

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗОНЫ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТОВОЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

**к.т.н. Пивень Ю.А., к.т.н. Борисенко Э.В. (ДонНИИ), к.т.н. Шевченко М.Т. (ПО «Дзержинскуголь»), инж. Деуленко А.И. (ПО Артемуголь)**

В настоящее время широкое развитие получили аналитические методы расчетов напряженно-деформированного состояния, основанные на использовании методов теории упругости и пластичности, опубликованные в работах С.А. Христиановича, А.С. Космодамианского, А.А. Левшина и др. [1-4].

При прохождении подготовительной выработки в массиве горных пород происходят процессы перераспределения напряжений и деформаций. Имеет место деформирование и разрушение боковых пород в связи с потерей равновесного состояния.

В данной работе в рамках плоской деформации исследовано напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород при прохождении пластовой подготовительной выработки с ее креплением арочной крепью рассмотренное в работах А.А. Левшина [2,3]. Вначале рассмотрим вспомогательную задачу теории упругости для анизотропного пространства.

Пусть анизотропная среда с одной плоскостью упругой симметрии занимает верхнее полупространство и находится в условиях плоской деформации. Выберем прямоугольную систему координат  $xOy$ , направив ось  $x$  вдоль границы  $L$  полуплоскости  $G^+$ , а ось  $y$  - вертикально вверх. Пусть комплексная переменная  $z = x + iy$  принадлежит верхней полуплоскости. На действительной оси расположены непересекающиеся конечные отрезки  $(a_k, b_k)$ ,  $k = 1, \dots, m$ , совокупность которых обозначим через  $L_1$ . Совокупность  $(b_k, a_{k+1})$  обозначим через  $L_2$ , причем полагаем  $a_{m+1} = a_1$ . При этом выполняется условие  $a_1 < b_1 < \dots < a_m < b_m$ . На границе заданы следующие условия:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= p(t), & t \in L_1; \\ \nu &= w(t), & t \in L_2, \\ \tau_{xy} &= 0, & t \in L. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $w(t)$  - функция, дифференцируемая на  $L_2$ ;  $p(t)$  и  $w'(t)$  - функции, удовлетворяющие условию Гельдера [1] на  $L_1$  и  $L_2$  соответственно, включая бесконечно удаленную точку, где  $w'(\infty) = 0$ ;  $t$  - аффикс контура.

Компоненты тензора напряжений и производной вектора перемещения выражаются через две аналитические функции  $\Phi(z_1)$  и  $\Psi(z_2)$  усложненных комплексных переменных [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2 \operatorname{Re}[\mu_1^2 \Phi(z_1) + \mu_2^2 \Psi(z_2)] \\ \sigma_y &= 2 \operatorname{Re}[\Phi(z_1) + \Psi(z_2)] \\ \tau_{xy} &= -2 \operatorname{Re}[\mu_1 \Phi(z_1) + \mu_2 \Psi(z_2)] \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= 2 \operatorname{Re}[p_1 \Phi(z_1) + p_2 \Psi(z_2)] \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= 2 \operatorname{Re}[q_1 \Phi(z_1) + q_2 \Psi(z_2)] \\ z &= x + \mu_j y, \quad j = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - компоненты тензора напряжений;  $u$  и  $v$  - перемещения в направлении осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $z_j$  ( $j = 1, 2$ ) - усложненные комплексные переменные;  $\mu_j = \alpha_j + i\beta_j$  - корни характеристического уравнения, порождаемого дифференциальным оператором четвертого порядка;  $p_j, q_j$  - известные постоянные [5].

