# ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54

**Н. В. Черданцев, С. В. Черданцев**

## ЗОНЫ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ВОКРУГ ЗАКРЕПЛЕННОЙ СВОДЧАТОЙ ВЫРАБОТКИ

Определение зон нарушения сплошности (З.Н.С) вокруг горных выработок является важнейшей задачей механики подземных сооружений. От наличия зон нарушения сплошности зависит устойчивость горных выработок, а размеры зон определяют величину нагрузки на крепь.

Построение и анализ З.Н.С вокруг одиночных протяжённых незакрепленных выработок различной формы поперечного сечения обсуждались в работах [1,2]. В работе [4] определены зоны нарушения сплошности вокруг протяженной выработки круглого поперечного сечения с учетом влияния крепи. Следует заметить, что определить З.Н.С в окрестности закрепленной выработки произвольного поперечного сечения пока не удалось. В данной работе предпринята попытка определить З.Н.С вокруг закрепленной сводчатой выработки с помощью метода граничных интегральных уравнений.

Постановим следующую задачу. В бесконечной прямоугольной пластине (рис. 1) имеется отверстие, моделирующее поперечное сечение горной выработки. К пластине приложены вертикальные $\sigma^{\infty}_{z}=\gamma H$ и горизонтальные $\sigma^{\infty}_{y}=\lambda\gamma H$ напряжения, ($\lambda$ - коэффициент бокового давления). Наличие крепи учтем ее реакцией $F$. Требуется определить напряжения в пластине.

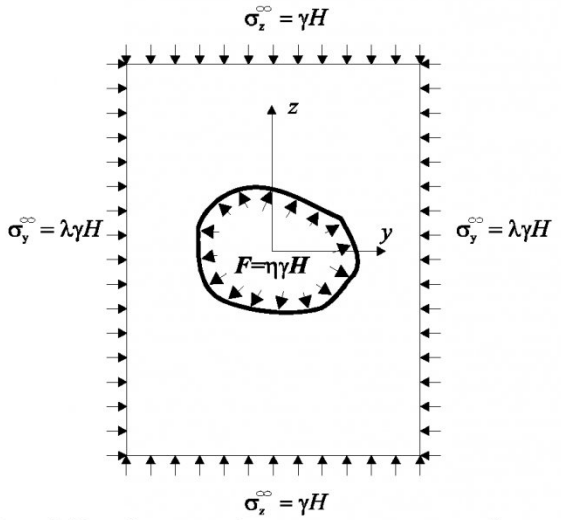


*Рис. 1. Расчётная модель рассматриваемой задачи*

Для решения поставленной задачи наиболее эффективен метод граничных интегральных уравнений [3 - 6].

Сущность метода заключается в следующем. К контуру отверстия прикладывается компенсирующая нагрузка интенсивностью $\overline{a}$, которая вместе с внешней нагрузкой и реакцией крепи $F$ в каждой точке контура должна удовлетворять условию на поверхности. Это и позволяет составить интегральное уравнение.

Поскольку горные породы в окрестности протяженной выработки находятся в состоянии плоской деформации, то интегральное уравнение принимает вид [5]:

$$\frac{1}{2}a_q(Q_0)-\int_L \Phi^*_{qm}(Q_0,M_0)a_m(M_0)dL_{M_0}= \\ =n_q(Q_0)\sigma^{\infty}_{qq}-F_q(Q_0) \qquad (1)$$

в котором интегрирование выполняется вдоль линии $L$ контура отверстия. Тензор влияния $\Phi^*_{qm}(Q_0,M_0)$ определяется как [3, 5, 6]:

$$\Phi^*_{qm}(Q_0,M_0)=\frac{1}{4\pi(1-\upsilon)r}\times \\ \times\left\{\begin{array}{l}(1-2\upsilon)\left(\frac{x_q n_m}{r}-\frac{n_q x_m}{r}\right)+\\ +\left[(1-2\upsilon)\delta_{qm}+\frac{2x_q x_m}{R^2}\right]\frac{n_t x_t}{r}\end{array}\right\} \qquad (2)$$

и содержит $\upsilon$ - коэффициент Пуассона, индексы $q, m, t = 1, 2$ - номера координатных осей (ось *1* - *y*, ось *2* - *z*), $r$ - расстояние между точками $Q_0$ и $M_0$, $\delta_{qm}$ - символ Кронекера, $\sigma^{\infty}_{qq}$ - тензор напряжений на бесконечности, $n_q$, $n_m$ - единичные векторы внешних нормалей, проведенных к линии контура в точках $Q_0$ и $M_0$.

