

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ АНИЗОТРОПНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА С УЧЕТОМ ПРИЗАБОЙНОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ КРЕПИ

д. т. н. Левшин А. А., аспирант Федотов С. Н., аспирант Нескоромная Е. А. (Институт прикладной математики и механики НАНУ)

В данной статье в рамках плоской деформации исследовано напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород при разработке пласта полезного ископаемого с учетом призабойной и специальной крепи. Призабойная крепь служит для предотвращения обрушения пород кровли в рабочее пространство, с целью обеспечения безопасности работы людей и техники. Специальная крепь является основным средством осуществления процесса управления кровлей и стабилизации движения всего породного массива, подвергнутого влиянию очистных работ.

Рассмотрим горизонтальный пласт полезного ископаемого мощностью $2h$, расположенный на глубине H от дневной поверхности рис.1. Угол ψ фиксирует положение плоскостей изотропии горных пород. В данной статье угол $\psi=0^\circ$. Считаем, что пласт в краевых частях $(-x_2^0, -x_1)$ и (x_1, x_2) деформируется в соответствии со своими пластическими свойствами. В области (x_{cp}, x_b) расположена призабойная крепь, а в области (x_o, x_{cp}) специальная крепь.

Система координат xOy не совпадает с главными напряжениями упругости массива, поэтому параметры μ_1 и μ_2 являются комплексными. Физическая постановка задачи позволяет сформулировать граничные условия для верхней полуплоскости с границей вдоль действительной оси в виде

$$\begin{aligned} v &= \dot{v} = 0, \quad x \in [-\infty, -x_2^0] \cup (x_2^0, \infty), \\ \sigma_y &= \gamma H - (a_1 x + c_1), \quad -x_2 < x < -x_1, \\ \sigma_y &= \gamma H, \quad -x_1 < x < x_o, \\ \sigma_y &= \gamma H - R_1, \quad x_o < x < x_{cp}, \\ \sigma_y &= \gamma H - R_2, \quad x_{cp} < x < x_b, \\ \sigma_y &= \gamma H - (a_2 x + c_2), \quad x_1 < x < x_2, \\ \tau_{xy} &= 0, \quad |x| < \infty \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{T_0}{h}, \quad c_1 = T_0 \left\{ \sqrt{1 - c_1} \frac{\pi}{2} - \frac{x_1}{h} \right\}, \\ a_1 &= -a_1, \quad c_2 = c_2. \end{aligned}$$

где R_1, R_2 - реакции крепи;

T_n - предел текучести при сдвиге в плоскости xOy для материала пласта;

c_p - параметр пластической анизотропии пласта, величина, которая изменяется в интервале $(-\infty, 1)$ [4]

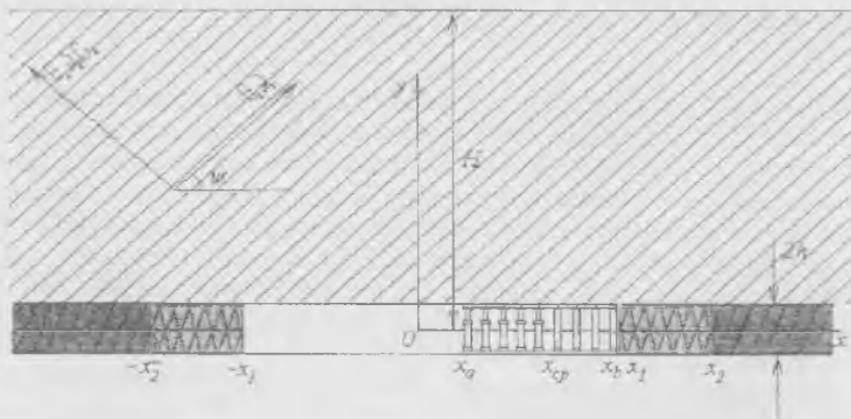


Рис. 1. Схема разработки горизонтального пласта полезного ископаемого.

