

С.Ф. Власов, В.С. Власов

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

В статье обоснована необходимость использования трехмерной модели трансверсально-изотропного массива горных пород для изучения и уточнения закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния вокруг очистной выработки. Обоснованы параметры трехмерного моделирования массива горных пород для условий шахт Западного Донбасса.

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАВКОЛО ОЧИСНИХ І ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК

У статті обґрунтовано необхідність використання тривимірної моделі трансверсально-ізо­т­ро­п­но­го масиву гірських порід для вивчення й уточнення закономірностей розподілу напружено-деформованого стану навколо очисної виробки. Обґрунтовано параметри тривимірного моделювання масиву гірських порід для умов шахт Західного Донбасу.

SUBSTANTIATION OF VOLUMETRIC MODELING OF ROCK MASSIF AROUND MINE WORKING AND DEVELOPMENT WORKINGS

The necessity of a three-dimensional model use of a layered transversal-isotropic rock massif for studying and specification of strain-stress state laws around the mine working is substantiated in the article. Parameters of three-dimensional modeling of the rock massif for Western Donbas conditions are also substantiated.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день основной особенностью ведения горных работ в украинской части Донецкого угольного бассейна является то, что средняя глубина разработки превышает 700 м, максимальная при этом достигает 1200 м. В связи с этим определился широкий круг горнотехнических проблем, связанных с негативными проявлениями горного давления в подготовительных выработках и очистных

забоях, которые, в свою очередь, существенно снижают добычу угля, увеличивают себестоимость и существенно повышают уровень производственного травматизма. Применение как активных, так и пассивных способов управления горным давлением в выработках требует знания закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород вдоль лавы и вдоль выемочного столба.

На современном уровне развития горной науки и методов изучения НДС вокруг очистных и подготовительных выработок основным и наиболее эффективным способом прогнозирования состояния массива горных пород является метод моделирования геомеханических процессов, которые происходят вследствие ведения горных работ. Данный вопрос исследовали при помощи физических, математических, феноменологических, компьютерных и других моделей такие ученые как А.А. Борисов, А.Н. Динник, М.А. Иофис, Г.Н. Кузнецов, Л.В. Новикова, А.В. Савостьянов, В.Д. Слесарев, М.С. Четверик, А.Н. Шашенко. Однако любая модель – это детерминированное представление того или иного реального объекта или процесса, и чем меньше будет использовано упрощений при построении модели, тем более она будет соответствовать реальности. Обзор современных подходов к моделированию геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород, позволяет выделить основные принципиальные недостатки, которые в той или иной мере снижают практическую ценность полученных результатов и сужают область эффективного применения того или иного подхода. Среди них можно выделить:

1. Моделирование производится для плоской постановки задачи. Реальные процессы протекают в горном массиве, который имеет три измерения, а значит, горные породы находятся не в плосконапряженном, а в плоскодеформированном состоянии.

2. Горный массив моделируют сплошной средой. Реальный горный массив представляет собой совокупность литологических разностей, которые находятся в постоянном взаимодействии между собой.

3. Горные породы представляются изотропным материалом с усредненными физико-механическими свойствами. Реальные горные породы в общем случае проявляют анизотропные свойства, но с большой точностью могут быть описаны моделью трансверсально-изотропной среды, которая характеризуется пятью независимыми упругими константами.

4. Отсутствие учета влияния крепи на распределение НДС вокруг выработок. Реальная крепь обладает определенной жесткостью и оказывает влияние на распределение зон повышенного и пониженного горного давления.

5. Моделирование производится для ограниченной части горного массива, который непосредственно примыкает к моделируемому объекту (горной выработке). В реальных условиях в формировании НДС участвует вся надугольная толща вмещающих обрабатываемый пласт горных пород.

В сложившихся экономических условиях функционирования горнодобывающие предприятия предъявляют все более и более жесткие требования к точности выполняемых расчетов параметров НДС массива, необходимых для применения эффективных способов управления состоянием массива горных пород, что является неотъемлемой частью использования высокоэффективных технологий ведения горных работ и современной высокопродуктивной горной техники.

На современном этапе развития горной науки и компьютерных технологий наибольший интерес представляют теоретические исследования с применением математических моделей геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород.

