}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} + \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - 3r \right) \cos \theta - \frac{2P'(r_1 + r_2)}{D_2} \left(r_2^2 - r_1^2 + r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r}\right) + r_2^2 \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right) - \frac{p_1 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{r\theta}^M = (1 - k_b)\sigma_{r\theta} + \sigma_{r\theta}^0 = \frac{P'}{D_1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{r} - \frac{r_1^2 r_2^2}{r^3} - r \right) \sin \theta. \quad (11)$$

Для удобства оценки состояния массива горных пород в зоне геологического нарушения воспользуемся коэффициентом дополнительных концентрации напряжений в околоствольном массиве. Его можно рассчитать путем сравнения напряжений в ненарушенном массиве с напряжениями в нарушенном массиве, вследствие чего получим:

$$k_\sigma(r, \theta) = 1 - (1 - k_b)\sigma_{\theta\theta} \frac{(r_2^2 - r_1^2)r^2}{p_2 r_2^2 (r^2 + r_1^2)}, \quad (12)$$

где r – текущий радиус.

Поскольку фактические данные по параметрам нарушения отсутствуют, то было просчитано нескольких вариантов для различной длины нарушения и его степени деформируемости ($r_2/r_1 = 1,9; 2,5; 3,2$, $r = r_2$; $r = r_1$, $k_\sigma = 0,7; 0,5; 0,3$). Результаты расчетов приведены на рисунке 4.

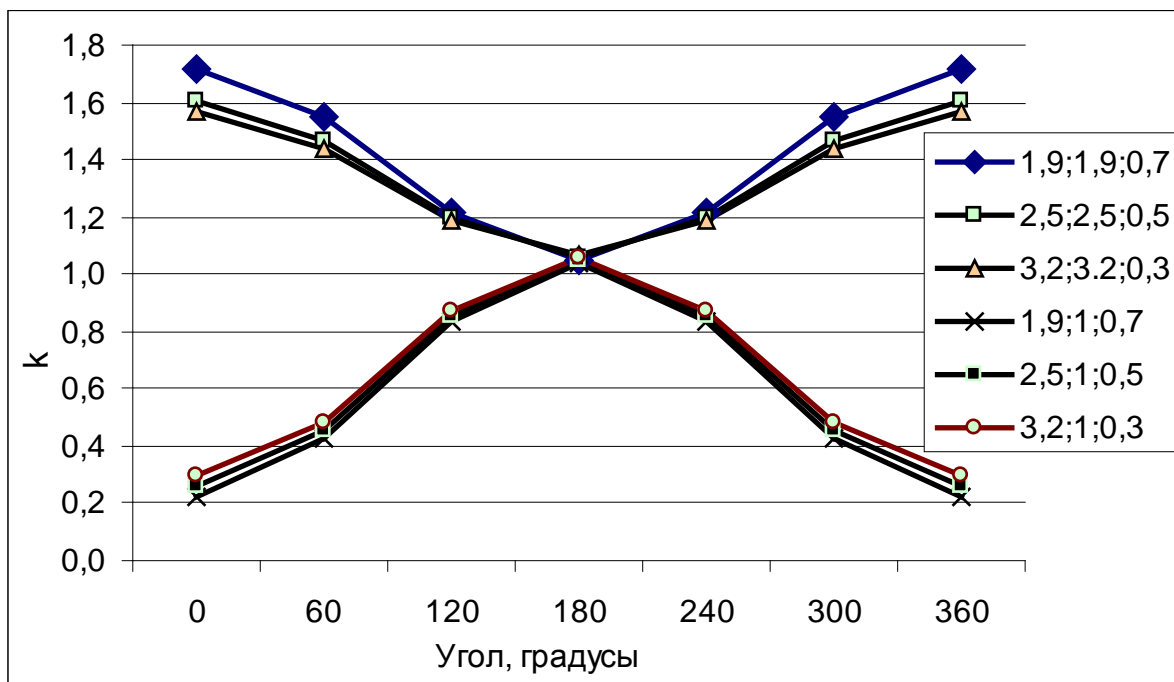


Рис. 4. Диаграмма распределения коэффициента концентрации напряжений

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что наибольшие напряжения возникают в зоне геологического нарушения, при этом коэффициент концентрации напряжений может достигать значительных величин.

Данный расчет проведен для случая только что образовавшейся незакрепленной полости в массиве горных пород с вертикально ориентированным с одной стороны геологическим нарушением.

Подчеркнем, что в приведенных расчетных формулах неопределенным остается изменяющийся во времени коэффициент восстановления k_b .

