Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.XIУ, вып.1, 1974 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ПОЛЕВОЙ ВЫРАБОТКИ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ВЛИЯНИЮ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

А.Г.Протосеня

Для определения места рационального расположения полевых подготовительных выработок, выбора типа крепи, установления технических условий для ее проектирования и решения других практических вопросов необходимо оценивать напряженное состояние породного массива вблизи этих выработок.

В настоящее время исследованию напряженно-деформированного состояния вокруг полевых подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ посвящено большое число экспериментальных работ [2,7,8,9,12]. Однако имеются только отдельные работы, в которых рассматриваются методы расчета напряжений в окружающих породах [1,5].

В данной работе исследуется распределение напряжений вблизи незакрепленной полевой выработки, испытывающей надработку.

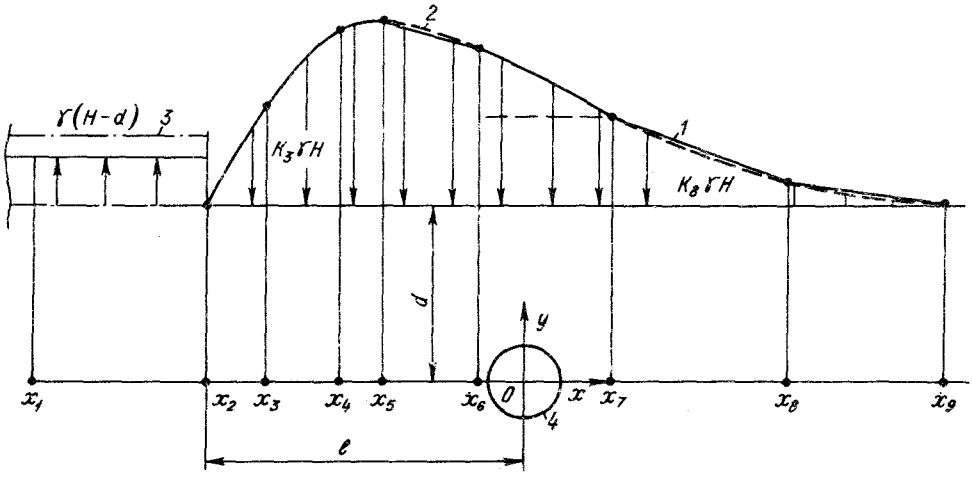


Рис.1. Расчетная схема:
1 – эпюра опорного давления $f(l)\gamma H$; 2 – аппроксимация эпюры опорного давления кусочно-линейной нагрузкой; 3 – контур очистной выработки; 4 – подготовительная выработка

Рассмотрим выработку, расположенную в изотропном линейно-деформируемом массиве круглого, квадратного, эллиптического, сводчатого, полигонального сечения с гладким контуром и круглого с неровным. Компоненты напряжений вокруг нее определяются суммой их значений вблизи одиночной выработки и дополнительных напряжений, вызванных влиянием очист-

ных работ. Первые из них известны, и задача сводится к определению вторых.

Рассматривается случай, когда ось выработки параллельна длинному очистному забою при горизонтальном залегании пласта. В этом случае для исследования напряженного состояния пород вокруг выработки в средней части очистного забоя можно ограничиться анализом напряжений в плоскости нормальной к оси выработки [4,6,10]. В дальнейшем породный массив рассматривается в этой плоскости.

Для определения дополнительных напряжений произведем сечение плоскости по контакту уголь-порода и рассмотрим породный массив в нижней полуплоскости. Воздействие очистного забоя заменим нагрузками, приложенными к ее границе (рис.1).

На участке x_1, x_2, равном ширине очистной выработки, приложена растягивающая нагрузка интенсивностью $-\gamma(H-d)$, поскольку суммарные нормальные напряжения на нем равны нулю (очистная выработка незакреплена). Здесь H – глубина заложения подготовительной выработки; γ – средний объемный вес горных пород; d – расстояние от угольного пласта до центра подготовительной выработки. Влияние крепи очистной выработки на распределение напряжений в породном массиве учесть нетрудно. Ее воздействие можно моделировать сосредоточенными силами, приложенными на участке x_1, x_2.

