УДК 622.26

А.Г.ОЛОВЯННЫЙ, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, (812) 328 86 55*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.G.OLOVYANNY, *PhD in eng. sc., leading research assistant, (812) 328 86 55*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Разработана программа моделирования геомеханических процессов в трещиноватых массивах горных пород. При моделировании учитывается меняющаяся в процессе развития горных работ геометрия выработанного пространства. Моделируется деформирование и разрушение пород по произвольным направлениям с учетом меняющейся анизотропии деформационных и прочностных свойств. В результате моделирования определяются не только поля напряжений и деформаций, но зоны разрушения пород, степень ослаблений прочности и их ориентация. Приведен пример моделирования развития разрушений слоев вмещающего массива пород при отработке пластообразной залежи.

***Ключевые слова*:** горные породы, разрушение, анизотропия, пластичность, хрупкость, метод конечных элементов.

MATHEMATICAL MODELING OF DEFORMATION PROCESSES AND FAILURE IN FRACTURED ROCK MASS

The paper presents the developed modeling program of geomechanical processes in fractured rock mass. In modeling one took into account the geometry of the mined-out space varying in the process of mining operations. Deformation and failure of rocks are modeled on directions with due account of varying anisotropy of deformational and strength properties. As a result, modeling enables to determine not only the fields of stresses and deformations, but also the failure zones and degree of strength attenuations and their orientation. An example of modeling of layer failure development of enclosing rock mass during mining of stratified deposit is included.

***Key words*:** rocks, failure, anisotropy, plasticity, fragility, finite elements method.

Горные породы содержат ослабления по трещинам, по расслоенности (сланцеватость) и по контактным поверхностям между слоями. Проходка горной выработки вызывает возмущение напряженно-деформированного состояния в окружающем массиве пород. Деформационные и прочностные свойства пород определяются, прежде всего, свойствами систем трещин. Для моделирования геомеханических процессов в трещиноватых и разрушающихся массивах пород вокруг выработок разработана программа на базе методов механики сплошной среды и конечных элементов. Программа позволяет учитывать упругие, вязкие, пластические, объемные деформации разрыхления. Крупные разрывные нарушения могут рассматриваться как неоднородности с заданными свойствами. В трещиноватом массиве пород конкретные трещины и ослабления не рассматриваются (это в принципе невозможно); считается, что рассматриваемый элемент массива остается сплошным, хотя по плоскостям систем трещин прочность на сдвиг и разрыв понижена по сравнению со сплошным материалом и меняется вместе с развитием деформаций сдвига или отрыва. Вокруг выработок в породах появляются упругие и вязкие обратимые, а также необратимые разрушающие и вязкие деформации, прежде всего по трещинам и ослаблениям.

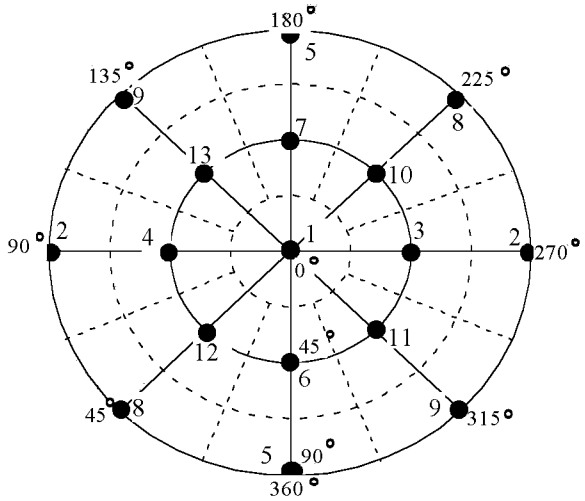


Рис.1. Сферическая диаграмма фиксированных направлений систем трещин с шагом $\pi/4$. Зоны внутри штриховых контуров определяют множество направлений, относящихся к соответствующей системе трещин

