

А.М. Кузьменко, А.В. Хейло, А.А. Козлов

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ЛАВЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Рассмотрен механизм формирования области напряжений, которая образуется во вмещающих породах при объединении рабочего пространства лавы с протяженной выработкой, делящей длинный выемочный столб на части для обеспечения безопасного ведения горных работ.

ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ НАПРУЖЕНЬ У ВМІЩУЮЧИХ ПОРОДАХ ПРИ ПОЄДНАННІ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ЛАВИ З ДОПОМІЖНОЮ ПРОТЯЖНОЮ ВИРОБКОЮ

Розглянуто механізм формування області напружень, що утворюється у вміщуючих породах при об'єднанні робочого простору лави з протяжною виробкою, що поділяє довгий виїмковий стовп на частини для безпечного ведення гірничих робіт.

STRESS AREA FORMATION IN THE SURROUNDING ROCKS AT COMBINING OF FACE AREA WITH EXTENDED ADDITIONAL MINE WORKING

Mechanism of stress area formation which is formed in the wall rocks by combining face with extended mine working that divides a long extraction pillar on the recessed portion to ensure safe mining operations is considered.

ВВЕДЕНИЕ

Применение на пологих угольных пластах Донбасса высокопроизводительных очистных механизированных комплексов потребовало пересмотра подходов к подготовке выемочных столбов для поддержания производственной мощности шахты и наращивание ее за счет интенсификации ведения горных работ. При имеющихся схемах подготовки шахтных полей большая часть длин выемочных участков находится в диапазоне 800 – 1000 и 1100 – 1500 м.

Авторы работ [1, 2] отмечают основные направления совершенствования планиро-

вания подготовки с длиной лавы до 300 м и выемочного столба до 3000 – 5000 м при сроке отработки запасов не менее 1 года, чтобы уменьшить затраты времени и средств на перемонтаж механизированных комплексов. Однако эти параметры значительно превышают возможности оказания помощи трудящимся при возникновении аварийной ситуации на выемочном участке. Возникает противоречие между имеющимися планировочными решениями на шахтах и современным видением развития комплексной механизации очистных работ в условиях интенсификации выемки угольных запасов. Одним из вариантов

решения данного вопроса является деление длинного выемочного столба на части дополнительной выработкой, где на каждом этапе развития и эксплуатации столбовой системы разработки обеспечивается безопасность ведения горных работ на пологих и наклонных пластах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выемке угля в рабочей зоне очистного комбайна опускание пород кровли в лаве происходит со скоростью, превышающей в 2 – 5 раз интенсивность опускания до выемки. Постепенная стабилизация аномалий деформации на данном участке горных пород наблюдается лишь после удаления выемочной машины на определенное расстояние. Конфигурация зоны влияния выемки угля в плоскости пласта, построенная по результатам натурных наблюдений, изображена на рис. 1. Размеры зоны зависят от ширины захвата комбайна, скорости выемки угля, способа управления кровлей, физико-механических свойств пород и других факторов. Для пологих пластов Донбасса зона влияния выемки распространяется ориентировочно впереди комбайна на расстояние 10 – 20 м и за ним на – 20 – 30 м.

Опускание пород сопровождается полойным изгибом с расслоением литологических разностей в горном массиве. Данный характер поведения породного массива свойственен, также однородному массиву. Над выработкой формируется свод естественного равновесия. Вначале происходит отслоение пачки пород небольшой мощности с последующим разрушением ее вначале над серединой выработки, а затем у ее стенок. Это свойственно массивам, представленным в виде балок-полосок, где при заданной нагрузке возникает поперечный изгиб нормально к напластованию. Каждая из них испытывает сложное напряженное состояние от изгибающего момента, поперечных сил и трения. Нормально к напластованию происходит рассло-

ние, что способствует образованию полостей между слоями и разрушению отслоившейся породной пачки независимо от структурного строения горного массива.

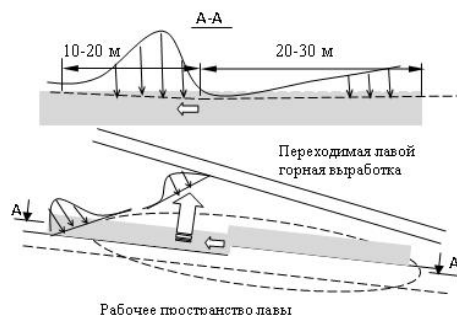


Рис. 1. Конфигурация зон распределения напряжений в горном массиве при приближении очистного забоя к дополнительной длинной выработке

Выемка лавой угольного пласта сопровождается прогибом основной кровли (слой песчаника) не только над свободным пролетом, но и над массивом. Изгибающий момент меняет знак в точке, расположенной над выработанным пространством. Ее месторасположение зависит как от природных факторов, так и от технологических параметров. Подрабатываемый слой (непосредственная кровля) испытывает напряжения от поперечных сил, изгибающего момента и сил трения на контактах напластования. В нижней его части, расположенной непосредственно над отработываемым пластом, нормальные к поперечному сечению напряжения, вызванные изгибающим моментом, меняют знак. Следовательно, при положительном моменте эти напряжения сжимающие. Над выработанным пространством, где момент имеет отрицательное значение, напряжения растягивающие.