Влияние на распределение напряжений в горном массиве обрушенных пород кровли слева от участка x_1, x_2 характеризуется дополнительными нагрузками, приложенными к границе полуплоскости. Величина их может быть установлена по методу, предложенному в работе [10].

Эпюра опорного давления $f(l)\gamma H$ принята в неявном виде, поскольку она имеет различные аналитические выражения в зависимости от прочностных и деформационных свойств основной и непосредственной кровли, их совместной работы, глубины разработки, размеров очистного забоя и многих других факторов [6,10]. При решении частных задач для конкретных горно-технических условий вид эпюры устанавливается расчетом или экспериментально.

Дополнительные напряжения σ_x, σ_y, τ_{xy} в породном массиве равны сумме напряжений σ'_x, σ'_y, τ'_{xy} в полуплоскости от внешней нагрузки и σ^*_x, σ^*_y, τ^*_{xy}, вызванных проведением выработки. Допустим, что σ'_x, σ'_y, τ'_{xy} известны (о их вычислении будет сказано ниже). При этом задача сводится к определению напряжений σ^*_x, σ^*_y, τ^*_{xy}.

Ограничимся рассмотрением выработок, расположенных от пласта на расстоянии $d \geqslant 4{,}5R$ (R – величина, определяющая размеры проектного контура выработки). Принятое ограничение не снижает практическую ценность решения, поскольку подготовительные выработки обычно расположены на расстоянии $d > 4{,}5R$ [7].

Задача определения напряжений σ^*_x, σ^*_y, τ^*_{xy} сводится к нахождению их в полуплоскости с отверстием, по контуру которого приложены усилия $-\sigma'_x$, $-\sigma'_y$, $-\tau'_{xy}$, равные по величине и обратные по знаку напряжениям от внешней нагрузки. Для упрощения пренебрежем изменением указанных напряжений σ'_x, σ'_y, τ'_{xy} по высоте и ширине выработки, считая их постоянными и равными значениям σ°_x, σ°_y, τ°_{xy} в центре ее поперечного сечения. Возникающая при этом ошибка для данных значений d находится в пределах точности расчетов.

110109

ЛГИ
Библиотека

На контуре L незакрепленной выработки напряжения σ_x^*, σ_y^*, τ_{xy}^* удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned}\sigma_x^* \cos(n,x) + \tau_{xy}^* \cos(n,y) &= \sigma_x^\circ \cos(n,x) + \tau_{xy}^\circ \cos(n,y)\ ;\\ \tau_{xy}^* \cos(n,x) + \sigma_y^* \cos(n,y) &= \tau_{xy}^\circ \cos(n,x) + \sigma_y^\circ \cos(n,y)\ ,\end{aligned} \tag{1}$$

где $\cos(n,x)$, $\cos(n,y)$ – косинусы углов между нормалью к контуру выработки и осями координат, соответственно, x, y .

При определении напряжений σ_x', σ_y', τ_{xy}' для значений $d \geqslant 4{,}5R$ можно перейти от полуплоскости к бесконечной плоскости с отверстием. Возникающая при этом ошибка будет меньше 6% [11], что вполне достаточно для практических расчетов.

После несложных преобразований выражения (1) получим граничное условие на контуре выработки

$$\varphi(t) - t\,\overline{\varphi'(t)} + \overline{\psi(t)} = -\frac{\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ}{2}\,t + \frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y}{2}\,\overline{t} + i\tau_{xy}^\circ\,\overline{t}\ , \tag{2}$$

где t – аффикс точки контура L .

Введенные в это равенство функции $\varphi(z), \psi(z)$ комплексного переменного – аналитические вне контура L и исчезают на бесконечности.

