

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВБЛИЗИ ВЫРАБОТОК СЛОЖНОГО ОЧЕРТАНИЯ

*В данной статье на основе разработанной методики приведены результаты расчета по оценке напряженного состояния горизонтального сечения участка сопряжения глубокого вертикального шахтного ствола с камерой при различной конфигурации ее сечения.*

Как известно, сложность конкретных задач горного производства и современных теоретических методов приводит к необходимости использования численных методов и ПК. Еще недавно считалось, что процессы, происходящие в массиве горных пород при проведении выработок, случайны, и проектирование выработок осуществлялось на основе интуиции исполнителя и опыта прошлого строительства. Успехи геомеханики и вычислительной техники изменили представление о проектировании открытых и подземных горных выработок.

Появление качественно новой электронно-вычислительной техники с большими быстродействиями и объемами памяти привели к интенсивному развитию и применению численных методов, к решению нужных практических задач геомеханики. Одними из передовыми и широко распространенными численными методами решения линейных задач геомеханики являются метод конечных элементов, а также в последнее время интенсивно развивающийся метод граничных элементов. Простота разработанных моделей сред [1,2], а также тесная связь с традиционными аппаратами геомеханики и методом конечных элементов (МКЭ) позволяет ее реализовать и довольно широко применять их при решении разнообразных задач.

Отладка программы, проверка качества конечно - элементной сетки и модели породного массива осуществлены решением тестовой задачи, имеющей аналитические решения. Для количественной и качественной оценки решения МКЭ по разработанной программе на ПК проведено решение, сопоставимое с известной задачей Галина [3].

Заданы свойства идеально-пластической среды с критерием текучести Треска. Численные характеристики:  $E = 10^3 \text{ Мпа}$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\gamma = 0$ ,  $c = 1 \text{ Мпа}$ ,  $\phi = 0$ . Коэффициент дилатации  $\lambda = 1$ , что обеспечивает равнообъемное течение.

По полученному решению контур пластической зоны представляет собою эллипсоподобную фигуру с большой полуосью  $a = 3,14R$  и малой полуосью  $b = 1,77R$  ( $R$  - радиус отверстия). Из решения Галина следует, что зона пластических деформаций имеет вид эллипса с полуосями  $a = 3,05R$ ,  $b = 1,64R$ . Напряжение вблизи контура отверстия равно пределу прочности на одноосное сжатие, а вдали от контура на поверхности - заданным напряжением.

В таблице 1 приведена величина перемещения узлов контура отверстия в долях  $R$ , а в таблице 2 - значения напряжений в пластической зоне полученные по формулам Галина и по МКЭ.

Величина перемещения узлов контура

Таблица 1

| Номер узла                | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta x \cdot 10^3 / R$ | -41 | -40 | -38 | -34 | -29 | -24 | -18 | -12 | -6  | -4  | 0   |
| $\Delta y \cdot 10^3 / R$ | 0   | -9  | -16 | -23 | -29 | -32 | -36 | -38 | -39 | -39 | -39 |

Значения напряжений в пластической зоне

Таблица 2.

| Горизонтальная ось | Вертикальная ось |
|--------------------|------------------|
|--------------------|------------------|

| $\sigma_x$ |           |        |           |        | $\sigma_y$ |           |        |           |        |
|------------|-----------|--------|-----------|--------|------------|-----------|--------|-----------|--------|
| r/R        | по Галину | по МКЭ | по Галину | по МКЭ | r/R        | по Галину | по МКЭ | по Галину | по МКЭ |
| 1          | 0         | 0.1    | 2         | 2.07   | 1          | 0         | 0      | 2         | 2.08   |
| 1.28       | 0.49      | 0.49   | 2.49      | 2.62   | 1.14       | 0.27      | 0.39   | 2.27      | 2.39   |
| 1.8        | 1.18      | 1.20   | 3.18      | 3.37   | 1.28       | 0.49      | 0.58   | 2.49      | 2.58   |
| 2.14       | 1.52      | 1.50   | 3.52      | 3.60   | 1.64       | 0.99      | 1.10   | 2.99      | 2.88   |
| 2.57       | 1.89      | 1.85   | 3.89      | 3.92   |            |           |        |           |        |
| 3.05       | 2.23      | 2.19   | 4.23      | 4.24   |            |           |        |           |        |

Из таблицы следует, что даже при сравнительно крупной сети элементов аналитическое и численное решения очень близки.