Рассмотрим этот вопрос более подробно. НДС околоствольного массива в районе геологического нарушения в процессе возведения ствола проходит 3 стадии: первая – сформированные поля напряжений и деформаций без влияния горных работ, вторая – вскрытие нарушения, сопровождающееся, как правило, выпуском некоторого объема горной массы в выработку и третья – формирование НДС после возведения крепи во времени.

Для описания напряженно-деформированного состояния необходимо построение физической модели, адекватно описывающей происходящие в массиве процессы.

С учетом описанных выше особенностей деформирования массива, а именно, наличие почти вертикальной узкой (от 0,4 до 1 м) зоны перемятых пород; появление в обнаженной части забоя ствола вертикально расположенных трещин с видимым раскрытием; развитие в крепи ствола ряда сквозных горизонтальных трещин, указанный процесс можно представить следующим образом. Сжатие и последующее выдавливание пластического слоя перемятых пород (в зоне геологического нарушения) между параллельными жесткими шероховатыми плитами (рис. 5).

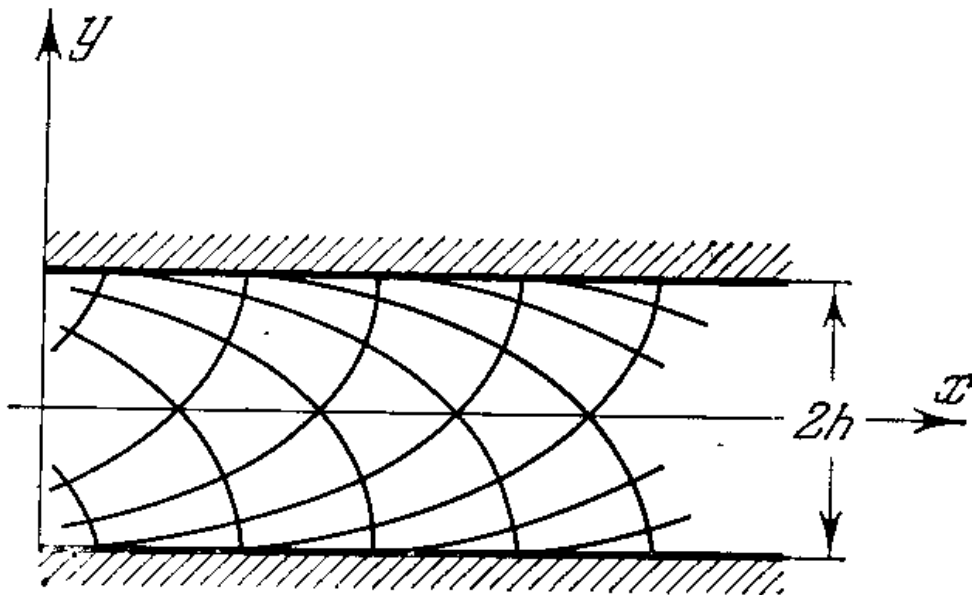


Рис. 5. Расчетная модель

Пластический слой выдавливается в стороны и течет от середины к краям; на поверхностях контакта при этом возникают большие касательные напряжения. Для развитых пластических деформаций допустимо считать, что эти касательные напряжения достигают максимального значения τ_s .

Математическая формализация задачи имеет следующий вид. Слой идеально пластического материала в плоскости (x, y)

занимает область $S: \{|x| \leq l, |y| \leq h\}$ - слой толщиной $2h$ и длиной $2l$ при этом предполагается, что толщина значительно меньше длины. Условие пластичности Мизеса:

$$(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4\tau_s^2, \quad (13)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений, τ_s – предел текучести материала.

В данных условиях уравновешивающие нагрузки в концевых сечениях слоя не могут заметно влиять на напряженное состояние слоя в некотором отдалении от концов. Уравнения равновесия и условие пластичности Мизеса, дополненные граничными условиями внутреннего скольжения на гранях $y = \pm h$, в случае свободных боковых границ слоя имеют известное решение Л. Прандтля [4, 5]:

$$\sigma_x = \tau_s \left(\frac{l-x}{h} - 2\sqrt{1 - \frac{y^2}{h^2}} + \frac{\pi}{2} \right), \quad \sigma_y = \tau_s \left(\frac{l-x}{h} + \frac{\pi}{2} \right), \quad \tau_{xy} = \tau_s \frac{y}{h}. \quad (14)$$

Вектор скорости $\{u, v\}$ находится из предположения о несжимаемости материала и закона течения Сен-Венана и в данном случае определяется соотношениями:

$$u = v_0 \left(\frac{x}{h} + \sqrt{1 - \frac{y^2}{h^2}} - \frac{\pi}{2} \right), \quad v = -v_0 \frac{y}{h} \quad (15)$$

где v_0 – скорость сближения плит, а граничные условия при $x = l$ удовлетворяются в интегральном смысле:

$$\int_{-h}^h \sigma_x dy = 0.$$

Полученные соотношения позволяют оценить среднюю величину предельного сжимающего напряжения P :

$$P = 2 \int_0^l \sigma_y dx = \frac{\tau_s}{2} \left(\frac{l}{h} + \pi \right) + \sigma_0, \quad (16)$$

где σ_0 – боковой подпор.

