

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ КАК ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ К РАЗРУШЕНИЮ

*Валерий Егорович Миренков*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)217-06-93, e-mail: mirenikov@misd.nsc.ru

Ведение очистных работ сопровождается ростом напряжений как результат увеличения выработанного пространства, приводит к деформированию пород с особенностями, нарушающими симметрию, получаемую обычно при статическом расчете. Для горизонтальной выработки классический подход приводит к расчету деформирования симметричному относительно осей координат. При этом граничные условия и механические величины, характеризующие вмещающий выработку массив, задаются произвольно. Однако, хорошо известно из натуральных наблюдений нарушение симметрии деформирования и как закономерность начало разрушения массива пород в одной наиболее напряженной точке. Разрушение в соответствии с использованными физико-механическими законами оказывается достаточно непредсказуемым и не носит единичный, определяемый заранее характер, как это предполагается на фоне симметричного расчета, как бы стараясь наверняка осуществить разрушение. Кинематический расчет смещений, учитывающий собственный вес пород, позволил нарушить классическую симметрию при расчете смещений кровли и почвы выработки и приблизиться к пониманию физики процесса деформирования. Рассматривается изотропный массив пород с горизонтальной заглубленной выработкой, обеспечивающих при классическом расчете наибольшую симметрию деформирования. Введение в рассмотрение динамики процесса ведения очистных работ полностью разрушает построенную симметрию возможного деформирования, обеспечивая начало разрушения в одной наиболее напряженной точке. Динамика учитывается через единичное подвигание крепи, суммирование которых дополнительно обеспечивает всякое отсутствие симметрии в процессе разрушения.

**Ключевые слова:** выработка, разрушение, смещение, вес пород, статика, кинематика, динамика.

## DEFORMATION AS A PREPARING PROCESS FOR DESTRUCTION

*Valery E. Mirenkov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Rock Mechanics Laboratory, phone: (383)217-06-93, e-mail: mirenikov@misd.nsc.ru

Actual mining is accompanied with stress increasing and as a result increasing of developed space causes to deformation of rock with specialties, which brake the symmetry, obtained after statistic calculation. For horizontal working classic approach leads to calculation of symmetric relatively coordinate axes deformation. In that case boundary conditions and mechanical quantities, related to soling containing development, are sized in an arbitrary way. However, it is well known from in-situ observations that braking the symmetry and as a result caving starting happen in the most stressed point. According to used physical and mechanical laws, destruction occurs quite unpredictable and does not have single before determined behavior. As it supposed in the context of symmetric calculation, trying certainly carry out the destruction. Kinematic calculation

of displacements, considering weight of rocks, has allowed to brake classic symmetry at calculation of roof and floor displacements and to get closer to understanding of mechanism of the deformation process. In the work isotropic solid with horizontal sunken working, which provides the most deformation symmetry at classic calculation, is considered. Introduction into consideration of dynamic of process of actual mining totally destroys built symmetry of possible deformation providing destruction starting in the most stressed point. Dynamic is considered after single advance of support, sum of which additionally provides absence of the symmetry in the destruction process.

**Key words:** working, destruction, displacement, weight of rock, static, kinematic, dynamic.

### *Введение*

Добыча полезных ископаемых сопровождается увеличением выработанного пространства, что приводит к непрерывному изменению напряжений и смещений около очистной выработки. Классический подход к расчету напряженно-деформированного состояния пород в окрестности выработки основан на предположении о линейном изменении поля напряжений нетронутого массива пород с глубиной, отсчитываемой от дневной поверхности [1, 2]. При этом проблема сводится к решению задачи для плоскости с математическим разрезом [3]. Разумного обоснования этим положениям нет и нет обоснования положению о симметрии деформирования относительно осей симметрии горизонтально залегающей выработки. Как показал анализ, проведенный в работе [4], классическое решение [3] некорректно. В настоящее время нет какого-либо учета влияния линейности исходного поля напряжений на нарушение процесса деформирования надработанных и подработанных пород.

Кинематический анализ построен на учете собственного веса пород и основан на феноменологической теории, построенной на экспериментальных данных по смещениям пород кровли и почвы выработки [5]. Существенно, что сумма статического и кинематического подходов полностью не нарушают симметрию деформирования, обеспечивая начало разрушения в двух точках по любой теории прочности. Каждое подвигание секции крепи приводит к динамическому удару пород кровли по отработываемому пласту и по соседним секциям крепи, вызывая дополнительное разрушение кровли, т.е. к накоплению в ней повреждений, могущих реализоваться в будущем. Начиная с этого момента, если учесть изменение мощности слоя в кровле выработки и разрушение (отжим) пласта, то симметрия напряженно-деформированного состояния исчезает и, разрушение всегда будет в одной точке.

