

УДК 622.272

**Б.Б. Луганцев, И.И. Мартыненко**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КРОВЛИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

*Описаны этапы построения фрактальной модели разрушения непосредственной кровли горной выработки, закреплённой анкерами. Приведены распределение напряжений в непосредственной кровле выработки и результаты расчётов вероятности её разрушения при различных комбинациях параметров анкерной крепи.*

---

**И**спользование фрактальной геометрии для моделирования трещиноватого породного массива обусловлено тем, что трещины имеют фрактальную природу. Нами разработан алгоритм построения фрактальной модели анизотропного породного массива.

Будем считать, что механические процессы, возникающие в породном массиве, находятся в условиях плоской деформации. Тогда реальную схему массива можно представить как тяжёлую полуплоскость, ослабленную отверстием (рис. 1, а).

В виду локального характера распределения напряжений в массиве поле гравитационных сил можно заменить полем геостатического давления ( $\sigma_1^\infty = \gamma H$ , где  $\gamma$  - удельный вес пород,  $H$  - глубина заложения выработки), вследствие чего расчетная схема массива представляется невесомой плоскостью с отверстием, находящейся в состоянии неравнокомпонентного сжатия на бесконечности. При этом концентрации распределённых нагрузок, действующих в вертикальном и горизонтальном направлениях, равны соответственно  $\sigma^\infty$  и  $\lambda\sigma^\infty$  (где  $\lambda$  - коэффициент бокового распора, рис. 1, б).

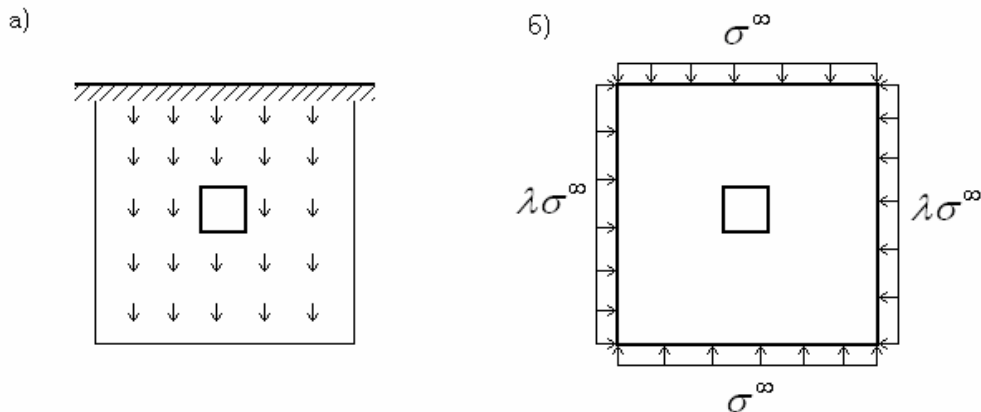
Следует отметить, что при увеличении характерного размера поперечного сечения выработки давление на крепь неограниченно возрастает.

Для оценки напряжённого состояния породного массива вокруг горной выработки необходимо решить задачу теории упругости о распределении напряжений в невесомой плоскости вблизи отверстия. Напряжения, действующие на бесконечности и на контуре отверстия, считаются заданными. Формулы Колосова-Мусхелишвили [1, широко применяемые при решении подобных задач, позволяют найти аналитическое представление для компонент поля напряжений.

Предложенная геомеханическая модель описывает структурно-механические особенности массивов горных пород и заключается в построении физических уравнений, связывающих поле напряжений и поле деформаций.

Геомеханическая модель учитывает трещиноватость пород на макроуровне, её физические уравнения не выявляют особенности той или иной системы трещин, а характеризуют эту систему как глобальное свойство массива.

После определения поля напряжений и геомеханической модели породного массива, становится возможным построение поля деформаций и поля смещений. Это позволяет выявить пло-



**Рис. 1. Плоская схема массива:** а – реальная; б - расчётная

шадки текучести и поверхности ослабления в массиве, по которым можно определить условные зоны нарушения сплошности и дать оценку устойчивости массива пород.