Высказанные соображения дают возможность выполнить геомеханический анализ сложившейся ситуации.

Итак, на первой стадии (до вскрытия нарушения) сжимающие напряжения равны γH , соответственно, из (16) боковой подпор, обеспечивающий статичность массива горных пород составит:

$$\sigma_0 = \gamma H - \frac{\tau_s}{2} \left(\frac{l}{h} + \pi \right) \quad (17)$$

На второй стадии (при вскрытии нарушения стволом) боковой подпор равен нулю и, соответственно, произойдет скачок сжимающих напряжений за счет образования свободной поверхности и выдавливания горных пород внутрь ствола. Именно такую ситуацию мы и наблюдали при проходке воздухоподающего ствола № 2 ш/у «Покровское». Таким образом, коэффициент восстановления k_b определится следующим простым соотношением:

$$k_b = \frac{\tau_s}{2} \left(\frac{l}{h} + \pi \right) (\gamma H)^{-1} \quad (18)$$

и зависит как от геометрических параметров нарушения (длины и ширины) и глубины расположения выработки, так и от физико-механических свойств вмещающего массива. Обратим внимание, что согласно (18) концентрации напряжений в околоствольном массиве убывают по мере увеличения длины нарушения, что согласуется с первой моделью [1] и возрастают при увеличении его ширины.

И, наконец, на третьей стадии сначала происходит уплотнение прилегающей к крепи зоны нарушенных пород (после их частичного выпуска), а затем последовательное повышение нагрузки на крепь за счет реологических свойств вмещающего массива горных пород, определяющих скорость сближения плит (продольных границ нарушения). При этом коэффициент восстановления нагрузок k_b определяется соотношением:

$$k_b(t) = \left[\frac{\tau_s}{2} \left(\frac{l}{h(t)} + \pi \right) + \sigma_k(t) \right] (\gamma H)^{-1}, \quad (19)$$

где $\sigma_k(t)$ – отпор крепи ствола на участке нарушения во времени, $h(t)$ – функция изменения ширины выдавливаемого слоя за счет реологии массива.

Повышение нагрузки на крепь ствола в районе геологического нарушения будет продолжаться до тех пор, пока вновь не возникнет равновесная ситуация, определяемая (17) с учетом сжатия выдавливаемого слоя:

$$\sigma_k^f = \gamma H - \frac{\tau_s}{2} \left(\frac{l}{h^f} + \pi \right), \quad (20)$$

где индексом f обозначены финальные значения для величины нагрузки на крепь и усредненной ширины сжимаемого слоя.

Как видно из формулы (20) определяющим при принятии конкретных решений по обеспечению устойчивости, является соотношение совокупности горно-геологических и геомеханических факторов, а также параметров крепления. Проиллюстрируем этот вывод на конкретном примере. В рассматриваемом нами случае напряжения равны 17,5 МПа (глубина 700 м) прочность вмещающих пород с учетом коэффициента ослабления 10,5 МПа, прочность на срез согласно [5] $\approx 2,23$ МПа, тогда при длине нарушения 8 м и ширине 0,8 м предельная нагрузка на крепь составит:

$$\sigma_k^f = 17,5 - \frac{2,23}{2} \left(\frac{9}{0,8} + 3,14 \right) = 1,46 \text{ Мпа},$$

что вполне допускает применение жесткой крепи с высоким отпором, например, усиленный железобетон. В тоже время при аналогичных условиях для глубин порядка 800 м нагрузки на крепь составят приблизительно 4 МПа, что практически исключает использование жесткой крепи. В таких условиях целесообразно использование двух или трехслойных крепей с податливым внешним слоем.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Дрибан В.А. Голдин С.В. Левит В.В. Борщевский С.В. Обеспечение устойчивости глубоких вертикальных стволов в зонах геологических нарушениях с учетом реологических свойств горных пород // Уголь Украины. – 2004. – № 5. – с. 38 – 43.
2. Демидов С.П. Теория упругости. – М., Высшая школа, 1979. – 432 с.
3. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород – М., Недра, 1979. – 269 с.
4. Качанов Л. М. Основы теории пластичности – М., Наука, 1969. – 417 с.
5. Кийко А.И. Вязко-пластическое течение материалов – М., Издательство ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2001. – 130 с.
6. Мельников Н.В. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород. – М., Недра, 1979. – 191 с.