### *Граничные условия*

Для расчета нюансов, возникающих при нарушении симметрии деформирования, рассмотрим случай ведения очистных работ на горизонтально залегающем пласте полезного ископаемого, предполагая выработку заглубленной

[1, 2]. Аналогично [1, 2], линейный закон распределения сжимающих напряжений в нетронутом горном массиве примем в виде

$$\sigma_y = -\gamma(H - y), \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \quad (1)$$

где  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  - вертикальные и горизонтальные напряжения, соответственно на глубине  $H$  от дневной поверхности,  $\gamma$  - удельный вес пород,  $\lambda$  - коэффициент бокового распора. На рис. 1 приведена схема очистной выработки длиной  $L$ , движение лавы предполагается в положительном направлении оси  $x$ . Не уменьшая общности и не усложняя без нужды процесс счета, положим, что породы, вмещающие обрабатываемый пласт однородны с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\eta$ .

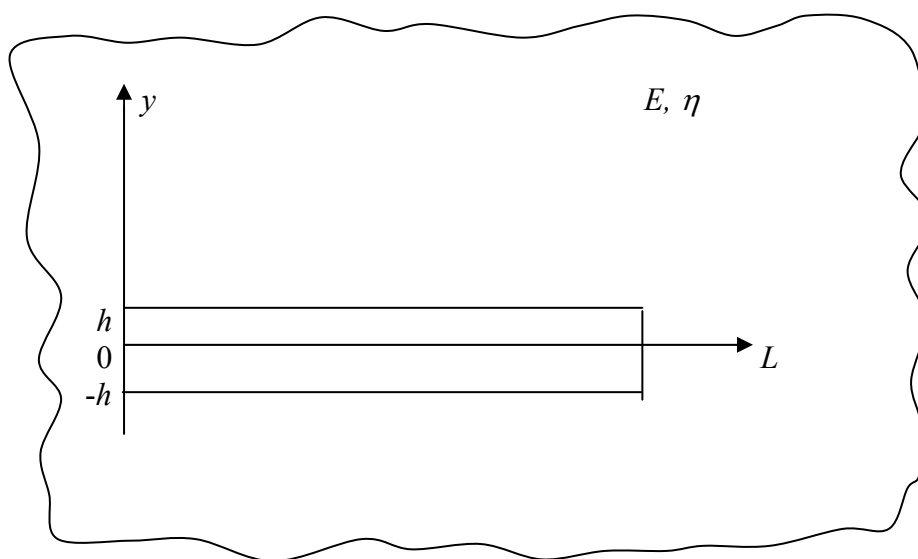


Рис. 1. Схема очистной выработки

Для расчета напряженно-деформированного состояния и описания подготовки к разрушению пород в окрестности выработки при подвигании лавы используются численные методы, например, метод конечных элементов. Воспользуемся системой сингулярных интегральных уравнений, точность которой определяется точностью взятия интегралов, для вычисления которых есть классические методы. Система имеет вид

$$\begin{aligned} f(t_0) + 2\mu g(t_0) &= \frac{1}{\pi i} \int \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt, \\ \kappa \overline{f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} &= \frac{1}{\pi i} \int \frac{\kappa \overline{f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\kappa = 3 - 4\eta$ ;  $\mu = [2(1 + \eta)]^{-1}$ ;

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, \quad (3)$$

здесь  $X_n, Y_n$  – компоненты усилий в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  $g = u + iv$ ;  $u, v$  – компоненты смещений в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  $i$  – мнимая единица; черточка над функцией обозначает комплексно сопряженное значение;  $\Gamma$  – контур выработки;  $t_0$  – аффикс точки границы  $\Gamma$ . Эта система уравнений связывает значения компонент напряжений и смещений на  $\Gamma$  и имеет место поэтому для всех трех основных задач, которые могут формулироваться в той или иной вариации. Отнесем величины, имеющие размерность длины к мощности пласта, размерность напряжений к вертикальным напряжениям в нетронутом массиве пород в центре будущей выработки.

