

УДК 622.831.3

Бабюк Г.В., д.т.н., проф., Хименеу Д.В., асп., кафедра строительных геотехнологий, ДонГТУ, г. Алчевск, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ ОТ РАСТЯЖЕНИЯ

Исследование закономерностей формирования зоны разрушения пород вокруг выработки и оценка проявлений горного давления на этой основе является одной из основных задач геомеханики. В настоящее время для её решения, как правило, используют метод конечных элементов [1], с помощью которого путем многократного повторения или пошагово решения воспроизводят сложные нелинейные проявления горного давления, а определение распределения напряжений вокруг выработки и их сопоставление с прочностными параметрами производят в автоматическом режиме. При этом конечная информация представляется в удобном для анализа виде. Однако при таком способе моделирования замена оригинала численной математической моделью возможна, если они в достаточной степени сходны или, иначе говоря, адекватны. Термин адекватность означает, достаточно ли хорошо с точки зрения целей исследования результаты, полученные в ходе моделирования, отражают истинную сущность геомеханических явлений. До того момента, пока не решен вопрос об адекватности модели, полученные результаты не имеют практически никакой ценности. К сожалению, при компьютерном моделировании строгой теории, аналогичной теории подобия явлений одной и той же физической природы, не существует. Поэтому проверка адекватности результатов компьютерного моделирования имеет достаточно расплывчатую процедуру.

Цель данной работы заключалась в сравнении традиционного численного метода решения задачи об образовании зоны разрушения пород от растяжения, изложенного в работе [1] и заключающегося в определении зоны возможного разрушения для линейно деформирующегося массива путем одноразового задания граничных условий и последующего уточнения формы и размеров зоны разрушения в соответствии с принятой моделью среды (идеально упруго-пластическая), с предложенным методом пошагового перемещения фронта разрушения, когда каждый последующий шаг служит для задания граничных условий последующему.

В качестве исходного алгоритма была использована программа «Геомеханика», модифицированная в ДонГТУ. В расчетном алгоритме реализован целый комплекс моделей физического состояния пород и влияющих факторов, отсутствуют практически ограничения для дискретизации расчетной области, а свойства пород учитываются для каждого отдельного конечного элемента. Для формирования базы данных и визуализации результатов расчета в стандартах приложений Microsoft Windows разработана интерфейсная оболочка.

Моделирование начато с наиболее простой формы сечения выработки – круглой, расположенной в однородном и изотропном массиве, нагруженном вертикальными сжимающими усилиями при коэффициенте бокового распора $\lambda=0$, то есть для случая, когда разрушающие тангенциальные растягивающие напряжения на контуре выработки – максимальны. Размеры расчетной области назначены из условия затухания возмущений, вызванных выработкой, к границам расчетного фрагмента. При решении всех задач использовалась одна и та же сетка треугольных конечных элементов. Каждому элементу присвоен соответствующий тип со значениями деформационных и прочностных параметров. Для проверки адекватности численной модели распределение главных и координатных напряжений на контуре выработки сопоставлено с аналитическим решением аналогичной задачи [2]

$$\sigma_{\theta} = \gamma H [(1 + \lambda) - 2(1 - \lambda) \cos 2\theta], \quad (1)$$

где σ_{θ} – нормальные тангенциальные напряжения на контуре выработки;
 γH – вертикальная гравитационная компонента напряжений;
 λ – коэффициент бокового распора;
 θ – угловая полярная координата.

Результаты сравнения представлены на рис. 1, где демонстрируется, что при $\theta=0$ и $\theta=\pi/2$ напряжения в прямоугольных координатах при $\lambda=0$ практически совпадают с тангенциальными в кровле и боках выработки

$$\sigma_{\theta}^k = \gamma H(3\lambda - 1) \text{ и } \sigma_{\theta}^b = \gamma H(3 - \lambda), \quad (2)$$

где $\sigma_{\theta}^k, \sigma_{\theta}^b$ – нормальные тангенциальные напряжения соответственно в кровле и боках выработки.