Наиболее опасным сечением, в котором возможно разрушение слоя породы по напластованию, является сечение, расположенное в плоскости забоя лавы на расстоянии максимума сформировавшейся зоны опорного давления. Известно, что при на-

личии разного модуля упругости в слоях, слагающих вмещающие породы, смещение нейтральной оси слоя в сторону большего модуля при поперечном изгибе. Максимальная величина касательных напряжений находится внизу слоя на расстоянии примерно $0,25 h_{cl}$ от вынимаемого пласта.

Известно, что проведение любой выработки в горном массиве вызывает аномалию распределения напряжений, характеризующуюся зоной опорного давления впереди забоя. Распределение напряжений в опорной зоне и ее параметры по периметру выработки неравномерны. Над средней частью максимум опорного давления удален от плоскости забоя, по мере приближения к углам он смещается к плоскости обнажения. Поэтому в углах выработки максимальные напряжения в опорной зоне могут быть выше максимальных напряжений в средней части лавы. При изменении контура границ выработки распределение напряжений в опорной зоне меняется. Аналогичные изменения происходят при объединении рабочего пространства лавы с дополнительной выработкой, которую переходят очистные работы при усовершенствованной столбовой системе разработки пологих и наклонных угольных пластов.

Принимаем допущение, что дополнительная протяженная выработка не выходит за пределы ширины выемочного столба и вокруг нее образовалась техногенная зона со свойственным ее напряженно-деформированным состоянием [3 – 9]. В области пересечения очистным забоем дополнительной выработки массив горных пород является изотропным. Сформировавшуюся зону напряжений во вмещающих породах вокруг дополнительной выработки, пройденной в выемочном столбе до ее перехода очистными работами, можно представить в виде функции комплексного переменного, описывающего векторное поле, область которого представлена множеством точек z и имеет замкнутый контур (C_B) (рис. 2).

Выемка угольного пласта очистным за-

боем приводит к сокращению ширины целика между выработкой и свою очередь формирует локальную зону разгрузки массива вмещающих пород с подобластью P_d . При выемке угля комбайном в лаве локальная зона напряжений перемещается по ширине выемочного столба, приближаясь к выработке [10 – 12]. Впереди движущегося очистного забоя формируется зона опорного давления и напряжений с замкнутым контуром D . В данном случае рассматривается область напряжений вмещающих пород горного массива в зоне соединения рабочего пространства с дополнительной выработкой в линейной части очистного забоя.

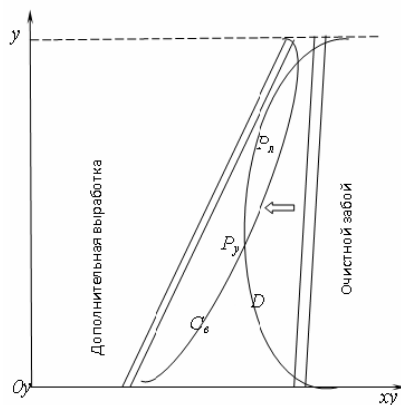


Рис. 2. Область формирования напряжений при переходе очистным забоем дополнительной выработки

Сдвигение осадочных пород происходит в виде послойного и поперечного изгибов. Возникают напряжения от поперечных сил и от изгибающих моментов. В зоне опорного давления напряжения направлены в противоположную сторону. При значительной величине сцепления между породными слоями на их контактах накапливается потенциальная энергия, которая превращается в кинетическую энергию, вызывающую разрушение массива. Чаще всего это происходит над серединой и у боков выработки, где нарушается сплош-

ность слоя по напластованию. Этот процесс сопровождается значительными опусканиями и разрушением крепи.

Множество S_1 является подмножеством другого подмножества S_2 (S_1 содержится в S_2), если каждый элемент множества S_1 является и элементом подмножества S_2 . Объект P , содержащийся в множестве S , есть элемент множества S ($P \in S$) [10]. Область напряжений во вмещающих породах можно представить простой непрерывной кривой (жорданова дуга) (рис. 3) в плоскости z – плоскости при последовательности точек $z = x + iy$ таких, что

$$\begin{aligned} z &= z(t), \quad x = x(t), \quad y = y(t), \\ -\infty &\leq t_1 \leq t \leq t_2 \leq \infty, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – непрерывные функции действительного параметра t .