Заменяя в (2) интеграл суммой и интегрируя по каждому участку длиной $\Delta L_i$, в пределах которого $a_i = const$, приходим к $2N$ алгебраическим уравнениям относительно $a^*_{y,j}$, $a^*_{z,j}$ [6]:

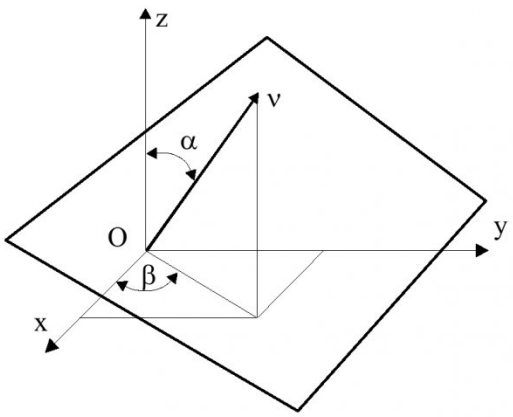


*Рис. 2. Положение поверхности ослабления в пространстве*

$$\frac{1}{2}a^*_{y.i} - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}(\Phi^*_{yyx.ij}a^*_{y.j} + \Phi^*_{yz.ij}a^*_{z.j})\Delta L_i = n_{y.i}t^{\infty}_{y.i} - F^*_{y.i};$$

$$\frac{1}{2}a^*_{z.i} - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}(\Phi^*_{zy.ij}a^*_{y.j} + \Phi^*_{zz.ij}a^*_{z.j})\Delta L_i = n_{z.i}t^{\infty}_{y.i} - F^*_{z.i}. \quad (3)$$

Решение уравнений (3) позволяет вычислить напряжения в произвольной точке плоскости :

$$\sigma_{qm.i} = \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{2}\sigma^*_{qmt.ij}a_{t.j} + \sigma^{\infty}_{qq.i} \quad (4)$$

где тензор Кельвина $\sigma^*_{qmt}$ определяется из [3, 5]

$$\sigma^*_{qmt} = \frac{1}{4\pi(1-\upsilon)r^2}\times \left[(1-2\upsilon)(\delta_{mt}x_q + \delta_{qt}x_m - \delta_{qm}x_t) + \frac{2x_q x_m x_t}{r^2}\right] \quad (5)$$

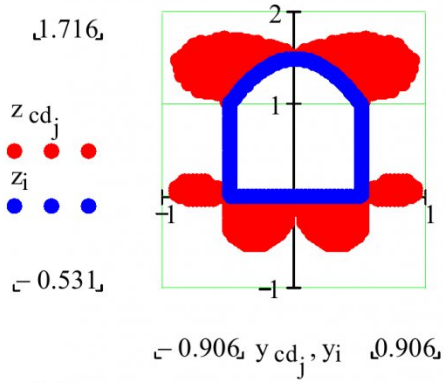


*Рис. 3. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =1, $\eta$=0*

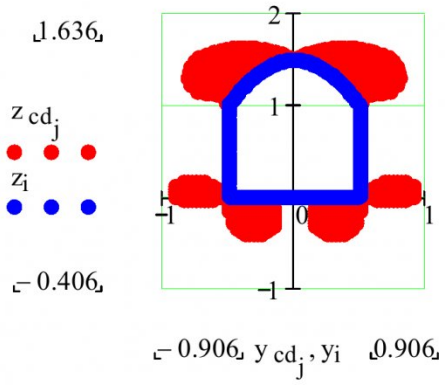


*Рис. 4. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =1, $\eta$=0,2*

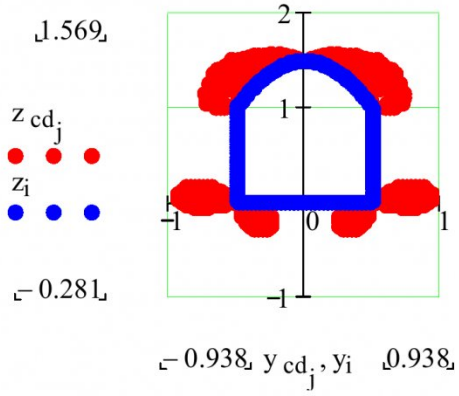


*Рис. 5. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =1, $\eta$=0,4*

Напряжение $\sigma_x$ , параллельное оси выработки $x$ определяется из обобщенного закона Гука. Вычислив напряжения по формуле (4) в ряде точек массива вокруг выработки, можно построить картину напряженного состояния массива горных пород в окрестности выработки.

Как правило, массив горных пород на угольных шахтах является слоистым. Прослойки являются поверхностями ослабления, поскольку их материал имеет более низкие характеристики прочности, чем материал основной породы. Разрушение прослойка приводит к образованию областей разрушения пород вокруг выработки, ко-