Данная граничная задача есть частный случай смешанной задачи, изложенной в работах [1-3]. Решение смешанной задачи (1), сингулярное в точках раздела граничных условий и исчезающее на бесконечности, имеет следующий вид:

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1), \quad \Psi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} F(z_2) \quad (2)$$

При этом

$$\begin{aligned}
F(z) = & \frac{\gamma H}{2} + \frac{a_1}{\pi} \sqrt{(z - x_2^0)(z - x_1)} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0 - x_1}{x_2 + x_1}} + \frac{a_1 z + c_1}{2\pi} \times \\
& \times \ln \frac{2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 - x_1)(x_2 + x_1)} - (x_2 - x_2^0)(z - x_1) - 2(zx_1 + x_2 x_2^0)}{- (x_2 + x_2^0)(x_1 + z)} + \\
& + \frac{a_2}{\pi} \sqrt{(z - x_2^0)(z - x_1)} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_1}{x_2 + x_1}} + \frac{a_2 z + c_2}{2\pi} \times \\
& \times \ln \frac{-2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 + x_1)(x_2 - x_1)} + (x_2 - x_2^0)(z + x_1) - 2(zx_1 - x_2 x_2^0)}{(x_2 + x_2^0)(x_1 - z)} + \\
& + \frac{R_1}{2\pi} \left[\ln \frac{2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 + x_{cp})(x_2 - x_{cp})} - (x_2 - x_2^0)(z - x_{cp}) + 2(zx_{cp} + x_2 x_2^0)}{- (x_2 + x_2^0)(z - x_{cp})} \right. \\
& \left. - \ln \frac{2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 + x_o)(x_2 - x_o)} - (x_2 - x_2^0)(z + x_o) + 2(zx_o + x_2 x_2^0)}{- (x_2 + x_2^0)(z - x_o)} \right] + \\
& + \frac{R_2}{2\pi} \left[\ln \frac{2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 + x_b)(x_2 - x_b)} + (x_2 - x_2^0)(z + x_b) - 2(zx_b - x_2 x_2^0)}{(x_2 + x_2^0)(x_b - z)} \right. \\
& \left. - \ln \frac{-2i \sqrt{(z + x_2^0)(z - x_2)(x_2^0 + x_{cp})(x_2 - x_{cp})} + (x_2 - x_2^0)(z + x_{cp}) - 2(zx_{cp} - x_2 x_2^0)}{(x_2 + x_2^0)(x_{cp} - z)} \right]
\end{aligned} \tag{3}$$

Решение (3) ограничено в точках $-x_2^0$ и x_2 .

Условие локального влияния выработки на напряженное состояние массива для функции (2) примет вид

$$\begin{aligned}
& \frac{\gamma H}{2} + \frac{a_1}{2\pi} \sqrt{(x_2^0 - x_1)(x_2 + x_1)} - \frac{a_1}{2\pi} (x_2 - x_1^0) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0 - x_1}{x_2 + x_1}} - \frac{c_1}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0 - x_1}{x_2 + x_1}} \\
& - \frac{a_2}{2\pi} \sqrt{(x_2^0 + x_1)(x_2 - x_1)} - \frac{a_2}{2\pi} (x_2 - x_2^0) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_1}{x_2 + x_1}} - \frac{c_2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_1}{x_2 + x_1}} \\
& - \frac{R_1}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0 + x_{cp}}{x_2 - x_o}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 + x_1}{x_2 - x_o}} \right) + \\
& + \frac{R_2}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_b}{x_2 + x_b}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_{cp}}{x_2 + x_{cp}}} \right) = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