Далее, исходя из анализа напряженно-деформированного состояния, необходимо построить критерий, по которому в породном массиве появляются и развиваются системы трещин. Это требует задания определенного правила расчета коэффициента интенсивности напряжений.

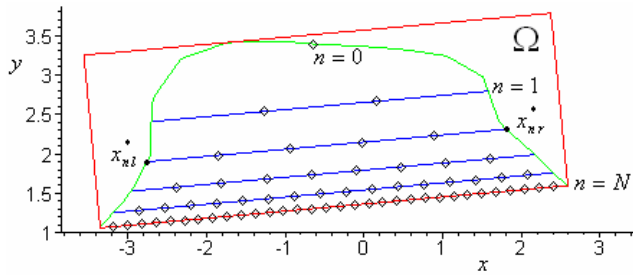
Методы макромеханики позволяют установить лишь генеральное направление распространения трещин в материале, тогда как фрактальная геометрия дает возможность более детально рассмотреть процесс возникновения и развития трещин. Так, как трещины имеют фрактальную природу наиболее распространенная модель трещины в виде математического разреза не в полной мере отвечает действительности. Вследствие этого предлагается аппроксимировать иррегулярные поверхности берегов трещин фрактальной кривой фон Кох [2].

Распространение области разрушения в горных породах, т.е. области распространения трещин, можно моделировать с помощью нагруженного

фрактального дерева. Такая модель позволяет получить статистическое описание распространения области разрушения при масштабно-инвариантном механизме переноса нагрузки. При этом, когда нагрузка достигает некоторой предельной величины модель позволяет имитировать разрушение структуры, обеспечивает возможность определения пороговых значений нагрузки, при которых разрушение не происходит, позволяет варьировать значения прочности, нагрузки, высоты дерева, числа уровней и исследовать процесс разрушения.

На основе предложенного подхода можно с достаточной для практических целей точностью оценивать устойчивость породных массивов вокруг горных выработок, давать рекомендации по выбору крепи и прогнозировать состояние подземных сооружений в различные периоды их поддержания. Так, можно рассчитать вероятность разрушения непосредственной кровли выработки, закрепленной анкерами.

В зоне неупругих деформаций пород непосредственной кровли трапециевидной выработки условно проведем, как показано на рис. 2  $N$  параллельных прямых. Расстояние между  $n$ -



**Рис. 2** Схема к построению фрактальной модели

где  $x_{nl}^*$ ,  $x_{nr}^*$  - абсциссы точек пересечения контура условной зоны с  $n$ -ной прямой. Основанию дерева (вершине  $n = 0$ ) будет соответствовать точка

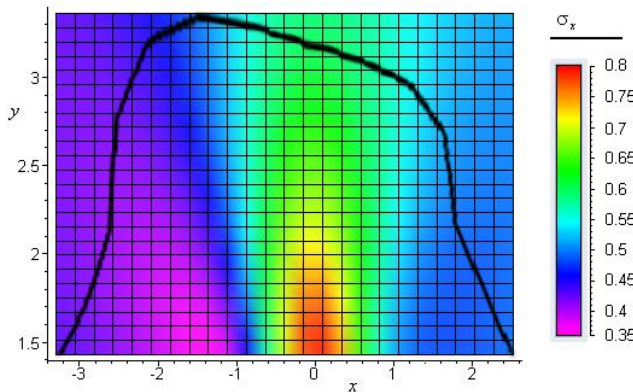
ной и  $(n + 1)$ -й прямой определим из выражения:

$$h_n = h_0 \left( \frac{1}{r} \right)^{1-n}, \quad r \in \left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right), \quad (1)$$

где  $h_0$  - расстояние от кровли выработки до точки  $M_{\perp}(x_{\perp}, y_{\perp})$  пересечения контура зоны неупругих деформаций с перпендикуляром, опущенным из начала координат на кровлю выработки. Уравнение  $n$ -ной прямой обозначим  $y = l_n(x)$ .

