

## **РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ**

*На основе метода конечных элементов получены решения неупругих задач геомеханики.*

Аналитические решения задачи о напряженно-деформированном состоянии среды вокруг выработок при неравномерном сжатии в упруго-пластической постановке с учетом запредельного деформирования малочисленны. Получены некоторые решения задачи в условиях пластичности Треска и Кулона. В этих решениях имеются упрощающие предположения, что область неупругих деформаций охватывают весь контур выработки, угол внутреннего трения равен нулю и др.

Особенности запредельного деформирования породных массивов вблизи подземных выработок заключается в том, что вокруг горных выработок образуются зоны разрушения, зоны пластических и упругих деформаций охватывающих часть контура или весь контур в зависимости от граничных условий и профилей контура, а также заданного закона состояния среды. Математическое описание процесса формирования областей неупругих деформаций вблизи выработок и получения решения аналитическим методом представляется достаточно сложным. В связи с этим на сегодняшний день целесообразно использовать метод конечных элементов.

Рассмотрим в условиях плоской деформации серию решений для горизонтальной протяженной горной выработки кругового поперечного сечения радиусом  $R$ , находящейся в поле вертикальных и горизонтальных напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  соответственно. Пренебрегая собственным весом пород в пределах рассматриваемой области, задачу можно считать симметричной как относительно горизонтальной, так и вертикальной осей и решение проводить только для 1/4 области.

Рассмотрим нагружение выработки в среде, подчиняющейся ассоциированному закону течения ( $\lambda = \text{ctg}\Psi = 3$ ) и обладающей свойством идеальной пластичности. Общие для всех решений свойства среды таковы:  $E = 1 \cdot 10^3$  МПа,  $\nu = 0.3$ ,  $\gamma = 0$ ,  $C = 1$  МПа,  $\varphi = 30^\circ$ . Решения проведены для следующих условий нагружения:

Вариант 1: Равнокомпонентное нагружение выработки  $\sigma_y = \sigma_x = 7$  МПа;

Вариант 2: Неравнокомпонентное нагружение  $\sigma_y = 3.5$  МПа,  $\sigma_x = 1.2$  МПа;

Вариант 3:  $\sigma_y = 7$  МПа и  $\sigma_x = 2.4$  МПа.

Контурные пластических зон и смещения узлов контура выработки, эпюра напряжений  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  для всех решений, полученных по МКЭ, изображены на рис.1.

В варианте 1 для равнокомпонентного нагружения максимальное значение напряжений  $\sigma_y^{\max} = 11.5$  МПа достигается на границе пластической зоны. Г. Л. Фисенко [2] дает решение аналогичной задачи методом предельного равновесия. Тогда максимальное напряжение, после подстановки параметров рассматриваемой задачи в формулу Г.Л.Фисенко равна 11.4 МПа, что практически равно величине, полученной нами по МКЭ.

По решениям МКЭ смещение точек контура выработки составляет  $U_R = -0.102R$ , радиус зоны пластических деформаций составляет  $r = 1.52R$  (рис.1а). Б.З.Амусин [3] приводит аналитические формулы для расчета перемещений точек контура:

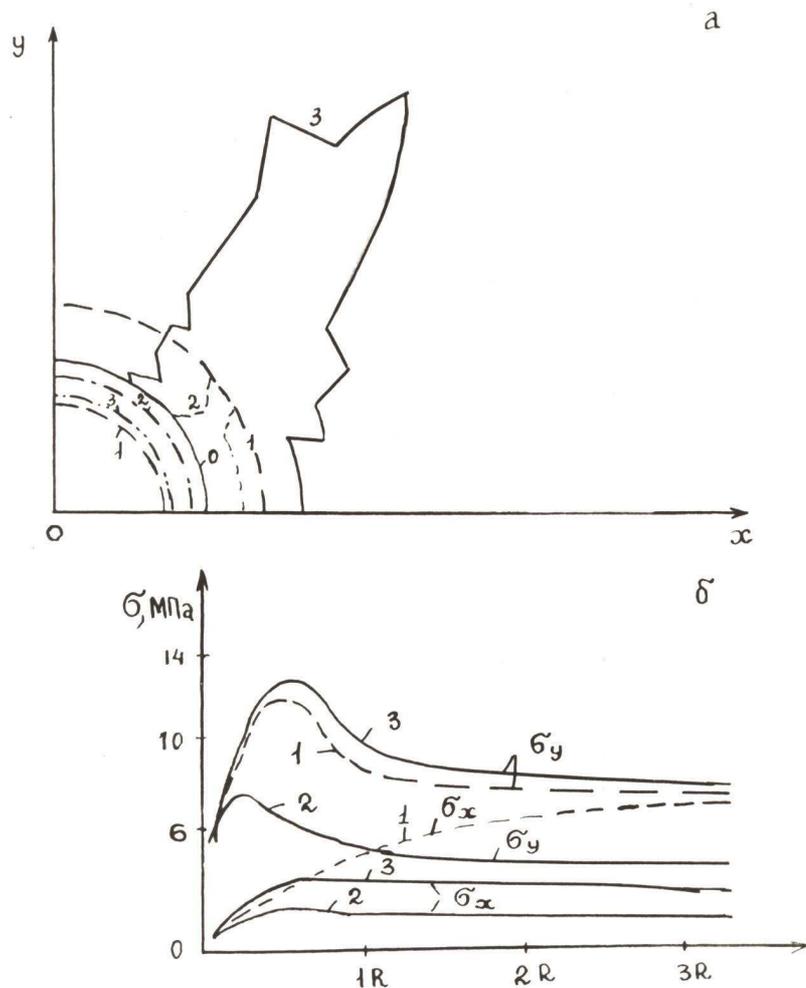


Рис.1. Контуры пластических зон, смещений (а) и эпюры напряжений (б) при решении задач по вариантам – 1, 2, 3; о – исходный контур выработки

$$U_R = (\gamma H + C \cdot \operatorname{ctg} \varphi) R \sin \varphi \frac{Z^{W+2}}{2G}$$

где  $G$ -модуль сдвига;  $W=2\sin\varphi/(1-\sin\varphi)$  радиуса пластической зоны:

$$Z = \left[ 1 + W \frac{\gamma H}{S} (1 - \sin \varphi) \right]^{\frac{1}{W}}$$

где  $S$ - прочность на одноосное сжатие.

При подобных свойствах среды и условиях нагружения расчет по этим формулам дает значение  $U_R=0.125R$ ,  $r=1.57R$ , что весьма близко к результатам расчетов МКЭ. Относительная погрешность напряжений на границе пластической зоны составляет 0.3%, радиуса пластической зоны - 3% и смещения контура выработки 18%.

В таблице 1 приведены в долях  $R$  величины смещения узлов контура выработок для всех трех вариантов.

Таблица 1

Номер узла	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	$\frac{\Delta X \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta Y \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta X \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta Y \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta X \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta Y \cdot 10^3}{R}$
	2	3	4	5	6	7
1	-100	0	-6	0	-75	0
2	-102	-15	-7	-6	-78	-21
3	-96	-29	-5	-11	-69	-40
4	-90	-43	-4	-16	-61	-58
5	-81	-55	-2	-20	-49	-71
6	-70	-63	-0.4	-23	-35	-78
7	-57	-73	0.3	-26	-23	-83
8	-43	-84	0.5	-29	-13	-85
9	-29	-88	0.4	-31	-6	-84
10	-17	-93	0.3	-32	-3	-83
11	0	-99	0	-32	0	-83

Анализ эпюра напряжений вдоль горизонтальной оси (рис.1б) показывает, что область концентрации напряжений в варианте 3 отодвигается от контура выработки вглубь массива на расстояние примерно в два раза больше, чем в варианте 2. Концентрация напряжений (т.е. отношение  $\sigma_y^{\max}/\sigma_y^{\min}$ ) не зависит от  $\sigma_y$  и равна 1,9.