Цель статьи – обосновать параметры трехмерной модели слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород для изучения закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния вокруг очистной выработки.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Обоснование геометрических параметров модели. Геометрические параметры модели зависят, прежде всего, от размеров зоны влияния очистных работ на массив горных пород. Для правильного определения этих параметров необходимо использовать данные многолетних марк-

шейдерских наблюдений и рекомендации нормативно-правовых документов, которые регламентируют порядок определения этой зоны. В настоящее время в Украине юридическую силу имеют «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» [1], согласно которым границы влияния очистной выработки на земную поверхность (мульды сдвижения) определяются граничными углами. Различают граничные углы по простиранию δ_0 , по падению β_0 и по восстанию γ_0 пласта. Значения граничных углов условий Западного Донбасса согласно [1] принимаются $\delta_0 = \gamma_0 = \beta_0 = 65^\circ$.

Руководствуясь [1] можно определить геометрические размеры модели в плане. Вертикальные размеры модели принимаются из условия моделирования всей толщи горных пород, которые непосредственно участвуют в формировании НДС массива вокруг очистной выработки, т.е. всех литологических разностей от пласта до земной поверхности и не менее пятидесятикратной мощности вынимаемого слоя вглубь подстилающего угольный пласт массива. Согласно [1] зона влияния очистной выработки на породы почвы пласта распространяется не более чем на 50 вынимаемых мощностей.

На рис. 1 и 2 представлены расчетные схемы для определения геометрических параметров модели в плане.

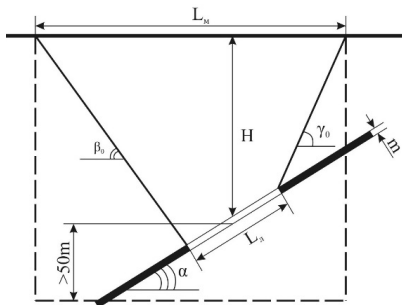


Рис. 1. Главное сечение мульды сдвижения по падению пласта

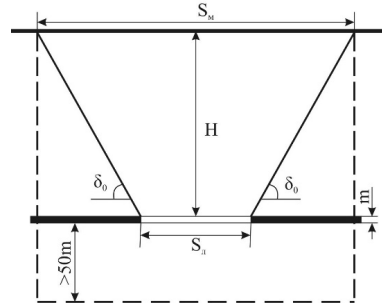


Рис. 2. Главное сечение мульды сдвижения по простиранию пласта

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 1, была получена формула для определения горизонтального размера модели по направлению вкrest подвигания очистного забоя

$$L_M \geq L_L \left[\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \sin(2\alpha + \gamma_0 - \beta_0)}{2 \sin(\beta_0 - \alpha) \sin(\gamma_0 + \alpha)} \right] + H \frac{\sin(\gamma_0 + \beta_0)}{2 \sin(\beta_0 - \alpha) \sin(\gamma_0 + \alpha)}, \quad (1)$$

где L_M – горизонтальный размер модели по направлению вкrest подвигания очистного забоя, м;

L_L – длина лавы, м;

γ_0, β_0 – граничные углы сдвижения по падению пласта, град;

α – угол падения пласта, град;

H – расстояние от середины лавы до земной поверхности, м.

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 2, была получена формула для определения горизонтального размера модели по направлению подвигания очистного забоя

$$S_M \geq S_L + 2H \operatorname{ctg} \delta_0, \quad (2)$$

где S_M – горизонтальный размер модели по направлению подвигания очистного забоя, м;

S_L – подвигание очистного забоя, м;

δ_0 – граничный угол сдвижения по простиранию пласта, град;

H – расстояние от середины лавы до земной поверхности, м.

Вертикальные размеры модели массива горных пород должны удовлетворять выражению

$$Z \geq H + 50m, \quad (3)$$

где m – вынимаемая мощность пласта, м.

Для условий Западного Донбасса с учетом того, что $\delta_0 = \gamma_0 = \beta_0 = 65^\circ$ и принимая $\alpha \approx 0^\circ$, формулы (1) и (2) могут быть переписаны в виде

$$L_M \geq L_L + 0,93H \approx L_L + H; \quad (4)$$

$$S_M \geq S_L + 0,93H \approx S_L + H. \quad (5)$$

Диапазон глубин пластов принятых к разработке в ПАО «ДТЭК Павлоград-уголь», колеблется в пределах 230 – 700 м, длины механизированных лав изменяются от 180 до 220 м.

Физико-механические характеристики горных пород, вмещающих угольный пласт. Горные породы имеют весьма сложные физико-механические свойства, зависящие от их вещественного и гранулометрического состава, условий залегания и происходивших во время их формирования геологических процессов.

В общем случае физико-механические характеристики по различным направлениям в массиве пород различны, т.е. горные породы проявляют анизотропию свойств, и в связи с этим изменяется характер распределения напряжений вокруг выработок.