Для перемещений получим еще одно трансцендентное соотношение [2,3]

$$\begin{aligned}
& -2\beta \left[a_1 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0 - x_1}{x_2 + x_1}} + a_2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2 - x_1}{x_2^0 + x_1}} \right] \frac{(x_2 + x_1^0)^2}{8} \\
& + \left(\frac{a_1}{4} (2x_1 - x_2 + x_2^0) - c_1 \right) \frac{\sqrt{(x_2 + x_1)(x_2^0 - x_1)}}{2} + \\
& + \left(\frac{a_2}{4} (2x_1 + x_2 - x_2^0) + c_2 \right) \frac{\sqrt{(x_2 + x_1)(x_2 - x_1)}}{2} - \\
& - \frac{R_1}{2} \left[\sqrt{(x_2^0 + x_{cp})(x_2 - x_{cp})} - \sqrt{(x_2^0 + x_o)(x_2 - x_o)} \right] - \\
& - \frac{R_2}{2} \left[\sqrt{(x_2^0 + x_b)(x_2 - x_b)} + \sqrt{(x_2^0 + x_{cp})(x_2 - x_{cp})} \right] = 0
\end{aligned} \tag{5}$$

На рис. 2-7 построены изобары в окрестности выработанного пространства при $\lambda = 0,9$, $H = 1000$ м, $2h = 1$ м, $x_1 = 10$ м, $T_n = 25 \text{ кГ/см}^2$, $c_p = 0$ в случае отсутствия крепи и при наличии крепи (при этом $R_1 = 6 \text{ кГ/см}^2$, $R_2 = 2 \text{ кГ/см}^2$ и длина специальной крепи $x_{cp} - x_o = 4,5$ м, длина призабойной крепи $x_b - x_{cp} = 4$ м). Длины зон пластических деформаций $(x_2^0 - x_1)$ и $(x_2 - x_1)$ находим из системы трансцендентных уравнений (4) и (5). В случае отсутствия крепи они равны $(x_2^0 - x_1) = 10,2054$ и $(x_2 - x_1) = 10,2054$, и при наличии крепи $(x_2^0 - x_1) = 10,1898$ и $(x_2 - x_1) = 10,1808$.

На рис. 2-3 построены линии постоянного значения $\sigma_v^* / \gamma H = \text{const}$ в окрестности очистной выработки после выемки угля комбайном. Комплекты крепи установлены на расстоянии от угольного забоя на 0,3 м. В области над пластом действуют сжимающие напряжения, а в области свободного зависания кровли существуют как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Последние могут вызывать расслоение и обрушение горных пород кровли в выработанное пространство. Максимум опорного давления достигается на расстоянии 20 м и составляет $\sigma_v^* / \gamma H = -2,0$. Из рисунков видно, что при закреплении части выработанного пространства растягивающие и сжимающие напряжения уменьшаются. А в зоне закрепления существуют пониженные сжимающие напряжения, и отсутствуют растягивающие, что предотвращает обрушение пород в рабочее пространство.

На рис. 4-5 показаны графики напряжений $\sigma_x^* / \gamma H = \text{const}$, действующего в направлении напластования в породах кровли. Из графиков видно, что над пластом осуществляются сжатия высокой интенсивности $\sigma_x^* / \gamma H = -2,2$ в окрестности максимума опорного давления. Как в области выработанного пространства, так и в закрепленной части наблюдаются сжимающие и растягивающие напряжения. Из рисунков видно, что при наличии крепи напряжения практически не уменьшаются. Явно выражена в породах кровли линия $\sigma_x^* / \gamma H = 0,0$, ниже которой возникают растяжения достаточно высокой интенсивности. Выше формируются процессы разгрузки со сжатиями.