Предположим, что главный вектор внешних усилий, действующих на границе полуплоскости, конечен, комплексные потенциалы исчезают на бесконечности  $\Phi(\infty) = \Psi(\infty) = 0$ . Общее решение граничной задачи (1), сингулярное во всех точках раздела граничных условий и исчезающее на бесконечности, найдем с помощью работы [1,5]. Для рассматриваемого частного случая имеем:

$$\begin{aligned} F(z) &= \frac{1}{\pi i X(z)} \int \frac{X^+(t) Y_0(t)}{t-z} dt + \Phi_0(z) \\ \Phi_0(z) &= \frac{c_1 z^{n-1} + c_2 z^{n-2} + \dots + c_n}{X(z)} \\ X(z) &= \prod_{k=1}^n \sqrt{(z-a_k)(z-b_k)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$h_0(t) = \langle \rho(t)^{1/2}, \quad i\alpha L_1 \\ -i\alpha(t)^{1/2}, \quad i\alpha L_2 \rangle$$

$$\Psi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} F(z_2).$$

$$\beta = \frac{\beta_{22}}{2i} \left[ \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\bar{\mu}_1} + \frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\bar{\mu}_2} \right]$$

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1).$$

где:  $c_1, \dots, c_n$  - произвольные вещественные постоянные;  $\beta_{22}$  - приведенная упругая постоянная [5].

Вещественные постоянные  $c_i$  определяются из следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$w(b_k) - w(a_k) = -2 \int_{a_k}^{b_k} \beta m F(t) dt, \quad k = 1, \dots, m. \quad (4)$$

После нахождения решения системы (4) комплексные потенциалы (3) становятся полностью определенными и являются единственным решением граничной задачи (1).

С помощью предложенного подхода изучим напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород при обработке горизонтального пласта полезного ископаемого мощностью  $2h$ , расположенного на глубине  $H$  от дневной поверхности. Расчетная схема представлена на рис. 1, из которой

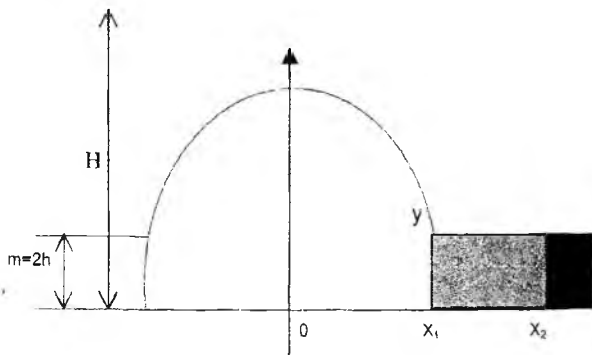


Рис. 1. Расчетная схема к аналитическому расчету зоны пластических деформаций.

следует, что ширина подготовительной выработки составляет  $2(x_0, x_1)$ , закрепленной арочной крепью. Считаем, что в краевых частях  $(-x_2, -x_1)$  и  $(x_1, x_2)$  пласт деформируется в соответствии со своими пластическими свойствами. Компоненты тензора в массиве ищем в виде естественных и дополнительных напряжений в следующем виде:

$$\sigma_x^e = \sigma_x^0 + \sigma_x, \quad \sigma_y^e = \sigma_y^0 + \sigma_y, \quad \tau_{xy}^e = \tau_{xy}^0 + \tau_{xy}. \quad (5)$$

Для достаточно больших глубин ведения горных работ можно пренебречь влиянием дневной поверхности при определении дополнительных напряжений. Естественное состояние массива вызвано его собственным весом и в системе координат  $xOy$  для данного случая описывается формулами

$$\sigma_y^0 = -\gamma(H-y), \quad \sigma_x^0 = -\lambda\gamma(H-y), \quad \tau_{xy}^0 = 0, \quad (6)$$

где  $\lambda$  - коэффициент бокового распора.