Анализируя результаты вариантов 2 и 3 (рис.1а) отметим, что в условиях не равнокомпонентного нагружения пластические зоны не охватывают весь контур выработки. Эта зона существенно увеличивается с ростом нагрузки, концентрируясь в сравнительно узкой области, наклоняясь к вертикальной оси. Форма пластической зоны подобна четырехлистнику, такие же зоны получены в фотомеханических испытаниях. Смещение точек контура направлено внутрь выработки.

С целью сравнения результатов вышеизложенных задач рассмотрена задача о нагружении выработки в произвольно дилатирующей среде, т.е. при  $\lambda=6$  и  $\lambda=9$  (свойство среды и условия нагружения такие же, как и в вариантах 1, 2, 3).

Прежде всего следует отметить, что контуры пластических зон, распределение напряжений в этих решениях практически совпадают с аналогичными параметрами решений, приведенных выше при тех же прочностных и упругих свойствах среды, но с меньшим коэффициентом дилатации, а конвергенция выработки в данных решениях значительно больше. В табл.2 представлены величины напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  вдоль горизонтальной оси для варианта 2 при коэффициенте дилатации  $\lambda=3$  и 6.

Таблица 2

$\sigma_x$ , МПа	$\lambda=3$	0.59	1.16	1.69	1.73	1.61	1.52	1.4	1.3	1.2	1.2
	$\lambda=6$	0.6	1.25	1.73	1.8	1.66	1.5	1.42	1.3	1.2	1.2
$\sigma_y$ , МПа	$\lambda=3$	5.75	7.25	6.46	5.32	4.69	4.5	4.0	3.8	3.6	3.5
	$\lambda=6$	5.78	7.3	6.5	5.33	4.77	4.24	4.0	3.8	3.6	3.48

Очевидно, в средах с одинаковыми прочностными свойствами, различающихся лишь деформационными характеристиками (в частности, коэффициентом дилатации), одинаковые заданные силовые условия могут быть уравновешены лишь одинаковыми полями напряжений; это и наблюдается при сопоставлении величины напряжений вдоль горизонтальной оси.

В табл. 3 приведены в долях R смещения точек контура выработки для варианта 2 при значениях  $\lambda$  равном 6 и 9.

Таблица 3

Номер узла	$\lambda=6$	$\lambda=9$
------------	-------------	-------------

	$\frac{\Delta X \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta Y \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta X \cdot 10^3}{R}$	$\frac{\Delta Y \cdot 10^3}{R}$
1	-22	0	-31	0
2	-23	-7	-31	-17
3	-19	-13	-29	-22
4	-15	-18	-26	-28
5	-11	-22	-24	-33
6	-6	-25	-13	-37
7	-3	-27	-11	-38
8	-1	-29	-10	-38
9	-0.3	-31	-2	-43
10	0	-31	-0.9	-44
11	0	-32	0	-44

Из таблицы следует, что среднее конвергенции ( $U_R \cdot 10^3/R$ ) приблизительно равны -27 (при  $\lambda=6$ ) и -38 (при  $\lambda=9$ ). В случае решения 3 варианта величина конвергенции выработки соответственно равны -124 и -161. Дальнейшее решения этих задач при значениях  $\lambda > 9$  приводит к несходящимся итерациям. Поскольку угол  $\alpha \rightarrow 0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдылдаев Э.К. Напряженно деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок. –Фрунзе: Илим, 1990.
2. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. -М.:Недра,1976. -С. 272.
3. Амусин Б.З. Геомеханические основы определения параметров, расчета и автоматизированного проектирования крепи капитальных выработок угольных шахт. Автореф.дисс. докт.техн. наук. -Л., 1989.