Слоистость, напластование, перемежаемость пород с различными механическими свойствами могут обуславливать механическую анизотропность массива, несмотря на то, что каждая из пород, слагающих толщу, является по данным испытаний образцов механически изотропной. Эта анизотропность связана с существенным различием механических свойств на контактах между слоями и пластами сла-

гающих толщу пород [2].

В настоящее время разработана теория упругости анизотропной среды, позволяющая вычислять напряжения вокруг отверстий различной конфигурации. Известен ряд работ о распределении напряжений вокруг отверстий круговой, эллиптической, прямоугольной и других форм при различных случаях анизотропии. Однако лишь отдельные теоретические решения доведены непосредственно до числовых значений с учетом реальных свойств деформирующейся среды, в частности для горных пород.

Важное практическое значение имеет частный случай анизотропии, когда массив горных пород может быть представлен упругой средой, в каждой точке которой имеется одно главное направление и бесконечное множество главных направлений в плоскости, нормальной к первому. Подобный тип анизотропии называют трансверсально-изотропным. Он характерен для тонкослоистых осадочных, метаморфических пород, слюд, пегматитовых тел и др. При этом деформирование может быть охарактеризовано с помощью пяти независимых констант, определяющих связь между напряжениями и деформациями [3].

Учитывая то, что для большинства горных пород наблюдается практически линейная зависимость между приращениями деформаций и напряжений, уравнения обобщенного закона Гука для упругого трансверсально-изотропного массива можно записать в виде

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_1} (\sigma_x - \mu_1 \sigma_y - \mu_1 \sigma_z); \gamma_{yz} = \frac{1}{G_2} \tau_{yz}; \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E_1} (\sigma_y - \mu_1 \sigma_x - \mu_1 \sigma_z); \gamma_{zx} = \frac{1}{G_2} \tau_{zx}; \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E_1} \left(\frac{E_1}{E_2} \sigma_z - \mu_1 \sigma_y - \mu_1 \sigma_x \right); \gamma_{xy} = \frac{1}{G_2} \tau_{xy}. \end{cases}$$

Здесь E_1 и E_2 – модули упругости в плоскости слоев и в направлении, нормальном к ним. Коэффициент поперечных

деформаций μ_1 характеризует отношение продольных и поперечных деформаций в плоскости слоев, а μ_2 – отношение соответствующих деформаций в плоскости, нормальной к напластованию. Модули сдвига G_1 и G_2 являются коэффициентами пропорциональности между касательными напряжениями τ и сдвиговыми деформациями γ соответственно в плоскостях слоев и в плоскости, нормальной к ним. При этом модуль G_1 может быть выражен через E_1 и μ_1 с помощью известного соотношения

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)}.$$

Модуль G_2 для анизотропного тела является величиной независимой и не может быть точно определен через другие постоянные. Вместе с тем для модуля G_2 в работе [4] была получена приближенная формула, которая позволяет с достаточной для практических расчетов точностью оп-

ределить модуль G_2 для подавляющего большинства горных пород

$$G_2 = \frac{E_1 E_2}{(E_1 + E_2 + 2\mu_1 E_2)}. \quad (6)$$

Следует заметить, что на возможную связь упругих постоянных в виде (6) для некоторых ортотропных тел указывал в 1863 г. Б. Сен-Венан, в 1935 г. ее использовал в расчетах по оценке напряженно-деформированного состояния скальных пород под сооружениями К. Вольф, в 1954 г. – К.В. Руппенейт для оценки влияния анизотропии пород на концентрацию напряжений на контуре эллиптического отверстия. Расчеты по формуле (6) показали хорошую сходимость экспериментальных и расчетных значений для G_2 [4].

Коэффициент анизотропии K_a для пород Западного Донбасса по данным В.Т. Глушко [5], изменяется в пределах 1 – 5 (табл. 1).

КОЭФФИЦИЕНТ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ПОРОД ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

Таблица 1

| Значение K_a | Количество проб, % для каждого литологического типа | | |
|-------------------|---|-----------|----------|
| | песчаник | алевролит | аргиллит |
| $K_a < 1,2$ | 78,4 | 13,55 | 6,20 |
| $1 < K_a < 1,5$ | 7,2 | 44,50 | 18,75 |
| $1,5 < K_a < 2,0$ | 7,2 | 24,45 | 17,90 |
| $K_a > 2,0$ | 7,2 | 17,65 | 53,55 |

Коэффициент K_a связан с модулями упругости выражением [2]

$$K_a = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}.$$

Для усредненных условий Западного Донбасса все физико-механические свойства горных пород, необходимые для построения математической модели упругого

трансверсально-изотропного горного массива, были сведены в табл. 2.