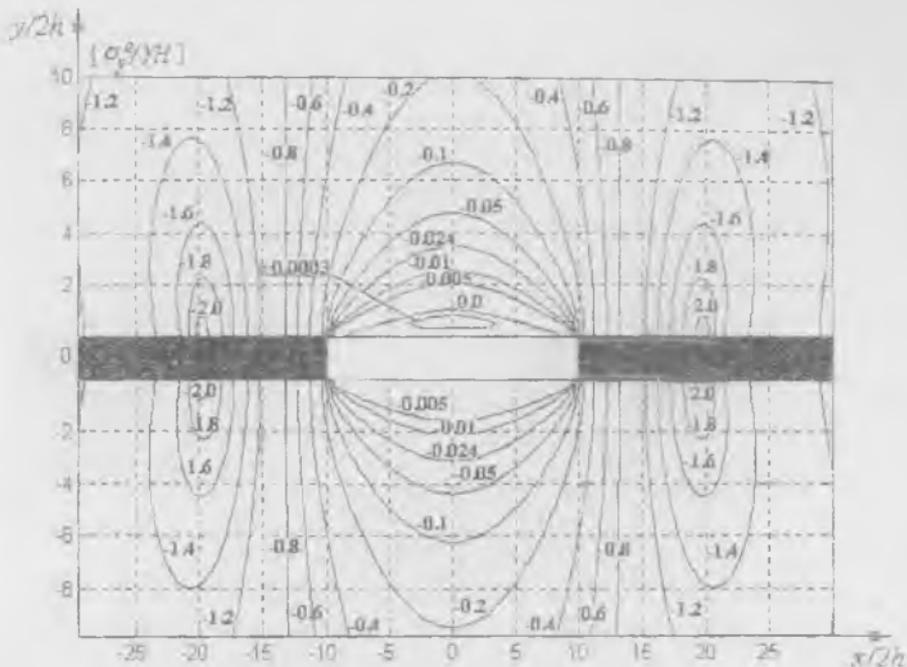


Рис.2. Линии постоянного значения компоненты напряжения $\sigma_y = const$ в окрестности выработанного пространства.

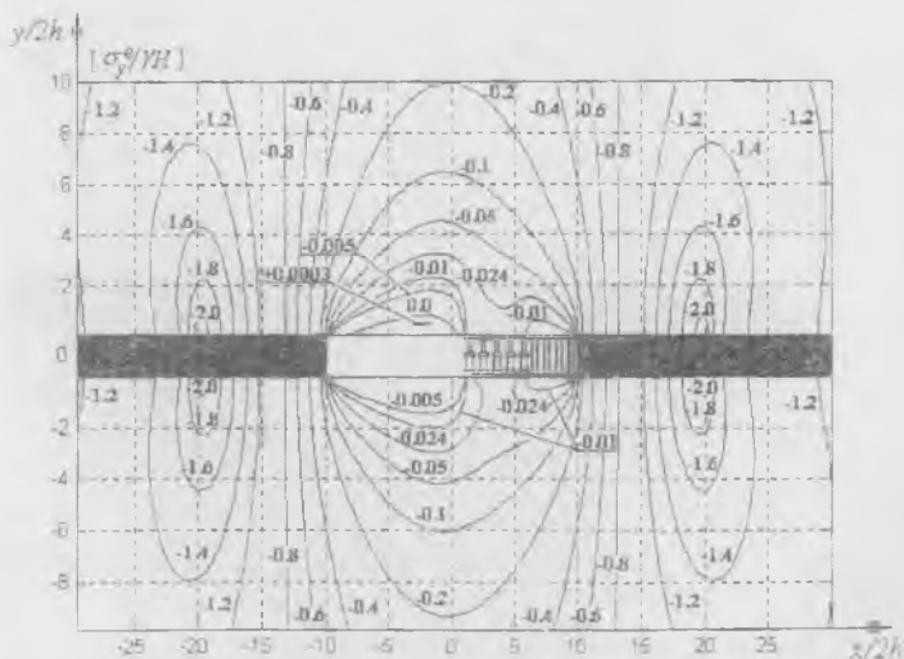


Рис.3. То же что на рис.2, но для $x_a=1.2$ м, $x_{cp}=5.7$ м, $x_b=9.7$ м, $R_1=6$ кГ/см², $R_2=2$ кГ/см².