### Примеры расчета смещений

В механике горных пород в основном используется статический подход, связанный с расчетом напряженно-деформированного состояния в окрестности выработок. Процедура при этом простая, купили программу, что-то посчитали, но что делать с этим результатом дальше остается вопросом. Кинематическая составляющая разрушения в окрестности очистной выработки связана со статическим анализом, так как не дает однозначной связи смещений и напряжений [6]. В процессе ведения очистных работ рост напряженного состояния, определяемого на каждое положение забоя, позволяет судить о потенциально предельной линии будущего разрушения, которое приближается с учетом собственного веса пород. На рис. 2 представлены смещения кровли выработки, кривые 1, 2, 3 отвечают положению очистного забоя  $L = 4, 12$  и  $18$ . Граничные условия в виде нормальных напряжений на контуре выработки для дополнительной задачи запишем в виде

$$\sigma_y = 1, \sigma_x = 0,5, \quad (4)$$

касательно напряжения всюду на периметре выработки равны нулю.

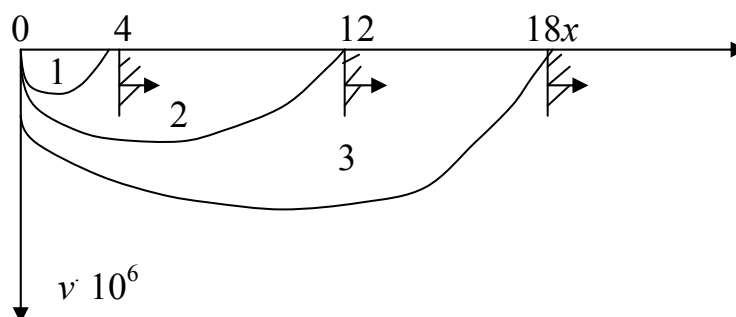


Рис. 2. Смещения кровли, кривые 1, 2, 3 на разные положения забоя

Кинематическая составляющая разрушения в окрестности выработки связана со статическим анализом, так как не дает однозначной связи смещений и напряжений. Статический подход определяет напряжения и смещения (рис. 2), по существу, для невесомого материала пород и проявить себя может только таким образом. Рассмотрены два аспекта статический и кинематический, которые определяют процесс разрушения кровли выработок. Алгоритм расчета сводится к следующему. На любое положение забоя в рамках статического подхода рассчитывается напряженно-деформированное состояние в окрестности выработок, что позволяет, выбрав подходящую теорию деформирования контролировать процесс накопления повреждений. Существенно, что параметры физические, механические и геометрические в таких расчетах задаются априори. Натурные замеры смещений кровли и почвы выработки позволяют уточнить эти параметры и вычислить смещения от собственного веса пород, т.е. свести проблему к рассмотрению обратных задач, достигнув необходимой точности понимания процесса на этом уровне знаний. Отметим, что достижение приемлемой точности приводит такой подход в класс труднорешаемых проблем. Без таких знаний переходить к рассмотрению динамической составляющей, возникающей при ведении горных работ, не представляется перспективным.

Таким образом, впервые в мировой практике рассмотрены два этапа подготовки разрушения кровли выработки, оба они взаимосвязаны и учет их необходим. Разрушение в соответствии с использованными механическими законами, оказывается достаточно непредсказуемым и не имеет однозначный характер, как это утверждалось до сих пор. Главное отличие данной модели от классических в том, что мы видим ее такой, какой описывают ее законы механики, а другие видят то, что желают видеть [5]. Можно считать, что классический статический подход и предлагаемый в этой работе, в определенном смысле, аналогичны, но учет собственного веса пород (кинематический аспект) уточняет напряженное состояние нетронутого массива и механические характеристики пород, приводя их к натурным замерам смещений.

Технология Н.А. Чинакала, использующая вес пород, обеспечивающая в разрушенном состоянии падение под действием сил тяжести, стала прорывной, как говорят сегодня. Впервые развит подход в механике горных пород, учитывающий вес пород при образовании выработки, обеспечивая прогресс на новом кинематическом витке знаний о деформировании массива, что должно сказаться на понимании процесса и, в конечном счете, на технологии ведения горных работ.

### ***Выводы***

Впервые рассмотрены два (в сумме с классическим статическим) этапа подготовки разрушения кровли очистной выработки: статический и кинематический, они взаимосвязаны и учет их необходим.

Учет собственного веса пород необходим и естественен (особенно при деформационных критериях разрушения), но отсутствие в предложенной теории

прямой связи между смещениями и напряжениями не позволяет строго сформулировать силовые критерии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР. ОТН. – 1942. - № 7, 8. – С. 13-28.
2. Баренблатт Г.И., Христианович С.А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. ОТН. – 1955. - № 11. – С. 73-86.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука. – 1966. – 708 с.
4. Mirenkov V. E. Finite stress in fracture michanics. Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – Vol. 48. - № 1.
5. Курленя М.В., Миренков В.Е. Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. – 2018. - № 2. – С. 3-9.

© В. Е. Миренков, 2019