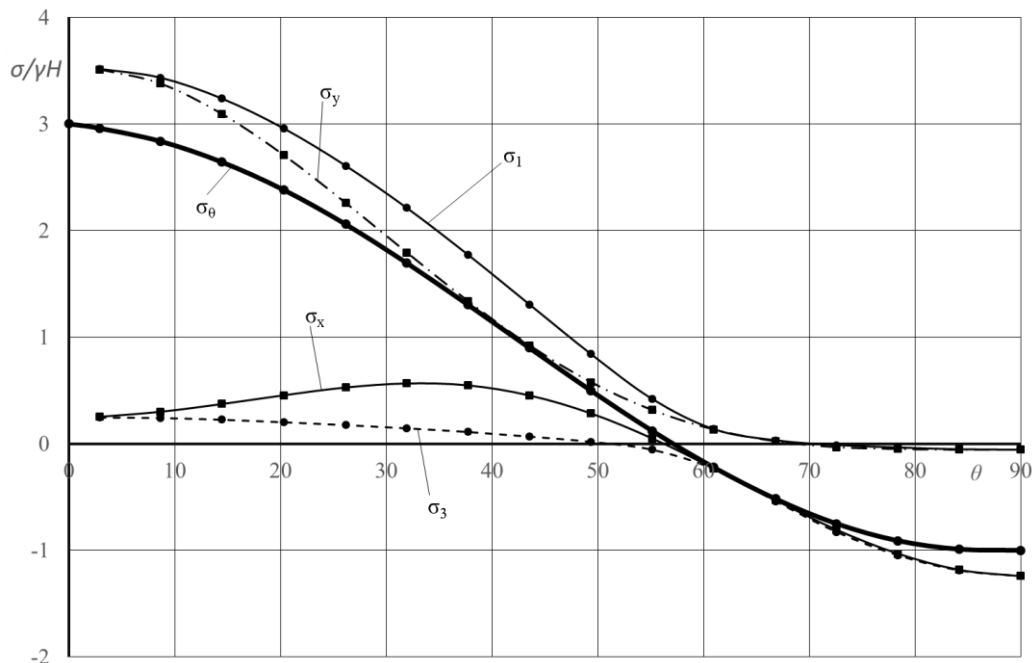


Рисунок 1 – Распределение напряжений на контуре круглой выработки до разрушения: полученные на численной модели – $\sigma_1, \sigma_3, \sigma_x, \sigma_y$; полученные по зависимости (1) – σ_{θ}

Далее решалась плоская численная задача об образовании зоны разрушения от растяжения вокруг выработки круглой формы. Сравнялось два подхода: традиционный, состоящий в определении зоны возможного разрушения путем одноразового решения задачи (метод упругого наложения) в соответствии с принятой моделью среды и пошаговый метод имитации перемещения фронта разрушения, когда каждый последующий шаг служит для формирования граничных условий последующему. Для суждения о наступлении предельного равновесия пород использовался локальный критерий ω [3], равный на контуре выработки отношению прочности пород к действующему напряжению с учетом его знака.

Потеря устойчивости контура выработки от растяжения моделировалась при $\lambda=0$ для идеальной упругопластической модели с одностадийным и многостадийным решением. Эта форма проявления горного давления реализуется при $|\omega^-| > 1 > \omega^+$. План экспериментов представлен в таблице 1, а полученные формы зоны разрушения – на рис. 2, где изображена конечно-элементная сеть с пометкой элементов, разрушившихся от растяжения при одностадийном и многостадийном процессе.