Контур выработки с достаточной точностью может быть описан кривой [3]

$$z = \omega(\xi) = R\left(\xi + \frac{c}{\xi^m}\right)\ , \tag{3}$$

где c, m – величины, определяющие, соответственно, очертание и форму проектного контура: при $m = 0$ и $c = 0$ проектный контур – окружность; при $m = 1$ и $0 < c < 1$ – эллипс; при $m = 2$ $c = 0{,}1$ – криволинейный треугольник (сводчатый контур); при $m = 3$ и $c = \frac{1}{3} - \frac{1}{10}$ – криволинейный квадрат; при $m = 4{,}5$ ..... и $0 < c < \frac{1}{m}$ – криволинейный многоугольник, соответствующий полигональному контуру. При неровном контуре c – амплитуда возмущений в долях R , а m – целое число возмущений без единицы.

Для нахождения функций $\varphi(z), \psi(z)$ отобразим конформно внешность единичного круга на внешность контура горной выработки (3). Тогда граничное условие (2) переобразуется к виду

$$\varphi(\sigma) + \frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}}\,\varphi'(\sigma) + \overline{\psi(\sigma)} = -\frac{\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ}{2}\,\omega(\sigma) + \left(\frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ}{2} + i\tau_{xy}^\circ\right)\overline{\omega(\sigma)}\ , \tag{4}$$

где σ – значение комплексной переменной ξ на контуре единичной окружности λ ; $\varphi(\sigma)$, $\omega(\sigma)$, $\psi(\sigma)$ – значения функций, соответственно, $\varphi(\xi)$, $\omega(\xi)$, $\psi(\xi)$ на контуре единичной окружности λ .

Неизвестные функции $\varphi(\xi)$, $\psi(\xi)$ будем искать в виде рядов

$$\varphi(\xi)=\sum_{j=1}^{\infty}\alpha_j\xi^{-j}\ ;\qquad \psi(\xi)=\sum_{j=1}^{\infty}\beta_j\xi^{-j}\ . \tag{5}$$

Преобразуем граничное условие (4) и ему сопряженное внесением в них соотношения (5), умножением полученных выражений на $\frac{1}{2\pi i}\frac{d\sigma}{\sigma-\xi}$ и интегрированием на λ

$$\varphi(\xi)=\frac{1}{2\pi i}\int_{\lambda}\frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}}\frac{\overline{\varphi'(\sigma)}}{\sigma-\xi}\,d\sigma+\frac{\sigma_x^\circ+\sigma_y^\circ}{4\pi i}\int_{\lambda}\frac{\omega(\sigma)}{\sigma-\xi}\,d\sigma- \tag{6}$$
$$-\frac{1}{2\pi i}\left(\frac{\sigma_x^\circ-\sigma_y^\circ}{2}+i\tau_{xy}^\circ\right)\int_{\lambda}\frac{\overline{\omega(\sigma)}}{\sigma-\xi}\,d\sigma\ ;$$

$$\psi(\xi)=\frac{1}{2\pi i}\int_{\lambda}\frac{\overline{\omega(\sigma)}}{\omega'(\sigma)}\frac{\varphi'(\sigma)}{\sigma-\xi}\,d\sigma+\frac{\sigma_x^\circ+\sigma_y^\circ}{4\pi i}\int_{\lambda}\frac{\overline{\omega(\sigma)}}{\sigma-\xi}\,d\sigma- \tag{7}$$
$$-\frac{1}{2\pi i}\left(\frac{\sigma_x^\circ-\sigma_y^\circ}{2}+i\tau_{xy}^\circ\right)\int_{\lambda}\frac{\omega(\sigma)}{\sigma-\xi}\,d\sigma\ .$$