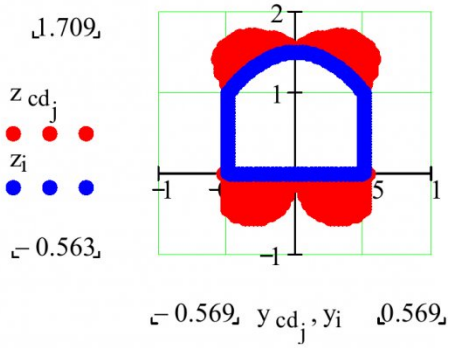


*Рис. 6. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =0,5, $\eta$=0*

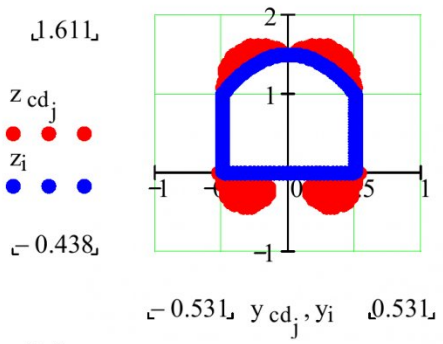


*Рис. 7. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =0,5, $\eta$=0,2*

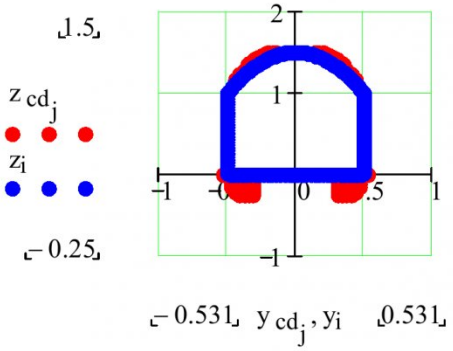


*Рис. 8. Зоны нарушения сплошности вокруг сводчатого отверстия $\lambda$ =0,5, $\eta$=0,4*

торые и являются зонами нарушения сплошности. За критерий прочности материала прослойка принят критерий прочности Мора

$$\tau_{\bullet p} = \sigma_V tg\varphi + a_0, \qquad (6)$$

где $a_0$ - коэффициент сцепления, $\varphi$ – угол внутреннего трения пород прослойка. Поверхность же ослабления ориентирована в пространстве с помощью углов $\alpha$, $\beta$ (рис. 4). Нормальные $\sigma_v$, касательные $\tau_v$ и полные напряжения $p_v$ на поверхности ослабления в случае плоской деформации определяются по формулам [4, 5]:

$$\sigma_V = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{yz} lm,$$

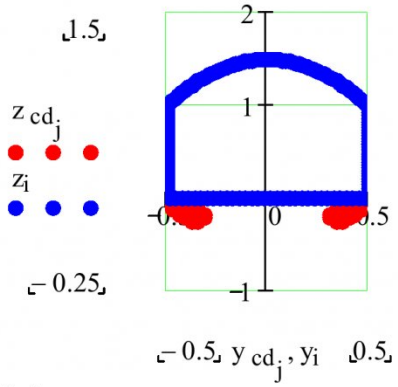


*Рис. 9. Зоны нарушения сплошности вокруг-сводчатого отверстия $\lambda$ =0,333, $\eta$=0,4*

$$p_V^2 = (\sigma_x l)^2 +$$

$$+ (\sigma_y m + \tau_{yz} n)^2 + (\tau_{yz} m + \sigma_z n)^2,$$

$$\tau_V = \sqrt{p_V^2 - \sigma_V^2}, \qquad (7)$$

здесь $l$, $m$, $n$ - направляющие косинусы углов между нормалью к площадке и координатными осями $x$, $y$, $z$, определяемые как:

$$l = cos(\nu, x) = sin\alpha\, cos\beta,$$

$$m = cos(\nu, y) = sin\alpha\, sin\beta,$$

$$n = cos(\nu, z) = cos\alpha. \qquad (8)$$

Численная реализация поставленной задачи выполнена для сводчатой выработки, у которой высота равна пролету. Свод выработки представляет собой квадратную параболу с высотой свода равного половине пролета выработки.

Исходные данные: массив имеет горизонтальные поверхности ослабления $\alpha$ =0, $\beta$ =90$^0$, характеристики прочности материала прослойка - $a_0$=0, $\varphi$ = 20$^0$. На рис. 3 - 9 показаны зоны нарушения сплошности (затемнённые области) вокруг сводчатой выработки при различных $\lambda$, $\eta$..

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баклашов И. В., Картозия Б. А.* Механика подземных сооружений и конструкции крепей. М.: Недра. - 1992. - 544 с.

2. *Булычёв Н. С.* Механика подземных сооружений. - М,: Недра. - 1994. - 382 с.

3. *Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л.* Методы граничных элементов. - М.: Мир. - 1987. - 525 с.

4. *Ержанов Ж. С., Изаксон В. Ю., Станкус В. М.* Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчёт устойчивости. Кемерово, 1976. - 216 с.

5. *Лурье А. И.* Теория упругости. - М.: Наука. - 1970. - 940 с.

6. Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике. Под ред. Т. Круза и Ф. Риццо. - М.: Мир. -1978. - 210 с.

Авторы статьи:

Черданцев
Николай Васильевич
- канд.техн. наук, доц., докторант каф. строительства подземных сооружений и шахт

Черданцев
Сергей Васильевич
- канд. техн. наук, доц. каф. строительства подземных сооружений и шахт