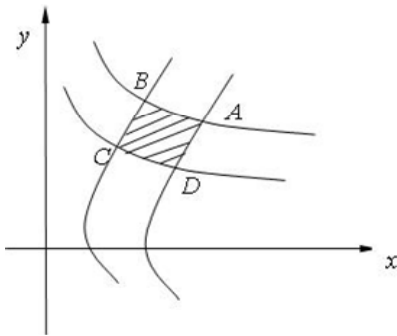


Рис. 3. Область изменения напряжений при объединении рабочего пространства с дополнительной выработкой

Здесь рассматривается одна сторона зоны опорного давления от пройденной дополнительной выработки, которая находится со стороны надвигающегося очистного забоя. Геометрия комплексной плоскости (включая определение расстояния и угла) тождественна с геометрией евклидовой плоскости точек (x, y) или векторов $r = xi + yi$ для конечных значений x и y

[13].

Зона динамического опорного горного давления, находящаяся впереди очистного забоя, накладывается на стационарное горное давление дополнительной выработки при ее пересечении. Пересечение множеств S_1 и S_2 есть множество всех элементов, содержащихся в них. Образовавшуюся область напряжений на плоскости кривли можно представить как риманову поверхность, которая состоит из z -плоскостей, соответствующих ветвям функции $f(z)$, соединенных вдоль соответствующих разрезов.

Функция $w = f(z)$ отображает точки z -плоскости в соответствующие точки w -плоскости. В каждой точке z такой, что $f(z)$ аналитическая и $f'(z) \neq 0$, отображение $w = f(z)$ конформно, т.е. угол между двумя кривыми, проходящими через точку z , переходит в равный по величине и по направлению отсчета угол между соответствующими кривыми в плоскости w .

Таким образом, зона напряжений во вмещающих породах имеет замкнутую область, которая выражается функцией $f(z)$; P – замкнутый контур, принадлежащий этой области вместе со своей внутренностью D и Z – любая точка из D . Тогда область напряжений, формирующаяся вокруг пройденной дополнительной выработки, примет вид интегральной теоремы Коши

$$\int_c f(\varepsilon) d\varepsilon,$$

$$\left\{ \begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon - z} d\varepsilon; \\ f'(z) &= \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{f(\varepsilon)}{(\varepsilon - z)^2} d\varepsilon; \\ f''(z) &= \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{f(\varepsilon)}{(\varepsilon - z)^3} d\varepsilon; \\ &\dots \\ f^n(z) &= \frac{n!}{2\pi i} \int_c \frac{f(\varepsilon)}{(\varepsilon - z)^{n+1}} d\varepsilon. \end{aligned} \right.$$

Равенство (1) выражает функцию $f(z)$ и ее производные через граничные значения $f(\varepsilon)$. В частности

$$\int_c \frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon - z} = 2\pi i,$$

где c – замкнутый или незамкнутый контур;

$f(\varepsilon)$ – функция, непрерывная на контуре c .

Интеграл типа Коши представляет функцию $F(z)$, аналитическую в каждой области, не содержащих точек контура C . При этом

$$F^{(n)}(z) = \frac{n!}{2\pi i} \int_c \frac{f(\varepsilon)}{(\varepsilon - z)^{n+1}} d\varepsilon.$$

При расположении дополнительной выработки под углом к направлению подвигания очистного забоя зоны изменения напряжений во вмещающих породах соприкасаются в точке P с контуром техногенной зоны и могут быть представлены квазилинейным уравнением с частными производными второго порядка с двумя неизвестными переменными x и y вида

$$a_{11} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + 2a_{12} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \partial y} + a_{22} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + B = 0, \quad (2)$$

где a_{11} , a_{12} , a_{22} и B – функция от x , y , θ , $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ и $\frac{\partial \theta}{\partial y}$.

Предполагается, что все встречающиеся функции и их производные непрерывные.

Кривые изолиний напряжений техногенной зоны и опорного давления лавы соприкасаются в плоскости O_{xy} и выражаются уравнениями

$$x = x(\tau); \quad y = y(\tau),$$

подчиняясь краевым условиям типа Коши при заданных граничных значениях нормальной производной $\partial \theta / \partial n$.

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2}} \left(q \frac{dx}{d\tau} - \rho \frac{dy}{d\tau} \right) = P(\tau),$$

$$\theta = z(\tau); \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = P(\tau); \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = q(\tau). \quad (3)$$

Решая уравнения (3) вместе с условиями $\frac{\partial z}{\partial \theta} = P \frac{dx}{d\tau} + q \frac{dy}{d\tau}$, найдем $P(\tau)q(\tau)$.