Искомые функции $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ найдем, внеся выражение (3) в функциональные уравнения (6) и (7) и вычисляя контурные интегралы,

$$\varphi(\xi)=-\left[\frac{\sigma_y^\circ-\sigma_x^\circ}{2(1-mc+2c)}+i\,\frac{c(m-2)\tau_{xy}^\circ}{1+mc-2c}\right]\frac{R}{\xi}-\frac{\sigma_x^\circ+\sigma_y^\circ}{2}\,\frac{Rc}{\xi^m}\ ; \tag{8}$$

$$\psi(\xi)=-\left[\frac{R(\sigma_y^\circ-\sigma_x^\circ)}{2(1-mc+2c)}+i\,\frac{Rc(m-2)\tau_{xy}^\circ}{1+mc-2c}\right]\left(\xi^{m-2}\,\frac{1+c\xi^{m+1}}{mc-\xi^{m+1}}+c\xi^{m-2}\right)+$$
$$+Rc\left(\frac{\sigma_x^\circ-\sigma_y^\circ}{2}-i\tau_{xy}^\circ\right)\frac{1}{\xi^m}-\frac{\sigma_x^\circ+\sigma_y^\circ}{2}\,\frac{R(1+mc)}{\xi}\ . \tag{9}$$

Сумма окружного и радиального нормальных напряжений σ_θ^* и σ_ρ^*, возникающих на контуре выработки L вследствие ее проведения, может быть найдена по функциям (8) и (9) с помощью известных формул [3]

$$\sigma_\theta^*+\sigma_\rho^*=\frac{2}{1-2mc\cos(m+1)\theta+m^2c^2}\left\{\frac{\sigma_y^\circ-\sigma_x^\circ}{1-mc+2c}\left[\cos2\theta-\right.\right.$$
$$-mc\cos(m+1)\theta\Big]+\frac{2c(m-2)\tau_{xy}^\circ}{1+mc-2c}\left[\sin2\theta+mc\sin(m-1)\theta\right]+ \tag{10}$$
$$\left.+m^2c(\sigma_x^\circ+\sigma_y^\circ)\left[\cos(m+1)\theta-mc\right]\right\},$$

где θ – угловая координата.

Усилия на контуре выработки в полярной системе координат выражаются соотношениями

$$\sigma_\theta^\circ = \frac{\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ}{2} - \frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ}{2}\cos 2\theta - \tau_{xy}^\circ \sin 2\theta \ ;$$

$$\sigma_\rho^\circ = \frac{\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ}{2} + \frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}^\circ \sin 2\theta \ ; \qquad (11)$$

$$\tau_{\rho\theta}^\circ = -\frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ}{2}\sin 2\theta + \tau_{xy}^\circ \cos 2\theta \ .$$

При этом $\sigma_\rho^* = -\sigma_\rho^\circ$. Внеся второе соотношение (11) в выражение (10), найдем напряжение σ_θ^* на контуре выработки

$$\sigma_\theta^* = \frac{2}{1-2mc\cos(m+1)\theta+m^2c^2}\left\{\frac{\sigma_y^\circ - \sigma_x^\circ}{1-mc+2c}\left[\cos 2\theta - mc\cos(m+1)\theta\right] + \right.$$

$$+ \frac{2c(m-2)\tau_{xy}^\circ}{1+mc-2c}\left[\sin 2\theta + mc\sin(m-1)\theta\right] + m^2c\left(\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ\right)\left.\left[\cos(m+1)\theta - mc\right]\right\} + \qquad (12)$$

$$+ \frac{\sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ}{2} + \frac{\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}^\circ \sin 2\theta \ .$$

Вычисление напряжений σ_x', σ_y', τ_{xy}', возникающих в надработанном массиве под влиянием очистных работ, согласно расчетной схеме (рис. 1), сводится к определению напряжений в полуплоскости от действия нагрузок, приложенных к ее границе.