Отметим на  $n$ -ной прямой  $2^n$  точек. Каждой такой точке поставим в соответствие одну вершину  $n$ -го уровня фрактального дерева. Абсцисса  $j$ -той точки на  $n$ -ной прямой равна:

$$x_{nj} = x_{nl}^* + j \frac{(x_{nr}^* - x_{nl}^*)}{2^n + 1}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, 2^n. \quad (2)$$



$M_{\perp}(x_{\perp}, y_{\perp})$ . Для оценки вклада напряжения  $\sigma_x$  (рис. 3) в распространение области разрушения в непосредственной кровле горной выработки определим нагрузку на  $j$ -тую ветвь  $n$ -го уровня фрактального дерева следующим образом:

$$\sigma_{nj} = \sigma_x(x_{nj}, l_n(x_{nj}), t). \quad (3)$$

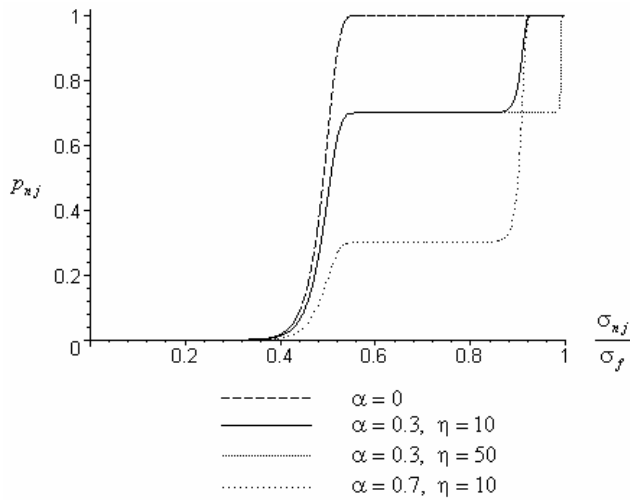
К вершине дерева будет приложена нагрузка  $\sigma_0 = \sigma_x(x_{\perp}, y_{\perp}; t)$ .

Вероятность превышения нагрузкой  $\sigma_{nj}$ , действующей на  $j$ -й ветви  $n$ -го уровня разрушающего напряжения  $\sigma_f$  вычисляется по формуле [1]:

$$p_{nj} = P(\sigma_f \leq \sigma_{nj}) = (1 - \alpha) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\sigma_{nj}^m}{(\sigma_f - \sigma_{nj})^m} \right) \right] + \alpha \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\sigma_{nj}^m}{\eta(\sigma_f - \sigma_{nj})^m} \right) \right]. \quad (4)$$

Параметр  $\alpha$  для  $k$  анкеров рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{k(N - i) + \sum_{n=1}^i 2^n}{\sum_{n=1}^N 2^n},$$



**Рис. 4. Вероятность разрушения для  $m = 10$**

рушения для различных комбинаций параметров анкерной крепи.

Статистический анализ разрушения структуры производится по формуле (4).

Снижение вероятности разрушения заанкерowanych пород кровли выработки более значительно за счёт роста параметра  $\alpha$ , чем параметра  $\eta$ . То есть, увеличение несущей способности анкеров выше уровня  $\eta = 10$  не имеет существенного значения для обеспечения устойчивости пород кровли горной выработки.

Таким образом, разработанная методика позволяет реализовать фрактальную модель для исследования вероятности разрушения пород кровли горных выработок.

$$2^i \leq k \leq 2^{i+1} \quad (5)$$

Так, для четырех анкеров при  $N = 5$   $\alpha \approx 0,29$ .

Параметр  $m$  определяет степень чувствительности

структуры к изменению напряжений.

На рис. 4 для случая  $m = 10$  показано распределение вероятности раз-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
2. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
3. Луганцев Б.Б. Повышение обоснованности выбора технологических решений по обеспечению устойчивости кровли в выемочных выработках и очистных забоях // Научно-технические и технологические проблемы угледобывающего производства Восточного Донбасса. – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы, 2001. – С. 104-109. **ГЛАВ**

#### Коротко об авторах

Луганцев Б.Б. – доктор технических наук, ген. директор,  
Мартыненко И.И. – кандидат технических наук, зав. лаб. ШахтНИУИ.

Рецензент докт. техн. наук, профессор Матвеев Валентин Александрович.

**Рис. 3. Распределение напряжений в непосредственной кровле выработки**

