

УДК 55.681.3

**И.А. Пасечник, В.М. Шек**

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Рассмотрены различные методы и способы моделирования поведения очистных выработок в шахтах, указаны их недостатки. Проанализированы основные существующие теории. Определены основные факторы, влияющие на обрушение горных пород; их использование в различных теориях прочности.*

*Ключевые слова: моделирование, горный массив, обрушение горной породы, теория прочности, пласт, забой, шахта.*

**Семинар № 14**

---

**Г**лавными задачами деятельности всех рудников и шахт являются максимизация экономических показателей производства и повышение безопасности труда шахтеров. Повышение эффективность добывающих работ в угольных забоях может быть достигнута путем прогнозирования процессов обрушения горных пород в поземных выработках, в виду изменений горного давления, в пластах ослабленных очистными работами. Моделирование данных процессов позволит определять оптимальную скорость продвижения добывающих комбайнов, определять необходимость использования крепей и их технические характеристики, определять максимально допустимые размеры очистного забоя. Эти факторы позволяют повысить объемы добываемого сырья. С другой стороны, обладая данными об изменениях давления внутри горных пород, залегающих над очистным забоем, можно принимать заблаговременные меры по предотвращению обрушения кровли в лавах и последующих за ними завалами, так как они наносят значительный материальный ущерб, снижают объемы добываемых полезных ископае-

емых и несут угрозу жизни горнорабочих. Так же, моделирование процессов обрушения горных пород даст возможность проводить оценку опасности перехода газа метана в газообразное состояние и опасность его распространения по шахте, что представляет угрозу для жизни и здоровья шахтеров, а в случае его воспламенения может привести к полной остановке основного производства на шахте.

Моделирование сплошной среды, возможно, проводить разными способами в зависимости от масштаба углубления в изучение объектов. При построении моделей среды в зависимости от целей изучения системы изменяют аппарат моделирования, вид моделей и применяемые компьютерные технологии, очевидно, что с усложнением целей досконального изучения сплошных сред увеличивается количество типов выделяемых элементов (объектов) и, соответственно, число элементов каждого типа, увеличивается множество характеристик этих объектов.

На сегодняшний день нет единого подхода к данному вопросу, причин тому несколько: во-первых, крайне

сложная структура горных объектов, моделирование любой шахты или рудника является, практически, уникальным проектом. Во-вторых, не было достаточного мощных программно-аппаратных комплексов для проведения большого числа расчетов в оперативном режиме. В третьих не существовало единой теоретической базы, на основе которой, хотя бы статично (без оперативного учета изменения состояния в выработке – размер обнаженной кровли, объем и тип пород залегающих над добычным комбайном и т.д.), но с высокой степенью вероятности можно было рассчитать тип деформации горной породы в очистном забое.

Тем не менее, многие видные ученые занимались исследованиями в данной области и добились различных результатов. Так широкое распространение получили несколько теорий оценки состояния опасности обрушения и прочности в горных массивах.

**Критерий Мора** отличается от других критериев прочности общностью. Он позволяет предсказать как возможность перехода тела из упругого состояния в пластическое, так и начало его хрупкого разрушения; при этом учитывается различное сопротивление материала растяжению и сжатию.

Критерий Мора основан на следующих положениях и постулатах:

1) если нарушение прочности среды происходит вследствие появления в ней скольжения, то предполагают, что такое скольжение возникает на площадках, проходящих через ось  $\sigma$  (ориентированное напряжение в элементарном объеме) в пространстве главных напряжений;

2) промежуточное главное напряжение  $\sigma$  не влияет на возникновение скольжения, поэтому можно ограни-

читься рассмотрением только одного большого круга Мора, построенного с использованием наибольшего и наименьшего главных напряжений;

3) если на некоторой площадке возникает скольжение, то на ней действуют предельные нормальное напряжение ( $\sigma_n$ ) и касательное напряжение ( $\tau_n$ ) напряжения, зависящие друг от друга;

4) для различных предельных напряженных состояний, характеризуемых кругами Мора, предельные точки образуют предельную огибающую, характерную для данного материала.