Выше сказано, что аналитическое выражение кривой опорного давления различно в зависимости от конкретных условий и не всегда известно, поэтому аппроксимируем ее кусочно-линейной кривой (рис.1). В этом случае эпюра опорного давления заменяется приближенной эпюрой, состоящей из кусочно-линейных нагрузок трех типов: прямоугольной, треугольной и трапецеидальной. Трапецеидальную нагрузку можно разложить на нагрузки первых двух типов. Таким образом, задача свелась к определению напряжений в полуплоскости от прямоугольной и треугольной нагрузок. Эти напряжения найдем, используя решение задачи Фламана-Буссинеска.

Компоненты напряжений σ_x', σ_y', τ_{xy}' в случае действия нагрузки $-\gamma(H-d)$ на участке x_1, x_2 имеют вид

$$\sigma_x' = -\frac{\gamma(H-d)}{\pi}\left[\operatorname{arctg}\frac{z_1}{d-y} - \operatorname{arctg}\frac{z_2}{d-y} + \frac{z_2(d-y)}{r_2^2} - \frac{z_1(d-y)}{r_1^2}\right] ;$$

$$\sigma_y' = -\frac{\gamma(H-d)}{\pi}\left[\operatorname{arctg}\frac{z_1}{d-y} - \operatorname{arctg}\frac{z_2}{d-y} - \frac{z_2(d-y)}{r_2^2} + \frac{z_1(d-y)}{r_1^2}\right] ; \qquad (13)$$

$$\tau_{xy}' = -\frac{\gamma(H-d)}{\pi}(d-y)^2\left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2}\right) ,$$

где

$$z_i = x - x_i \ ; \qquad r_i^2 = (x-x_i)^2 + (d-y)^2 \qquad (i = 1, 2, 3, \ldots) \ .$$

Напряжения в полуплоскости при действии постоянной нагрузки $P = \text{const}$ могут быть получены из выражений (13) заменой $-\gamma(H-d)$ на P.

При действии треугольной нагрузки $P(\xi) = \frac{k_3 \gamma H}{x_3 - x_2}(\xi - x_2)$ на участке x_2, x_3 напряжения σ_x', σ_y', τ_{xy}' выражаются следующими зависимостями:

$$\sigma_x' = \frac{k_3 \gamma H}{\pi(x_3 - x_2)}\left[2z_2\left(\operatorname{arctg}\frac{z_3}{d-y} - \operatorname{arctg}\frac{z_2}{d-y}\right) - z_2(d-y)\left(\frac{z_3}{r_3^2} - \frac{z_2}{r_2^2}\right) - \right.$$

$$\left. - (d-y)\ln\frac{r_3^2}{r_2^2} - (d-y)^3\left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)\right];$$

$$\sigma_y' = \frac{k_3 \gamma H}{\pi(x_3 - x_2)}\left[z_2\left(\operatorname{arctg}\frac{z_2}{d-y} - \operatorname{arctg}\frac{z_3}{d-y}\right) - z_2(d-y)\left(\frac{z_3}{r_3^2} - \frac{z_2}{r_2^2}\right) + (d-y)^3\left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)\right]; \quad (14)$$

$$\tau_{xy}' = \frac{k_3 \gamma H(d-y)}{\pi(x_3 - x_2)}\left[\operatorname{arctg}\frac{z_3}{d-y} - \operatorname{arctg}\frac{z_2}{d-y} - (d-y)\left(\frac{z_2}{r_3^2} + \frac{z_3}{r_2^2}\right)\right].$$

Компоненты напряжений в полуплоскости при действии треугольной нагрузки $P(\xi) = \frac{k_8 \gamma H}{x_9 - x_8}(x_9 - \xi)$ на участке x_8, x_9 можно вычислить по формулам (14).