Таблица 1

Характеристика условий моделирования

Разрушение пород	Коэффициент концентрации напряжений		Прочность пород		Локальный критерий ω	
	в кровле	в боках	$\sigma_p/\gamma H$	$\sigma_c/\gamma H$	кровля	бока
Многостадийное (шесть шагов)	-1,65	2,8	1,08	10,8	-1,01	0,18
	-1,53	2,81	1,06	10,6	-1,03	0,19
	-2,77	2,82	0,76	7,6	-1,43	0,26
	-2,04	2,83	0,5	5,0	-2,17	0,4
	-3,06	2,85	0,44	4,4	-2,47	0,46
Одностадийное	-1,65	2,8	0,4 0,3	4,0 3,0	-2,71 -3,62	0,5 0,67

Серия пошаговых решений проведена путем постепенного снижения прочности с имитацией идеального хрупкого разрушения с модулем спада $M \rightarrow \infty$ за счет обнуления элементов, которые вышли в предельное состояние на предыдущем шаге. Задание таких свойств позволяет путем многократного повторения решения воспроизвести движение фронта хрупкого разрушения в глубину массива. Результаты для каждого просчета также представлялись в виде зависимостей распределения главных и координатных напряжений, и перемещений на контуре отверстия и в характерных направлениях в глубь массива. В качестве примера распределение напряжений при $\sigma_c=58,7$ МПа для конечных стадий разрушения представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

При одностадийном процессе зона разрушения имеет форму овала, которую обычно принимают за свод естественного равновесия, образующийся в кровле и почве выработки. При пошаговом решении зона разрушения подобна вертикальной трещине, зародившейся при $\sigma_c=144,1$ МПа и продолжающая расти до тех пор, пока растягивающие напряжения не оказывались меньше прочности породы. Каждое последующее снижение прочности инициировало дальнейший рост трещины и уже при $\sigma_c=58,7$ МПа она распространилась значительно дальше, чем свод при залповом разрушении.

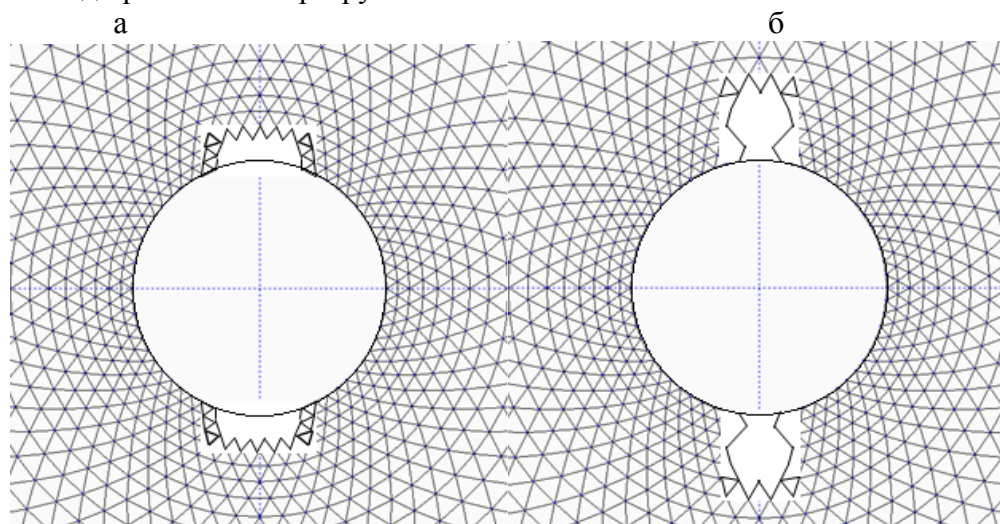


Рисунок 2 – Формы зоны разрушения от растяжения при $\lambda=0$ для круглой выработки при одностадийном (а) и многостадийном (б) процессе

Следовательно, моделирование методом конечных элементов не дает однозначного ответа на вопрос о форме и размерах зоны неупругих деформаций при разрушении от растя-

жения. Критерием истины может быть физическое моделирование, при котором в однородных и изотропных породах также получена форма разрушения в виде «бегущей» трещины.