После решения классической задачи проведем анализ практической задачи. Для этого рассматриваем горизонтальное сечение участка сопряжения глубокого вертикального шахтного ствола с камерой при различной конфигурации ее сечения: (а) прямоугольной (б) закругленной. Диаметр ствола 8 м, ширина и длина камеры 3 м. Крепь жесткая, имеет постоянную толщину 50 см.

Вследствие симметрии крепи относительно одной из осей в расчетной схеме рассматривалась лишь половина области массива и крепи, которая разбивалась на треугольные конечные элементы. Массив принимался невесомым, а нагрузка собственного веса пород ( $\lambda\gamma H$ ) на отметке расположения оси выработки прикладывалась на внешних границах области по направлению длинной оси поперечного сечения. По направлению короткой оси принималось закрепление. Рассмотрено два варианта нагружения: (а)  $\lambda\gamma H_1=10$  МПа и (б)  $\lambda\gamma H_2=30$  МПа, где  $\lambda = \nu/(1-\nu)$ - коэффициент бокового распора.

Для всех вариантов приняты следующие деформационные и прочностные свойства массива и крепи:

$$E_m = 6 \cdot 10^3 \text{ МПа}, \nu_m = 0.2, C_m = 3.43 \text{ МПа}, \phi_m = 30^\circ$$

$$E_k = 25 \cdot 10^3 \text{ МПа}, \nu_k = 0.2, C_k = 10^3 \text{ МПа}, \phi_k = 30^\circ$$

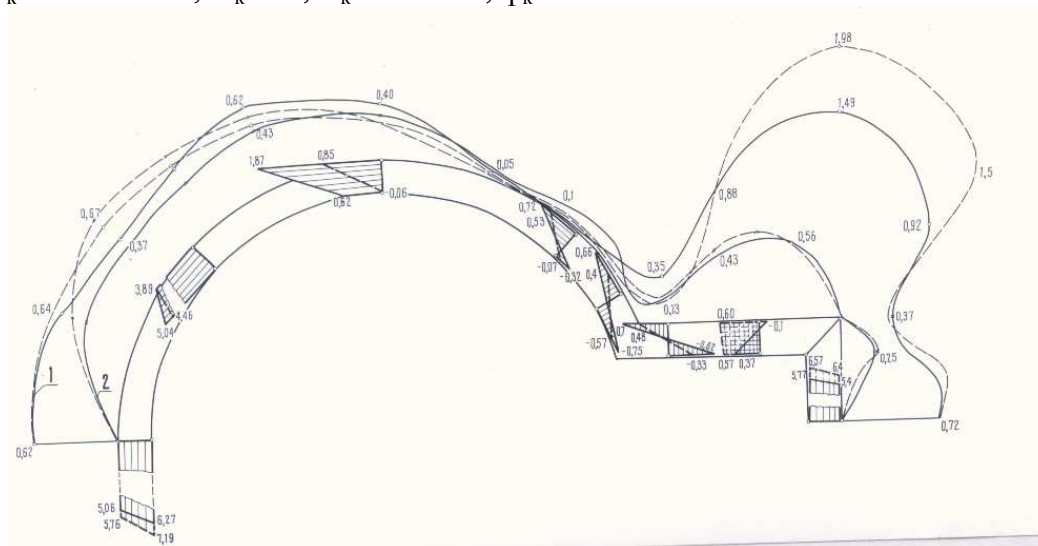


Рисунок 1. Эпюры контактных нагрузок и напряжений в крепи:  
1 – нормальных; 2 – касательных.