Параметры материала, моделирующего крепь очистных и подготовительных выработок. Для получения реальной картины распределения НДС массива вокруг очистной выработки необходимо учитывать влияние работы крепи как очистных, так и подготовительных выработок с вмещающими горными породами. Однако соотношение геометрических параметров

крепи и рассматриваемой области горного массива (см. формулы (1 – 5)) не позволяет моделировать крепь в состоянии «как есть». Поэтому реальную крепь, состоящую из совокупности отдельных модулей (секции механизированной крепи для очистного

забоя и крепежные рамы для подготовительных выработок), в модели предложено заменить сплошным эквивалентным материалом с деформационно-прочностными характеристиками, соответствующими работе реальной крепи.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД
ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

Таблица 2

| Наименование пород | E_1 , ГПа | E_2 , ГПа | μ_1 | μ_2 | G_1 , ГПа | G_2 , ГПа | $\sigma_{сж}$, МПа | σ_p , МПа | ρ , кг/м ³ |
|--------------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|---------------------|------------------|----------------------------|
| Уголь | 39,00 | 32,00 | 0,25 | 0,27 | 24,38 | 13,56 | 35,00 | 4,00 | 1320 |
| Алевролит | 19,70 | 10,00 | 0,28 | 0,25 | 12,61 | 4,98 | 28,00 | 2,00 | 2510 |
| Аргиллит | 20,00 | 8,00 | 0,23 | 0,21 | 12,30 | 4,40 | 21,30 | 1,50 | 2370 |
| Сланец песчанистый | 25,20 | 16,80 | 0,22 | 0,20 | 15,37 | 8,13 | 27,40 | 2,80 | 2540 |
| Сланец глинистый | 11,60 | 7,10 | 0,30 | 0,27 | 7,54 | 3,30 | 17,00 | 1,20 | 2290 |
| Песчаник | 25,60 | 20,50 | 0,29 | 0,26 | 16,51 | 8,83 | 32,50 | 3,00 | 2600 |

Индекс 1 соответствует плоскости изотропии.

Индекс 2 соответствует нормали к плоскости изотропии.

Моделирование крепи подготовительной выработки. В качестве крепи подготовительных выработок на шахтах Украины нашли широкое применение арочные податливые крепи, изготовленные из стали горячекатаной профильной типа СВП. Для условий Западного Донбасса было научно обосновано применение разновидности трехзвенной арочной податливой крепи, которая получила название КШПУ [6]. Сопротивление одной рамы крепи КШПУ из СВП-27 не превышает 400 кН, при этом максимальная возможная конструктивная податливость составляет 300 мм. На основе вышеуказанных силовых и деформационных характеристик реальной крепи может быть построена зависимость между напряжением и деформацией для эквивалентного материала, который должен моделировать работу крепи подготовительной выработки. С достаточной для практических расчетов точностью аналитически эта зависимость может быть описана следующим выражением

$$E = \frac{Pca}{bh}, \text{ кПа,}$$

где P – сопротивление одной арки крепи, кН;

c – конструктивная максимальная податливость, м;

a – шаг установки крепи, рам/м;

b – ширина выработки, м;

h – высота выработки, м.

Для крепи КШПУ из СВП-27 $E \approx 1000$ кПа.

Моделирование крепи очистной выработки. В настоящее время на шахтах Украины добыча угля производится механизированными лавами, которые оснащены забойными комплексами. В своем большинстве механизированные комплексы представлены следующими типами КД-80, МКД-90, МКД-90Г, КДМ и др. Основной составной частью каждого комплекса является гидрофицированная крепь. К силовым элементам крепи относятся гидравлические стойки, в которых каждая секция мехкрепи насчитывает две или четыре в

зависимости от конструкции. Основной режим работы гидравлической стойки – это режим постоянного сопротивления. В номинальном режиме работы каждая секция механизированной крепи КД-80 постоянно оказывает давление на кровлю порядка 2,5 МПа, на почву – 3,0 МПа. Давление на вмещающие пласт породы передается через жесткую плиту, которая для крепи КД-80 имеет размеры 1,3×1,5 м (площадь около 2 м²) и расположена на расстоянии 2,5 м от груди забоя.

При построении модели для корректного учета работы механизированной крепи необходимо задавать вышеуказанные силовые и геометрические параметры.