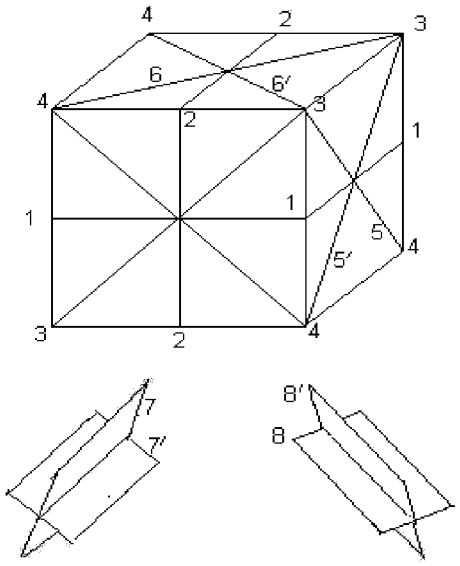


Рис.2. Схема фиксированных плоскостей ослаблений в условиях плоской деформации

Широко распространенный термин пластические деформации в реальных горных породах чаще всего обозначает разрушающие деформации, возникающие в результате развития существующих и образования новых сдвиговых и разрывных трещин. Сдвиговые и разрывные трещины образуют ориентированные системы нарушений, по которым накапливаются нелинейные деформации пластичности и разрушения.

Задача математического моделирования – оценка степени ослабления прочности пород, возникающей в результате образования выработок, и возможность потери их эксплуатационной способности.

Идея метода заключается в том, что в процессе моделирования на всех этапах нагружения в каждой точке массива (в каждом отдельном элементе) рассматривается ограниченное количество направлений, по которым возможны разрушения при сдвиге или разрыве*. Это позволяет при численных расчетах на каждом шаге приближения перебирать возникающие условия нагружения только по выделенным направлениям. Таким способом в разных частях массива автоматически учитывается влияние поворотов главных осей тензора напряжений, когда активное разрушение может происходить то по одним, то по другим системам ослаблений. Как следует из диаграммы трещиноватости (рис.1), для общего пространственного случая тринадцать систем покрывают все поле возможных направлений ослаблений с интервалом 45°. В конкретных случаях выбор фиксированных направлений ослаблений в плоском сечении может производиться с учетом существующих систем трещин и слоистости, в том числе расслоенности в породах одной геологической разности.

При разрушении по ориентированным направлениям первоначально изотропные горные породы приобретают свойство прочностной и деформационной анизотропии. По поверхностям ослаблений сцепление и прочность на разрыв меньше, чем по направлениям, не имеющим нарушений. Кроме того, снижается сдвиговая жесткость, что влияет на упругие деформации. Для условий плоской деформации схема направлений ориентированных ослаблений приведена на рис.2. Каждая из выделенных систем на рисунке определена цифрами на ребрах кубического элемента 1-1-1; 2-2-2; 3-3-3; 4-4-4-4, системы 5-5', 6-6', 7-7' и 8-8' – парные в силу симметрии относительно плоскости деформирования.

* *Оловянный А.Г.* Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб, 2003. 234 с.

Olovyanny A.G. Some problems of the rock massif mechanics. Saint Petersburg, 2003. 234 p.

При расчетах методом конечных элементов, выполняемых по шагам, на каждом шаге по всем выделенным системам производится проверка прочности на сдвиг по критерию Кулона – Мора и на разрыв поперек поверхностей ослаблений:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_s + p_i K_s; \qquad (1)$$

$$\sigma_n = p_i \sigma_r, \qquad (2)$$

где σ_n и τ_n – нормальные и касательные напряжения в плоскости трещин; K_s – сцепление, φ_s – угол трения по плоскостям трещин; σ_r – прочность пород на растяжение; p_i – параметр, характеризующий степень ослабления по рассматриваемой (i-й) системе трещин.

В формулах (1) и (2) сцепление, угол трения и прочность на разрыв определяются для ненарушенного материала. Параметры p_i определяют анизотропию прочностных свойств по соответствующим направлениям в каждом элементе рассматриваемой области. При отсутствии сведений о системах трещин по каждому из выделенных направлений задается общий коэффициент ослабления и по всем выделенным направлениям – число $p_i < 1$ ($i = 1, 2, 3, \ldots, 8$).