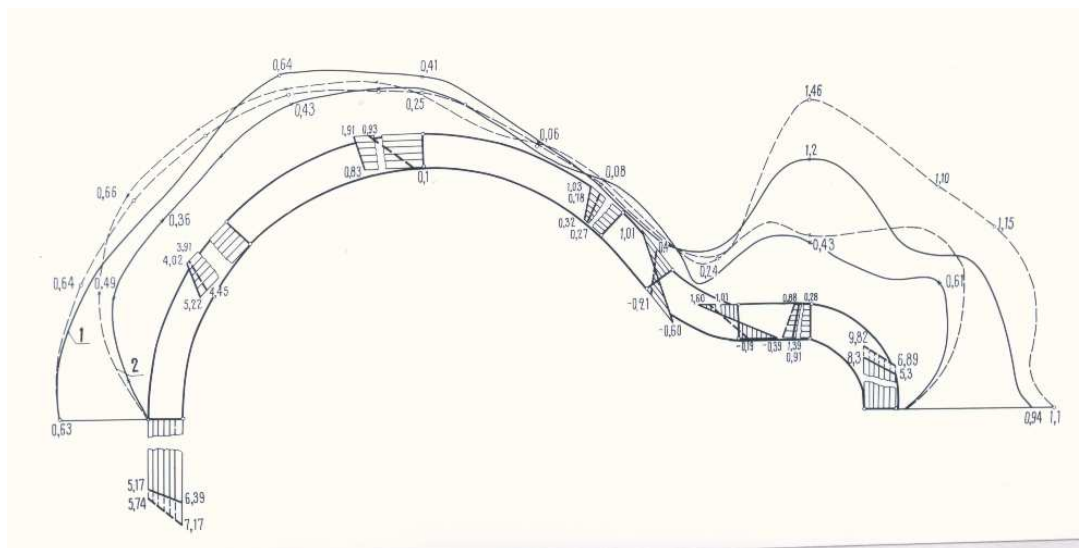


Рисунок 2. Эпюры контактных нагрузок и напряжений в крепи:  
1 – нормальных; 2 – касательных.

Для удобства построения эпюры нагрузок на криволинейном участке крепи составлена подпрограмма для перерасчета от главных напряжений в радиальные  $\sigma_r$  (радиальные нагрузки  $P$ ), касательные  $\tau_{\theta}$  (касательные нагрузки  $Q$ ) и для определения нормальных напряжений в крепи  $\sigma_{\theta}$ .

На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчета относительных нормальных ( $P/\lg H$ ), касательных ( $Q/\lg H$ ) нагрузок (напряжений) и относительных нормальных напряжений в крепи ( $\sigma_{\theta}/\lg H$ ). Отметим, что зоны пластических деформаций в вариантах (а) и (б) близки.

Из анализа результатов вариантов (а) и (б) следует, что при росте напряженного состояния массива (при увеличении глубины) увеличивается зона неупругих деформаций и нагрузка на крепь и напряжение в крепи. Сопоставление результатов расчета этих двух вариантов показывает, что нагрузки на крепь и напряжение в крепи в стволе, за исключением зоны сопряжения, почти совпадают.

В зоне сопряжения крепи ствола с камерой возникает уменьшение нормальных и касательных нагрузок и их увеличение на крепь камеры. При этом концентрация нормальных напряжений ( $\sigma_r/\lg H$ ) в варианте (а) примерно в 1,3 раза больше, чем в варианте (б). Сопоставление напряжения в крепи в зоне сопряжения показывает, что в этих вариантах растягивающие напряжения практически не отличаются, хотя в варианте (а) зона растягивающих напряжений в крепи существенно больше.

Анализ результатов варианта 1 и 2 позволяют отметить следующее:

- зоны неупругих деформаций, возникающих вокруг сопряжения крепи ствола с приствольной камерой, показывают, что для рассматриваемых условий выработки не могут рассматриваться без крепи;
- при полном сцеплении крепи с массивом очертание крепи существенного влияния не оказывает.

### Литература:

1. Абдылдаев Э.К. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок. - Фрунзе: Илим, 1990.-164 с.
2. Абдылдаев Э.К., Абдылдаев Э.Э. Геомеханические модели породного массива и численная процедура. Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (17-19 июня 2009 г.), КазНТУ им К.Сатпаева. - Алматы. -2009. - Том 3. - С. 72-76
3. Галин Л.Г. Плоская упруго - пластическая задача. Прикладная математика и механика. - М.-Л.-1946.-Т10. - С. 367-386.