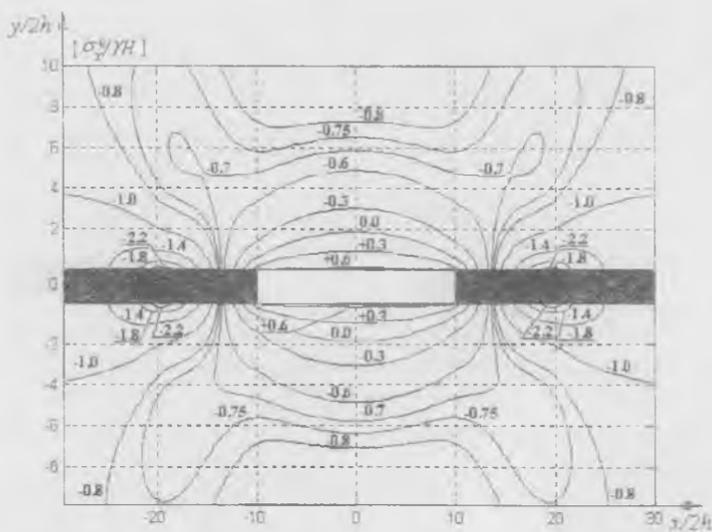


Рис.4. То же что на рис.2, но для $\sigma_x^e = const.$

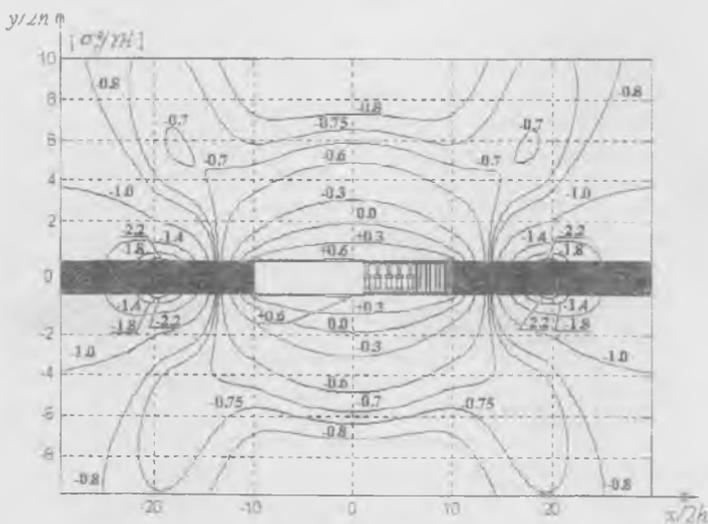


Рис.5. То же что на рис.3, но для $\sigma_x^e = const.$

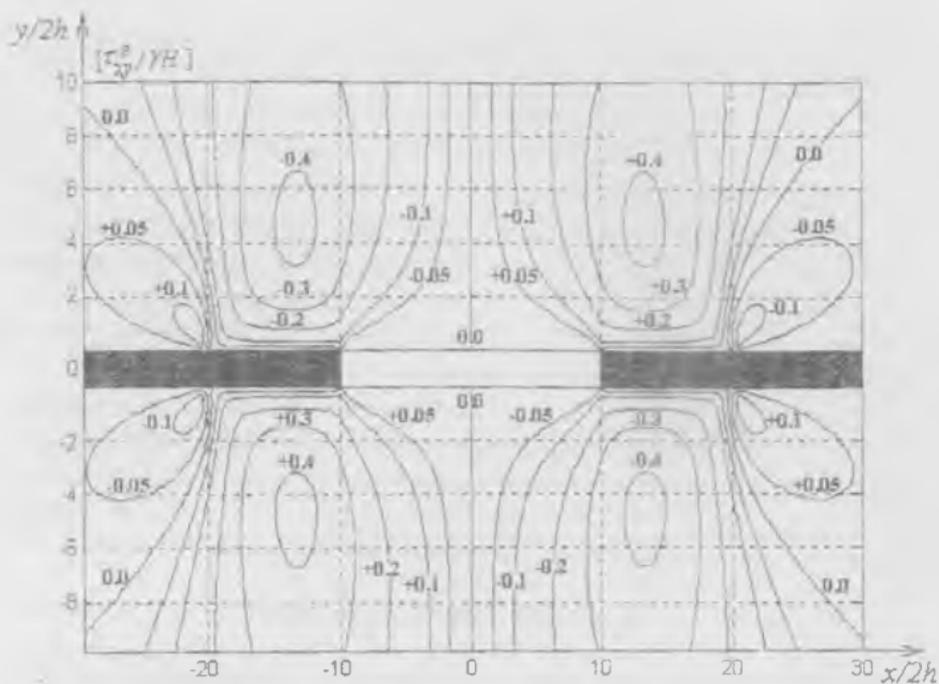


Рис.6. То же что на рис.2, но для $\tau_{xy}^e = const$.