При моделировании учитывается, что с течением времени разрушение (снижение прочности по отдельным направлениям) может происходить не только при напряжениях, удовлетворяющих условиям прочности. При напряжениях, ниже предельных значений, снижение прочности во времени определяется уравнением длительной прочности экспоненциального вида.

Приращения разрушающих деформаций сдвига или растяжения (хрупкие, пластические или вязкопластические) связаны с приращениями прочности по каждому из выделенных направлений в рассматриваемом элементе соотношением

$$\Delta p_i = -M p_i \left| \Delta \varepsilon^r \right|, \qquad (3)$$

где M – локальный модуль спада (аналог модуля спада на диаграмме нагружения образцов горных пород); $\Delta\varepsilon^r$ – приращение разрушающих сдвиговых или растягивающих (разрывных) деформаций.

В разрушающемся элементе массива вместе с уменьшающимся параметром прочности снижается сдвиговая жесткость, при этом меняются упругие деформационные характеристики. Разрушение сопровождается увеличением объема, которое возникает при деформировании по нормали к поверхностям разрушающих сдвиговых деформаций,

$$\Delta \varepsilon_n = -k_r \left| \Delta \gamma_r \right|, \qquad (4)$$

где $\Delta\varepsilon_n$ – приращение деформации растяжения поперек плоскости трещин; k_r – коэффициент, определяющий разрыхление при сдвиге, зависящий от нормального напряжения; $\Delta\gamma_r$ – приращение сдвиговой разрушающей деформации.

Для решения задач горного давления в нелинейно деформирующихся массивах пород с учетом последовательного увеличения выработанного пространства используется процедура приближения к искомому решению путем последовательных приращений (инкрементов) перемещений узлов и деформаций элементов. Такая процедура позволяет рассчитывать эти приращения с учетом

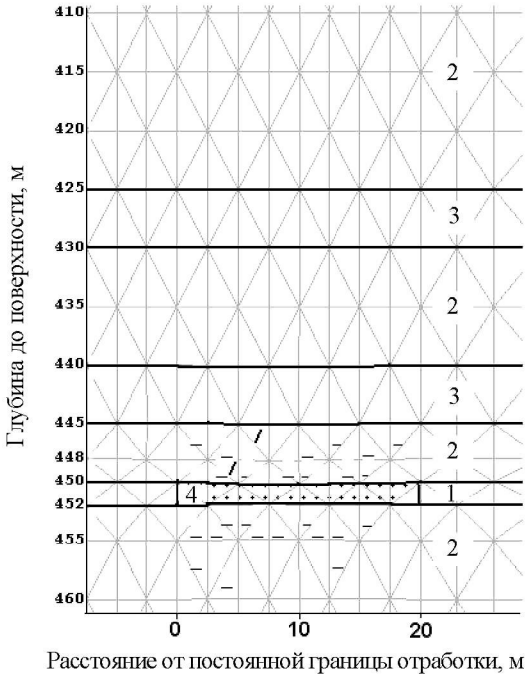


Рис.3. Состояние пород кровли и почвы рудного пласта после отработки участка длиной 20 м. Штрихи определяют места и ориентацию ослаблений прочности пород более чем на 90 % (фоном служит сетка конечных элементов)

