УДК 622.273.2: 622.831

А.П.ГОСПОДАРИКОВ, С.Е.МАНСУРОВА, А.В.МОНТИКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ АНАЛИЗА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ

Приведен алгоритм выбора математической модели массива горных пород. В качестве метода численного решения применяется метод конечных разностей. Рассмотрен случай учета процесса нелинейного деформирования горных пород.

The algorithm of choice of a mathematical model of massif of the mountain rock is taken in the work. As a method of numerical decision is applied the method of final difference. The case of the accounting of process of illinear deformation of the mountain rock is examined.

Процесс разрушения угольного целика и вмещающего его массива горных пород очень сложный и состоит из нескольких этапов. Во-первых, происходит раздавливание угольного пласта или наиболее слабых породных прослойков. Внешние признаки раздавливания, в основном, проявляются в отжиме краевой части или резком скачке конвергенции (деформации) кровли и почвы. К основным причинам такого разрушения относят растяжение и срез. Во-вторых, отметим, что при раздавливании целика разрушается не только угольный пласт, но и вмещающий его массив. Кроме того, глубина разрушений в кровлю и почву может быть соизмерима с размером самого целика в плане. Основной причиной таких глубинных разрушений массива горных пород является действие предельных касательных напряжений. Именно такие глубинные разрушения массива приводят к выделению основной части метана в выработанное пространство. Таким образом, необходимо создание достаточно простой в прикладном плане геомеханической модели рассматриваемого процесса, которая бы учитывала указанные моменты разрушения*.

Сложность задачи по определению запредельного деформирования целика также связана с необходимостью рассмотрения ее на основе пространственной теории упругости и с учетом произвольной конфигурации выработанных пространств, в том числе, и по сближенным пластам.

В этом случае решение поставленной задачи возможно только с помощью численных методов, таких как метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод конечных разностей и т.д. Однако надо иметь в виду, что в процессе численного моделирования развития напряженно-деформированного состояния целика необходимо перемещать очистной забой несколько раз. Последний факт резко усложняет поставленную задачу и увеличивает время ее численного решения.

Принимая во внимание все перечисленные обстоятельства, для решения поставленной задачи была выбрана математическая модель массива горных пород в виде плиты-кровли, опирающейся на упругое основание с заданным (произвольным) распределением его жесткости**.

---

* *Борисов А.А.* Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.

** *Власов В.З.* Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З.Власов, Н.Н.Леонтьев. М.: Физматгиз, 1960. 491 с.

Учитывая необходимость получения достаточно простых прикладных инженерных методов решения подобных задач геомеханики, в работе предложен следующий (численный) подход.

Рассмотрим область массива горных пород, затронутую очистными работами. Тогда перекрывающие выработанное пространство слои пород (в общем случае неоднородные) можно представить как плиту мощностью h, лежащую на неоднородном упругом основании. Жесткость этого основания принимает максимальное значение в нетронутом массиве K_1 и минимальна над выработанным и обрушенным пространством K_2.

В местах закладки и других искусственных сооружений жесткость основания имеет промежуточное значение. Толщина породного слоя, перекрывающего выработанное пространство и определяющего перераспределение горного давления, составляет, как правило, 25-50 м. По сравнению с характерной шириной минимального выработанного пространства, образованного отработкой одной лавы, толщина определяющего слоя в 5-10 раз меньше. Этот факт дает основание рассматривать указанный слой как тонкую плиту, опирающуюся на неоднородное основание и пригруженную весом вышележащей толщи. Прогибы такой плиты описываются дифференциальным уравнением*:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} = \frac{q - Ku}{D}, \qquad (1)$$

где $u = u(x, y)$ – прогибы точек плиты; q – нормальная к срединной плоскости и распределенная по поверхности плиты пригрузка от вышележащей толщи; K – коэффициент жесткости основания, зависящий от наличия или отсутствия выработанного пространства; $D = Eh^3 / [12(1-\mu^2)]$ – цилиндрическая жесткость плиты; h, E, μ – мощность плиты, модуль деформации и коэффициент Пуассона вмещающих пород соответственно.