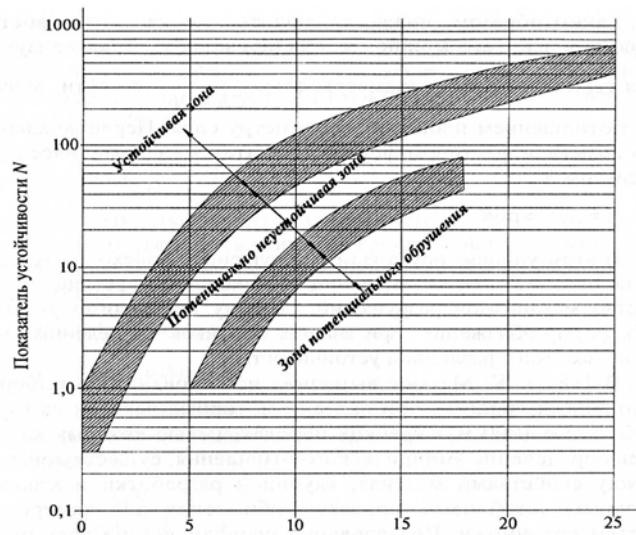
Функциональная запись критерия Мора имеет вид

$$\tau_n = f(\sigma_n)$$

и отражает тот факт, что пластическое течение или хрупкое разрушение материала наступает тогда, когда на некоторой площадке максимальное касательное напряжение  $\tau_n$  достигает критического значения  $f(\sigma_n)$ , зависящего от действующего на этой же площадке нормального напряжения  $\sigma_n$ .

Аналитическая зависимость критерия Мора используется в практических расчетах по допустимым напряжениям в условиях сложного напряженного состояния, причем наименьшая погрешность оценки предельного состояния наблюдается для смешанных напряженных состояний. Данное соотношение неприменимо для описания прочности сыпучих тел или тел с малым пределом прочности при растяжении.

Основные ограничения применимости критерия Мора связаны с невысокой точностью определения предельной огибающей в области всестороннего растяжения и отсутствием данных в области глубокого всестороннего сжатия. В указанных случаях вследствие принятых допущений о



**Рис. 1. График распределения зон устойчивости по Метьюсу**

прямолинейном характере предельной огибающей возможны существенные погрешности.

Еще одни методом оценки устойчивости горных пластов является метод **рейтинговых оценок**. К. Метьюс выполнил исследования по выбору устойчивых пролетов при подземных горных работах на глубине более 1000м в крепких породах (рисунок), целью которых являлось определение эмпирического отношения, существующего между свойствами массива, глубиной разработки и максимальным устойчивым пролетом обнажения для камерных систем разработки. В результате исследований была получена зависимость свойств горных пород, глубины проведения работ, размеров обнажений от их устойчивости. Показатель устойчивости  $N$  определялся с помощью четырех составляющих:

$$N = Q' * A * B^* C,$$

где  $Q'$  — модифицированный рейтинг массива горных пород  $NGI$ ;  $A$  — коэффициент давления (глубины работ);

$B$  — коэффициент ориентации нарушений;  $C$  — коэффициент ориентации поверхности обнажения.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * J_w,$$

где  $RQD$  — параметр качества породы;  $J_n$  — количество систем трещин;  $J_r$  — показатель шероховатости трещин;  $J_a$  — показатель сцепления поверхностей трещин;  $J_w$  — фактор сокращения прочности — по наличию воды в трещинах;

Коэффициент  $A$  — отношение прочности пород к возникающим в массиве напряжениям заменил показатель давления в массиве  $SRF$  для более точного

определения влияния напряжений, действующих в массиве вокруг выработок на больших глубинах. Здесь прочность образца заменяется на прочность массива на одноосное сжатие. Коэффициент  $B$  отражает наличие нескольких параллельных или пересекающихся зон нарушений или трещин. Коэффициент  $C$  учитывает давление на кровлю и стены выработок.

Фактор формы ( $S$ ) или гидравлический радиус определяется как отношение площади обнажения к его периметру. По графику пролетов обнажения массивы делятся на три зоны: устойчивые, неустойчивые и обрушаемые.

**Устойчивые зоны** — выработка устойчива и не нуждается в креплении (рекомендуется локальное крепление кровли во избежание вывалов).

**Неустойчивые зоны** — в выработках возможны локальные обрушения, в пределах свода естественного равновесия. Устойчивость обнажений

возможна при правильном ведении работ, ориентации забоя относительно существующих систем трещин и креплении выработок.

*Обрушающиеся зоны* — выработки будут обрушаться (необходимо усиленное крепление, характерны трудности при проходке).

В 1995 г. Стюарт и Форсайт опубликовали новый график на основе полученных опытных данных.