Физическая постановка задачи позволяет сформулировать граничные условия для верхней полуплоскости с границей вдоль действительной оси в виде

$$\begin{aligned} v &= h, \quad x \in (-\infty, -x_2^0) \cup (x_2, +\infty), \\ \sigma_y &= \gamma H - (a_1 x + c_1), \quad -x_2 < x < -x_1, \\ \sigma_y &= \gamma H - (a_2 x + c_2), \quad x_1 < x < x_2, \\ \tau_{xy} &= 0, \quad |x| < \infty. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $a_2 = T_n/h$ ,  $T_n$  - предел текучести в плоскости  $xOy$  для угля пласта;  $a_1 = -a_2$ ;  $c_2 = T_n \left( \sqrt{1 - c_p} \frac{\pi}{2} - \frac{x_1}{h} \right)$ ;  $c_1 = c_2$ ;  $c_p$  - параметр пластической анизотропии пласта, величина которого изменяется в интервале  $(-\infty, 1)$  [2,3].

Решение смешанной задачи (7) восстанавливаем с помощью (1)-(4) в виде

$$\Phi(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1), \quad \Psi(z_2) = -\frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} F(z_2) \quad (8)$$

При этом

$$\begin{aligned}
 F(z) = & \frac{\lambda H}{2} + \frac{a_1}{\pi} \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2^0-x_1}{x_2+x_1}} + \frac{a_1 z + c_1}{2\pi i} \times \\
 & \times \ln \frac{2i \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \sqrt{(x_2^0-x_1)(x_2+x_1)} - (x_2-x_2^0)(z-x_1) - 2(zx_1+x_2x_2^0)}{-(x_2+x_2^0)(x_1+z)} + \\
 & + \frac{a_2}{\pi} \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2-x_1}{x_2^0+x_1}} - \frac{a_2 z + c_2}{2\pi i} \times \\
 & \times \ln \frac{-2i \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \sqrt{(x_2^0+x_1)(x_2-x_1)} + (x_2-x_2^0)(z+x_1) - 2(zx_1-x_2x_2^0)}{(x_2+x_2^0)(x_1-z)} + \\
 & + \left[ \ln \left( \frac{-2i \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \sqrt{(x_2^0+x_b)(x_2-x_b)}}{(x_2+x_2^0)(x_b-z)} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{(x_2-x_2^0)(z+x_b) - 2(zx_b-x_2x_2^0)}{(x_2+x_2^0)(x_b-z)} \right) - \right. \\
 & \left. - \ln \left( \frac{-2i \sqrt{(z+x_2^0)(z-x_2)} \sqrt{(x_2^0+x_a)(x_2-x_a)}}{(x_2+x_2^0)(x_a-z)} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{(x_2-x_2^0)(z+x_a) - 2(zx_a-x_2x_2^0)}{(x_2+x_2^0)(x_a-z)} \right) \right] \frac{R}{2\pi i}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Решение (9) ограничено в точках  $-x_2^0$  и  $x_2$ .

Условие локального влияния выработки на напряженное состояние массива для функции (8) примет вид:

$$\frac{\lambda H}{2} + \frac{a_1 - a_2}{2\pi} \sqrt{x_2^2 - x_1^2} + \frac{c_1}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2+x_1}{x_2-x_1}} - \frac{c_1}{2} - \frac{c}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x_2-x_1}{x_2+x_1}} = 0; \tag{10}$$

Трансцендентное уравнение (10) служит для определения неизвестных длин призабойных пластических областей  $(x_2 - x_1)$ .

Как видно из работ [1,6] изменение величины параметра пластической анизотропии пласта ведет к незначительному изменению результатов расчетных значений, поэтому в дальнейших расчетах он будет оставаться неизменным и равным 1.

С использованием вычислительной техники был произведен расчет ширины зоны  $(x_2 - x_1)$  горного массива для данных в следующем диапазоне:

глубина ведения горных работ, м	600-1400;
прочность угля, МПа	5-25;
мощность пласта, м	0,4-1,6;
ширина выработки, м	3,0-5,0.

В результате численных расчетов трансцендентного уравнения (10) был получен массив данных.

Проведем анализ полученных результатов. Для детального анализа полученные результаты были представлены в виде графических зависимостей расстояния до максимума опорного давления от различных влияющих факторов.