Применяя конечно-разностную аппроксимацию для уравнения (1), получим систему линейных алгебраических уравнений. Численные значения прогибов в точках сетки аппроксимации позволяют вычислять параметры напряженно-деформируемого состояния: контактное давление для оценки зон повышенного горного давления и опорного давления, зон разрушений; изгибающие моменты для оценки разрушений плиты-кровли от нормальных напряжений, как правило, определяющие предельное состояние горных пород; крутящий момент и поперечные перерезывающие силы для определения предельного состояния плиты-кровли по касательным нагрузкам.

Все эти силовые характеристики после решения численного аналога дифференциального уравнения (1) вычисляются по формулам

$$\begin{cases} M_x = -D\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right); \\ M_y = -D\left(\mu\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right); \\ M_{xy} = -D(1-\mu)\dfrac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}; \\ Q_x = -D\left(\dfrac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \dfrac{\partial^3 u}{\partial x \partial y^2}\right); \\ Q_y = -D\left(\dfrac{\partial^3 u}{\partial y^3} + \dfrac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y}\right). \end{cases} \qquad (2)$$

Получив паспорт прочности пород кровли, можно далее определить на основе полученных силовых характеристик (2) плиты-кровли и возможное запредельное состояние в любой расчетной точке вычислительной сетки.

Для получения пространственного распределения зон повышенной трещиноватости в алгоритме расчета корректируются жесткости пласта и пород кровли в зависимости от того, перешли ли они в запредельное состояние или нет. Процедура анализа предельного состояния пласта основана на известном из физики горных пород факте, что степень нелинейного (после упругого)

* См. *Власов В.З....*

деформирования горных пород зависит от разности главных нормальных напряжений в данном объеме массива или образца и от среднего уровня нормальных напряжений (чем больше разность нормальных напряжений, тем больше нелинейное запредельное деформирование; чем выше средний уровень давления, тем эта нелинейная прибавка меньше). Известно, что процесс деформирования породы вплоть до момента ее разрушения определяется, в основном, разностью главных нормальных напряжений и коэффициентом бокового распора. С увеличением среднего уровня напряжений порода способна выдержать большую разность главных нормальных напряжений и большую деформацию к моменту разрушения.

Для реализации нелинейного поведения породы поступаем следующим образом: после очередного этапа расчета напряжений в пласте, а также силовых характеристик плиты-кровли, в каждой точке ее основания вычисляется среднее давление и средняя разность нормального давления, получаемые по выбранному вычислительному шаблону, охватывающему близлежащие точки разностной схемы к рассматриваемой точке основания.

Таким образом, чем больше разница нормальных напряжений в точке и чем меньше уровень горного давления, тем меньше корректируется в меньшую сторону жесткость основания плиты и тем выше ее податливость.

Все это отражает процесс раздавливания основания и отжим краевой части пласта. Кроме анализа отжима пласта и его краевых частей одновременно проводилась проверка плиты-кровли на предельное состояние. Достаточно точно установлено, что разрушение горного массива при объемном напряженном состоянии хорошо описывается энергетической теорией прочности:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau^2} < \sigma_{кр}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение, при котором наступает разрушение массива; σ_n – максимальное нормальное напряжение в плите, вызванное ее изгибом в выработанное пространство после выемки угля; τ – максимальное касательное напряжение, вызванное кручением плиты-кровли и перерезывающими усилиями.

В работе учитывалась максимальная сумма напряжений от кручения и среза (в срединной плоскости плиты); такой учет суммы касательных напряжений идет в запас надежности расчета степени трещиноватости, составляющий 5-8 %, согласно доле касательных напряжений от среза по отношению к тем, что вызваны кручением.

Таким образом, особенность разработанного вычислительного алгоритма состоит в том, что на основе имеющихся шахтных наблюдений (при известных исходных условиях) могут быть с высокой достоверностью определены критические размеры целиков при различных конфигурациях выработанного пространства. Все это дает возможность откалибровать выбранную вычислительную модель и построить ее параметры так, чтобы она прогнозировала разрушение целика адекватно эксперименту.