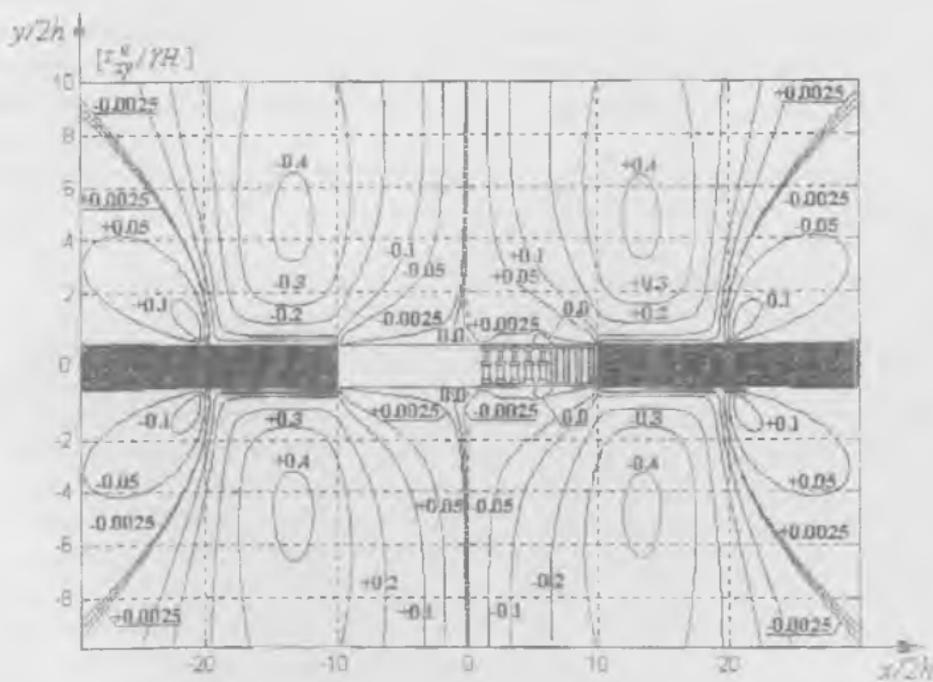


Рис.7. То же что на рис.3, но для $\tau_{xy}^e = const$.

На рис. 6-7 представлены графики $\tau_{\sigma}^e / \gamma H = const$ в породах кровли при разработке пласта. Указанные напряжения работают на скалывание пород. Максимум скалывающих напряжений достигается на высоте 5 м над зоной пластических деформаций и порядка 2-3 м от забоя. Но уже при 8 м напряжения медленно затухают. Интерес представляет кривая $\tau_{\sigma}^e / \gamma H = 0,0$, выходящая практически из точки максимума опорного давления и являющаяся линией раздела знака этого напряжения. Она показывает, что интенсивный прогиб кровли начинается из этой точки. В случае наличия крепи нулевые напряжения появляются над закрепленной частью выработанного пространства и отдаляются от забоя.

Проведенный численный анализ показывает, что призабойная крепь вызывает сжатия пород кровли в окрестности выработанного пространства, специальная крепь приводит к уменьшению растягивающих напряжений в области свободно зависающей кровли, тем самым выполняет функцию управления кровлей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. А.С.Космодамианский, А.А.Левшин, Доклады АН УССР 9, 34. (1986)
2. А.А.Левшин, Известия АН СССР. Механика твердого тела 5, 180 (1981)
3. А.А.Левшин, Р.И.Мануйленко, С.Н.Федотов, Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при разработке пласта полезного ископаемого с закреплением части выработанного пространства // Физика и техника высоких давлений. 1997, №2. С 143-150.
4. Р.Хилл, Математическая теория пластичности, Изд-во техн.-теорет. лит., Москва (1956).