Таким образом, основное условие моделирования методом конечных элементов про-

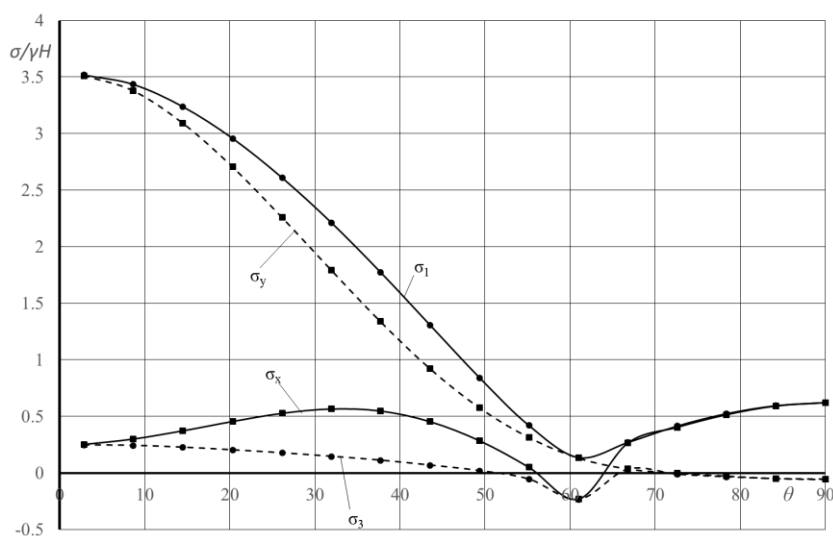


Рисунок 3 – Распределение напряжений по контуру выработки при одностадийном разрушении

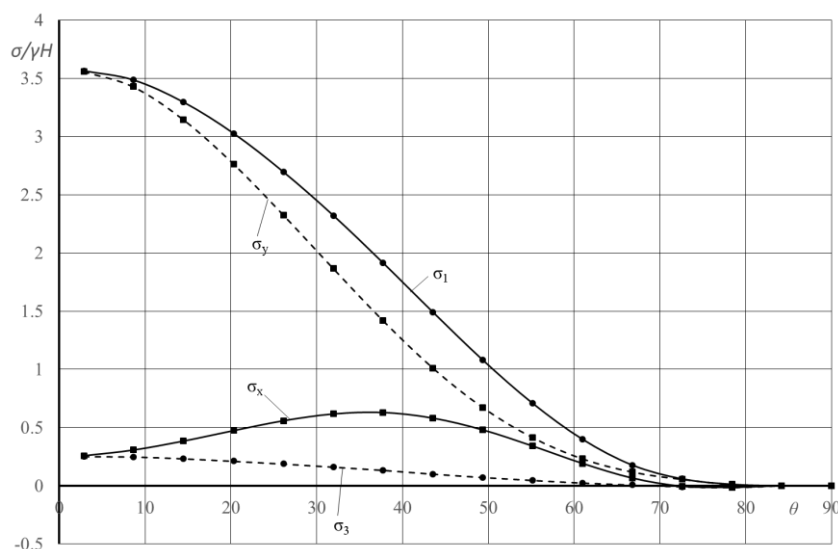


Рисунок 4 – Распределение напряжений по контуру выработки при многостадийном разрушении

явлений горного давления в выработках заключается в обеспечении максимальной адекватности компьютерной модели реальным геомеханическим процессам, протекающим в окрестности выработки. Реализация такого требования предполагает воспроизведение детальной структуры породного массива, пространственное моделирование всех конструктивно – технологических особенностей проведения выработки и возведения крепи, а также отражения в численной модели реальных диаграмм деформирования породы с учетом её взаимодействия с крепью и всей гаммы механических характеристик до предельного, предельного к за предельного поведения пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев -М.: Недра, 1987. – 221с.
2. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. Учебник для вузов. / Н.С. Булычев. – М., Недра, 1982. – 270 с.
3. Литвинский Г.Г. Критерии устойчивости горных выработок при образовании зоны неупругих деформаций / Г.Г. Литвинский // Прикладные результаты исследований полей напряжений и решению задач горного дела и инженерной геологии. – Апатиты: КФ АН СССР, 1985. – С. 52-55.