1 – рудный пласт; 2 и 3 – слои вмещающих пород; 4 – выработанное пространство

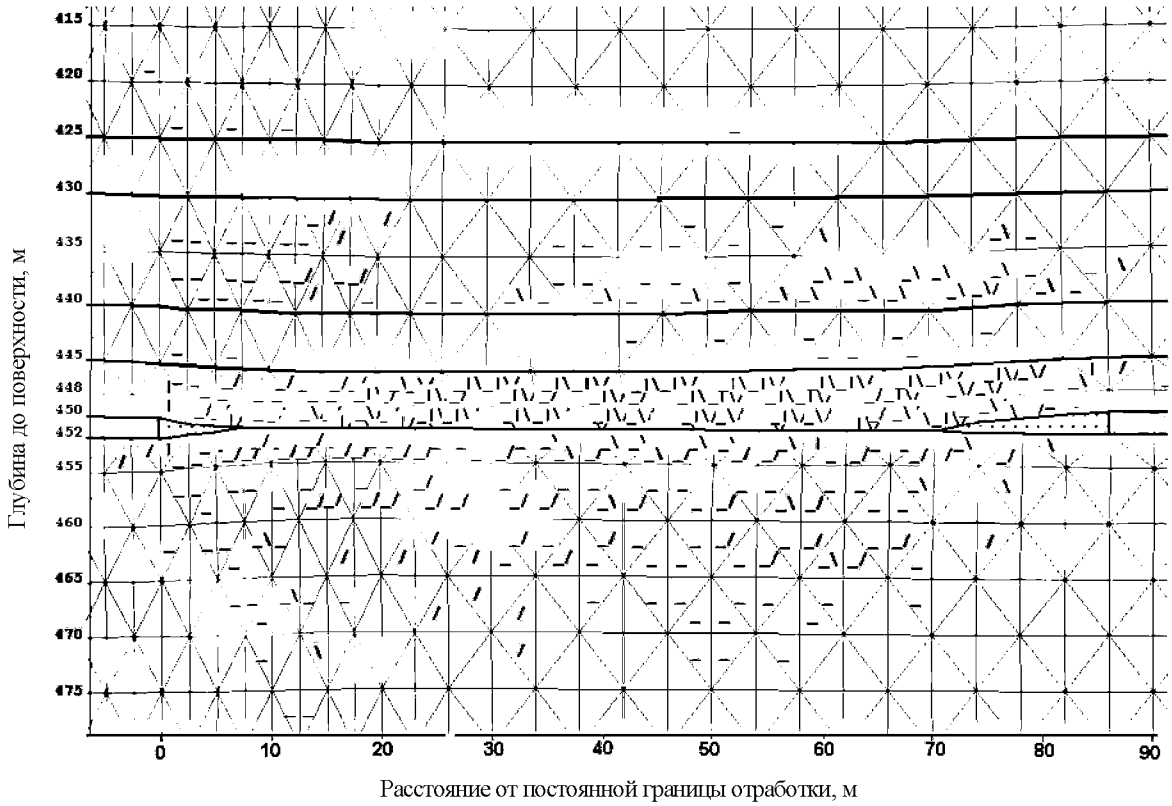


Рис.3. Состояние пород кровли и почвы рудного пласта после отработки участка пласта длиной 90 м

воздействия дополнительных факторов в заданный период времени, в том числе изменения геометрии области при поэтапном увеличении выработанного пространства.

В результате такого моделирования можно получить не только напряжения и деформации, но и меру ослабления пород в каждой точке массива и направления, по которым эти ослабления развиваются. Для примера приведем результаты моделирования накопления повреждения в породах подработанной толщи после отработки пласта рудной залежи на разных этапах (рис.3 и 4). Пласт руды мощностью 2 м, залегающий на глубине 450 м, отрабатывается с полным обрушением. Вмещающий массив пород слоистый; в кровле он представлен слоями двух типов, которые в силу расслоенности ослаблены по горизонтальным поверхностям ($p_i < 1$). Деформационные и прочностные свойства пород этих слоев и рудного слоя отличаются друг от друга.

Здесь ставится цель продемонстрировать программу в действии. Видно, что моделирование (рис.3 и 4) позволяет оценить последствия влияния разных факторов: строения массива (мощность слоев, их расположение относительно отрабатываемого пласта, деформационные и прочностные свойства пород, первоначальная ориентированная и хаотическая нарушенность), направления и скорости разработки очистной выемки, времени после отработки.

Программа имеет два варианта, предназначенных для решения плоских и осесимметричных задач; вариант ее использования в осесимметричном варианте можно увидеть на примере задачи устойчивости камер подземного растворения, рассмотренной в нашей работе*.

* *Оловянный А.Г.* Решение геомеханических проблем подземного растворения методами математического моделирования / А.Г.Оловянный, В.П.Чанцев, Л.А.Кубланов // Горный журнал. 2007. № 8. С.99-102.

Olovyanny A.G. The decision of geomechanical problems of underground dissolution by methods mathematical modeling / A.G.Olovyanny, V.P.Chanchev, L.A.Koublanov // Mining Journal. 2007. № 8. P.99-102.