Полные компоненты напряжений σ_x', σ_y', τ_{xy}' в полуплоскости от действия всей нагрузки равны сумме компонентов σ_{xj}', σ_{yj}', τ_{xyj}' от отдельных кусочно-линейных нагрузок.

$$\sigma_x' = \sum_{j=1}^{n_1}\sigma_{xj}' + \sum_{j=1}^{n_2}\sigma_{xj}';$$

$$\sigma_y' = \sum_{j=1}^{n_1}\sigma_{yj}' + \sum_{j=1}^{n_2}\sigma_{yj}'; \quad (15)$$

$$\tau_{xy}' = \sum_{j=1}^{n_1}\tau_{xyj}' + \sum_{j=1}^{n_2}\tau_{xyj}',$$

где n_1, n_2 – число кусочно-линейных нагрузок, соответственно, прямоугольных и треугольных.

Напряжения в полуплоскости при действии касательных усилий на ее границе определяются аналогично. Формулы для вычисления напряжения в полуплоскости при распределении касательных напряжений по прямоугольному и трапецеидальному закону приведены в работе В.А.Флорина [13].

При наклонном и крутом залегании пластов напряженное состояние в окрестности полевой подготовительной выработки можно определить аналогично.

В качестве примера найдем напряжения σ_θ на контуре выработки круглой формы при следующих исходных данных: $\gamma = 2{,}5$ т/м^2; $H = 400$ м; $d = 15$ м; $R = 2$ м; $m = 0$; $c = 0$; $x_1, x_2 = 150$ м. Эпюра опорного давления для данных условий взята из работы [10] и представлена на

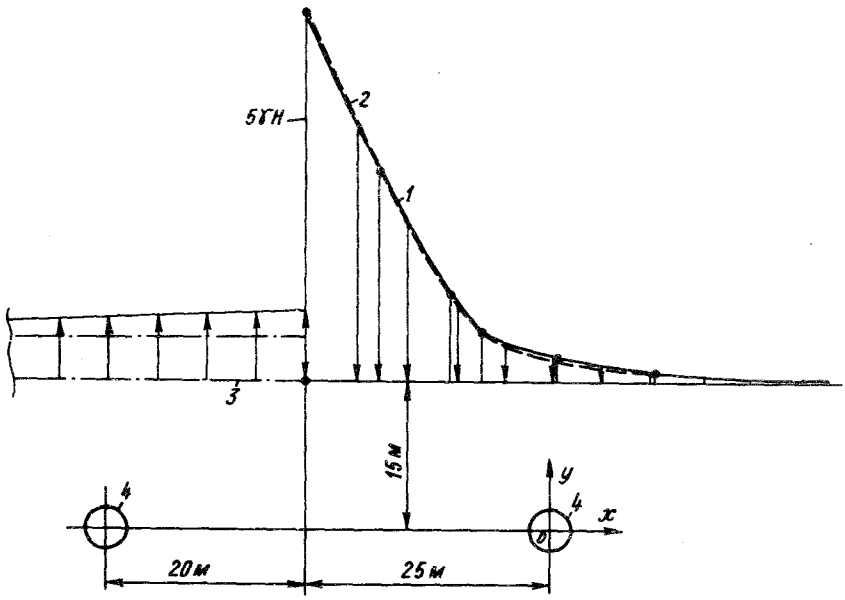


Рис.2. Схемы взаимного расположения очистной и подготовительной выработок:
1 – эпюра опорного давления; 2 – аппроксимация эпюры опорного давления; 3, 4 – контуры поперечных сечений, соответственно, очистной и подготовительной выработок

рис. 2. Расчет ее произведен с учетом обрушения пород кровли в очистном пространстве. Коэффициент бокового распора нетронутого массива принят равным 1.

Напряжения σ_θ вычислены на $\frac{1}{4}$ контура выработки, проведенной впереди забоя на расстоянии l_1 = 25 м от граничной плоскости и на расстоянии l_2 = 20 м позади нее (рис.2).

Результаты расчета сведены в таблицу и графически представлены на рис. 3.