Приняв расположение дополнительной выработки и очистного забоя прямолинейным, контур области пересечения будет выражаться линейным уравнением (2), где a_{11} , a_{12} , a_{22} и B не зависят от z , p и q . Характеристики определяются независимо от выбора z , p и q , т.е. независимо от интегральной поверхности.

В зоне объединения рабочего пространства лавы с выработкой подвигание очистного забоя в выемочном столбе приводит к волновому изменению напряжений во вмещающих породах. В зависимости от угла встречи линии очистного забоя с продольной осью дополнительной выработки область изменения напряжения во вмещающих породах будет волнообразно перемещаться от одной подготовительной выработки к другой. Данное перемещение напряжений можно представить одномерным волновым гиперболическим дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial t^2} = 0.$$

С общим решением пары бегущих волн, распространяющихся соответственно вправо и влево вдоль оси Ox с постоянной скоростью c

$$\theta(x,t) = \theta_1(x - ct) + \theta_2(x + ct).$$

Характеристики $(x \pm ct) - const$ есть геометрическое место точек постоянной фазы.

ВЫВОДЫ

Таким образом, при объединении рабочего пространства лавы с протяженной дополнительной выработкой в столбовой системе разработки область напряжений в

плоскости кровли угольного пласта определяется как риманова поверхность, ограниченная жордановой дугой, перемещение которой по ширине выемочного столба происходит по гиперболической кривой относительно выемочных выработок.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринько Н.К. Обеспечение нагрузки на очистной забой 2 – 3 млн т угля в год на шахтах России / Н.К. Гринько, Л.Н. Гапанович, О.Б. Батурин // Уголь. – 1998. – № 5 – С. 15 – 18.
2. Угольная промышленность США глазами немецких специалистов // Уголь. – 1997. – № 3. – С. 69 – 74.
3. Грищенков Н.Н. Прогнозирование главных напряжений и деформаций массива горных пород в зонах влияния очистных работ / Н.Н. Грищенков, А.Н. Грищенков // Проблемы горного давления. – Донецк: ДонНТУ, 2000. – № 4. – С. 135 – 143.
4. Булат А.Ф. Напряженно-деформированное состояние анизотропного породного массива при отработке угольных пластов / Булат А.Ф., Витушко О.В., Гоман О.Г. – Д.: Полиграфист, 2000. – 216 с.
5. Подорванов А.А., Демченко В.Б. К учету влияния свойств подрабатываемого массива на его сдвигения / А.А. Подорванов, В.Б. Демченко // Геотехническая механика: сб. науч. тр. ИГТМ НАНУ. – Д., 2001. – Вып. 27. – С. 49 – 51.
6. Характер изменения горного давления в региональной зоне разгрузки при бесцеликовой отработке запасов / И.А. Ефремов, И.И. Пожытько, Б.В. Бокий [и др.] // Геотехническая механика: сб. науч. тр. ИГТМ НАНУ. – Д., 2003. – Вып. 44. – С. 78 – 90.
7. Зборщик М.П. Обеспечение устойчивости участковых подготовительных выработок при отработке пологих пластов на больших глубинах / М.П. Зборщик // Уголь Украины. – 2006. – № 1. – С. 18 – 22.
8. Формирование разгруженной зоны вокруг выемочных выработок / Е.И. Кольчик, А.И. Демченко,

И.Е. Кольчик [и др.] // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2005. – № 1. – С. 10 – 15.

9. Кузьменко А.М. Исследование взаимодействия техногенной среды с очистными работами при подземной разработке тонких угольных пластов / А.М. Кузьменко, А.А. Козлов, А.В. Хейло // Сб. науч. тр. НГУ. – Д., 2011. – № 32. – С. 38 – 44.

10. Кольчик Е.И. Определение параметров зоны влияния очистной выемки при больших скоростях подвигания лав / Е.И. Кольчик // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецк. – 2007. – № 2. – С. 17 – 21.

11. Панфилова Д.В. Распределение нагрузок на крепь по длине очистного забоя / Д.В. Панфилова, А.В. Ремезов // Уголь. – 2008. – № 11. – С. 10 – 11.

12. Колоколов О.В. Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на концевых участках лавы / О.В. Колоколов, А.М. Кузьменко, Н.А. Лубинец // Уголь Украины. – 1994. – № 4. – С. 15 – 19.

13. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Абрамовича. – М.: Наука, 1974. – 831 с.

ОБ АВТОРАХ

Кузьменко Александр Михайлович – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета

Хейло Александр Валериевич – горный инженер, генеральный директор ЧАО «Энерго Инвест Холдинг».

Козлов Алексей Анатольевич – горный инженер, генеральный директор шахты «Краснолиманская».