Моделирование трещиноватости горного массива. Хотя в земной коре встречаются массивы практически нетрещиноватых пород, однако, как правило, скальные и полускальные породы разбиты тремя или более системами трещин. На глубине эти трещины могут быть плотно сомкнуты, и в

их плоскостях может сохраняться значительное сцепление – до 20 – 30% от сцепления в сплошном теле. Трещины могут быть раскрытые, заполненные милонитом или зияющие. В зонах тектонического дробления густота трещин может возрастать вплоть до щебнеобразного состояния породы. Трещиноватый массив можно рассматривать как некогда монолитный и подвергнутый за пределом деформирования до определенной степени, предельный график которого находится где-то в промежутке между предельным графиком монолита и графиком остаточной прочности. В зависимости от степени трещиноватости сцепление массива будет составлять некоторую долю λ от сцепления образца. Показатель λ называют коэффициентом структурного ослабления.

В табл. 3 приведены ориентировочные значения коэффициента структурного ослабления для различных пород [7].

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТРУКТУРНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ

Таблица 3

| Характеристика породы | Коэффициент структурного ослабления при прочности пород на сжатие в образце (МПа) | | | |
|---|---|--------|---------|------|
| | < 2 | 2 – 10 | 10 – 40 | > 40 |
| Без четко видимой трещиноватости | 0,90 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| Плотного сложения с нормальносекущей трещиноватостью | 0,50 | 0,40 | 0,35 | 0,30 |
| Плотного сложения с прерывистыми кососекущими трещинами | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,15 |
| С нарушенной структурой | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,03 |

Малотрещиноватые массивы с высокими значениями коэффициента структурного ослабления ($\lambda > 0,25$) сохраняют основные свойства монолитных образцов, в частности хрупкость, разупрочнение в предельной области деформирования, склонность к динамическому разрушению [7].

Системы основных трещин характерных для рассматриваемой области массива горных пород могут быть смоделированы секущими плоскостями, которые пересекают моделируемые горные породы в за-

висимости от ориентации трещин в натуре. Причем на контакте поверхностей задаются условия взаимодействия пород. Как правило, такое взаимодействие учитывается коэффициентом трения покоя для пары «порода – порода», но в зависимости от реальных условий могут быть рассмотрены различные варианты сопряжений с определенной контактной прочностью. По такой же схеме учитываются условия взаимодействия на контакте слоев, слагающих моделируемый массив горных пород.

Коэффициенты трения для пары «порода – порода» детально изучены Л.И. Бароном и представлены в [8]. На основании [8]

для горных пород, характерных в условиях Западного Донбасса, была составлена табл. 4.

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОКОЯ ДЛЯ ПАРЫ «ПОРОДА – ПОРОДА»

Таблица 4

| Горная порода | f_{II} | Горная порода | f_{II} |
|----------------|-------------|--------------------|-------------|
| Каменный уголь | 0,40 – 0,45 | Сланец песчанистый | 0,38 – 0,41 |
| Алевролит | 0,35 – 0,39 | Сланец глинистый | 0,36 – 0,40 |
| Аргиллит | 0,33 – 0,37 | Песчаник | 0,38 – 0,42 |

Как видно из табл. 4, коэффициент трения покоя для всех типов пород с достаточной для практических расчетов точностью может быть принят $f_{II} = 0,35 – 0,40$.

ВЫВОДЫ

Трехмерная модель слоистого трансверсально-изотропного массива горных пород, учитывающая влияние силовых характеристик крепи, позволит уточнить закономерности распределения напряженно-деформированного состояния массива во

круг очистной выработки. Обоснованные параметры моделирования позволяют наиболее адекватно отобразить процессы, происходящие в горном массиве, что позволит уточнить параметры зон опорного горного давления и зон разгрузки. Полученные в результате моделирования данные могут быть использованы для выбора и обоснования эффективного способа управления состоянием массива горных пород вокруг очистной и подготовительных выработок.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / Министерство угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
2. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
3. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1977. – 503 с.
4. Батугин С.А. Анизотропия массива горных пород / С.А. Батугин. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1988. – 82 с.
5. Глушко В.Т. Проявление горного давления в глубоких шахтах / Глушко В.Т. – К.: Наукова думка, 1971. – 196 с.

6. Инструкция по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса. – СПб. – Павлоград: ВНИМИ, 1994.

7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

8. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород / Л.И. Барон. – М.: Наука, 1967. – 208 с.

ОБ АВТОРАХ

Власов Сергей Федорович – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Власов Владислав Сергеевич – студент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Национального горного университета.