- *потенциально устойчивая зона*: область характеризуется высокой устойчивостью, при которой требуется лишь локальное анкерное крепление, разубоживание при обнажении боковых пород — минимально (до 10 %) при камерных системах;

- *потенциально неустойчивая зона*: для обнажений пород этой зоны требуется крепление; в случае если крепление нельзя установить, возможны незначительные обрушения, разубоживание от пород висячего бока — 10—30 %;

- *зона потенциально возможных значительных обрушений*: требуется усиленное крепление, возможны вывалы, стреляния, потери руды и разубоживание могут достигать 30 %;

- *зона потенциального обрушения*: крепление сложно осуществлять, обрушение достигает поверхности или устремляется далеко в глубь массива без образования свода.

Кроме двух методов описанных выше были рассмотрены и многие другие способы прогнозирования поведения горных выработок, ослабленных очистными работами. Анализу были подвергнуты критерий Баландина, трещиноватость, критерий Шлейхера — Надана, критерий длительной прочности, эффект «памяти» действовавших в массиве главных напряжений, устойчивые подрастания трещин при монотонном нагружении, эффект Грины, рост усталостных

трещин при циклическом нагружении, масштабный эффект, влияние температуры на вязкость разрушения, влияние скорости нагружения на вязкость разрушения, влияние внешней среды.

Выходом анализа стало заключение о том, что ни один критерии прочности не охватывает, все многообразие условий разрушения. Критерии прочности при описании разрушения во многих случаях дают удовлетворительные результаты, однако в ряде случаев их применение приводит к неверным результатам. Так, например, при циклических нагрузках с реализацией растягивающих и сжимающих напряжений, вызывающих явление усталости, данные критерии прочности и пластичности не позволяют определить, в каком цикле произойдет разрушение.

Разрушение хрупких и пластичных тел может происходить не только при высоких, но и при низких механических нагрузках, по прошествии достаточно длительного времени. В критериях фактор времени не учитывается.

При импульсном нагружении, когда значительную роль при пластическом течении и разрушении играют волновые процессы, способствующие проявлению хрупкого механизма разрушения в виде отколов и разрывов, применение критерии прочности также весьма затруднительно.

Во всех этих случаях необходимо учитывать последовательное накопление поврежденности, обусловленное характером предшествующего нагружения, а в качестве критерии предельных состояний следует использовать критерии сопротивления усталости, критерии длительной прочности и критерии роста трещин.

В Московском государственном горном университете в 2007 -2009x годах были разработаны программные продукты «Геолог» и «ГеоГлюс»,

которые служат для обработки первичных геологических данных. Основная задача формирование и ведение БД системы, а далее создание геологических моделей месторождений полезных ископаемых.

В данных программах была реализована принципиально новая эффективная технология обработки первичных геологических данных, использование которой позволяет значительно сократить затраты времени на ввод данных, обращение к ним и формирование геологических моделей.

С появлением данных программ вновь стало возможным вернуться к разработке *метода прогнозирования поведения горных пород во время ведения подземных добычных работ*. Оперативная обработка данных за установленный краткосрочные промежуток времен в купе с алгоритмами, отражающими взаимосвязь внутри горных пород, вполне, могут дать возможность с высокой долей вероятности предвидеть поведение пластов горных пород при проведении добычных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Основы физики горных пород* – Ржевский В.В., Новик Г.Я., М.: Недра, 1978.
2. *Геомеханика подземной разработки руд* – Казикаев Д.М., М.: Издательство МГГУ, 2005.
3. *Крепление подземных выработок* – Слесарев В.Д., М.: Гостоптехиздат, 1940.
4. *Создание комплекса геолого-маркшейдерских программ* - Шек В.М., Уголь, январь 2009, с. 51- 54.
5. *Повышение эффективности отработки запасов в глубоких шахтах* – Щадов М.И., Полухин В.А., Бовк А.И., Скобликов В.В., Уголь, январь 2009, с. 61- 64.
6. *Исследования проявления горного давления при отработке мощного пласта выпуском угля из подкровельной пачки*, группа авторов (Торро В.О.), Уголь, январь 2009, с. 64- 67. ГИАБ

#### Коротко об авторах

Пасечник И.А. – аспирант кафедры АСУ, [src@msmu.ru](mailto:src@msmu.ru);  
Шек В.М. – доктор технических наук, профессор кафедры АСУ, д.т.н.; [src@msmu.ru](mailto:src@msmu.ru);  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, [ud@msmu.ru](mailto:ud@msmu.ru)