Результаты расчета напряжения σ_θ на контуре горной выработки

Угловая координата θ, град	σ_θ в долях γH	
	l_1 = 25 м	l_2 = 20 м
0	4,80	-0,15
30	3,60	0,52
60	2,28	1,80
90	2,00	2,44

Анализ результатов расчета свидетельствует о существенном влиянии очистных работ на распределение напряжений вокруг подготовительной выработки.

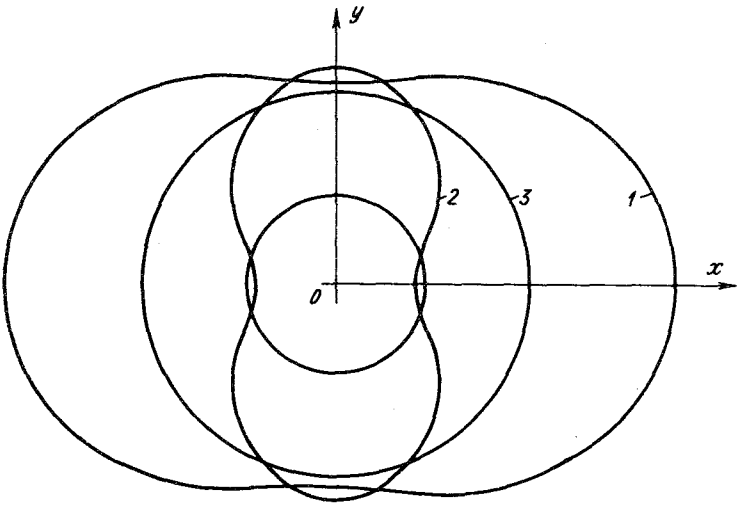


Рис.3. Эпюры распределения напряжений σ_θ по контуру подготовительной горной выработки:
1 – при l_1 = 25 м; 2 – при l_2 = 20 м; 3 – влияние очистных работ отсутствует

Величина и характер распределения напряжений вблизи нее определяются условиями взаимного расположения очистной и подготовительной выработок. В последней растягивающие напряжения могут появиться и при начальном гидростатическом напряженном состоянии нетронутого массива.

Предложенный метод определения напряжений может быть использован при оценке устойчивости подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ.

Литература

1. Акимов В.С., Цыцаркин В.Н., Остросаблин Н.И. Упругое равновесие пород вокруг полевого штрека, находящегося в зонах влияния очистных работ. – Сб.: Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. Новосибирск, 1971.

2. Бажин Н.П. Расположение подготовительных выработок при подработке. – "Уголь", 1962, № 11.

3. Баклашов И.В., Руппенейт К.В. Прочность незакрепленных горных выработок. М., "Недра", 1965.

4. Барановский Б.И. и др. Оценка разгруженных от горного давления зон в толще пород под выработанным пространством. – "Технология добычи угля подземным способом". 1971, № 1.

5. Бокий Б.В. Протосеня А.Г. Оценка концентрации напряжений вблизи горной выработки, испытывающей влияние очистных работ. Новосибирск, "Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых". 1972, № 4.

6. Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. М., "Недра", 1964.

7. Глушко В.Т., Широков А.З. Механика горных пород и охрана выработок. Киев, "Наукова думка", 1967.

8. Зборщик М.П., Братишко А.С., Прокофьев В.П. Выбор способов охраны и места расположения подготовительных выработок. Киев, "Техника", 1970.

9. Калюжный Н.Т., Видулин А.Е. Расположение полевых выработок при разработке угольных месторождений. М., Госгортехиздат, 1961.

10. Расчет границ защищенных зон. Методические указания. Л., ВНИМИ, 1969.

11. Савин Г.И. Распределение напряжений около отверстий. Киев, "Наукова думка", 1968.

12. Сивко В.И., Савостьянов А.В., Моисеев М.А. Влияние опорного давления на состояние полевых штреков. – "Уголь", 1965, № 3.

13. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т.1. М., Госстройиздат, 1959.