Из анализа графических зависимостей следует, что при ширине выработки, изменяющейся в диапазоне 3,0-5,0 расстояние до максимума опорного давления не значительно зависит от этого фактора. Примем к учету тот факт, что на современных глубинах (800-1200 м) пластовые подготовительные выработки проводятся стандартной ширины, не превышающей 3,5 м. Поэтому рационально в дальнейшем все расчеты проводить именно для этой ширины выработки.

Дальнейший анализ показал, что с увеличением глубины разработки расстояние до максимума опорного давления изменяется по линейной зависимости, к тому же из (10) наглядно видно, что глубина является коэффициентом пропорциональности.

Тем не менее, зависимость расстояния до максимума опорного давления от прочности угля и мощности пласта носит более сложный характер (рис 2 и 3). Поэтому воспользуемся пакетом программ "STATISTICA" для обработки массивов данных. Достоинством данной программы является то, что она позволяет описать уравнением плоскость, зависящую от двух параметров.

В результате обработки были получены следующие статистические зависимости для различных глубин:

$$600 \text{ м} \quad R_{\max} = 1,56 - 0,084\sigma_{\text{сж}} + 0,501m \quad (11)$$

$$800 \text{ м} \quad R_{\max} = 2,08 - 0,114\sigma_{\text{сж}} + 0,786m \quad (12)$$

$$1000 \text{ м} \quad R_{\max} = 2,58 - 0,144\sigma_{\text{сж}} + 1,084m \quad (13)$$

$$1200 \text{ м} \quad R_{\max} = 3,07 - 0,174\sigma_{\text{сж}} + 1,401m \quad (14)$$

$$1400 \text{ м} \quad R_{\max} = 3,55 - 0,204\sigma_{\text{сж}} + 1,721m \quad (15)$$

где:  $R_{\max}$  – расстояние до максимума опорного давления, м;

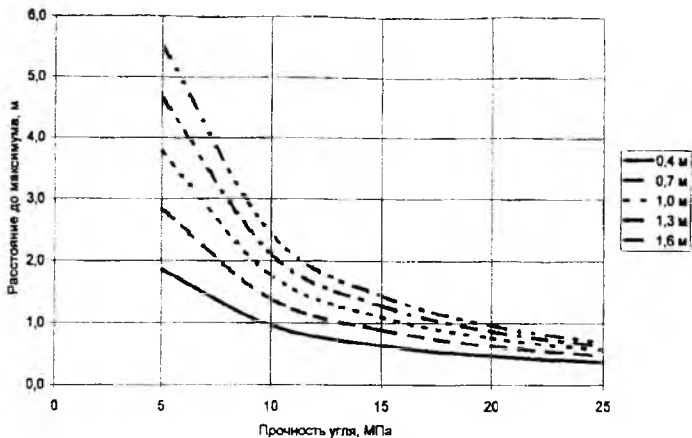


Рис. 2. Зависимость расстояния до максимума опорного давления от прочности угля при изменяющейся мощности пласта.

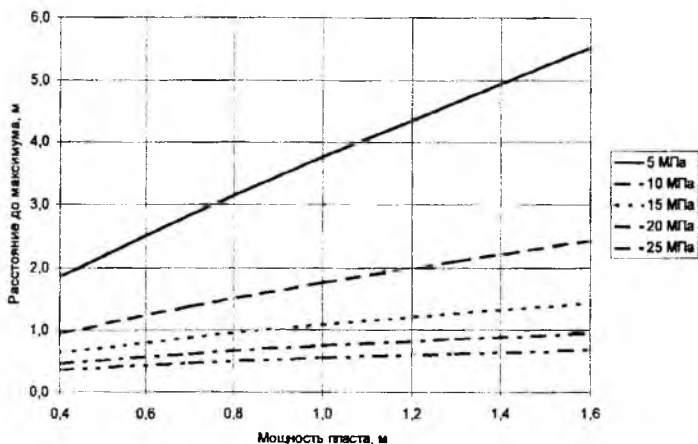


Рис. 3. Зависимость расстояния до максимума опорного давления от мощности пласта при изменяющейся прочности угля.

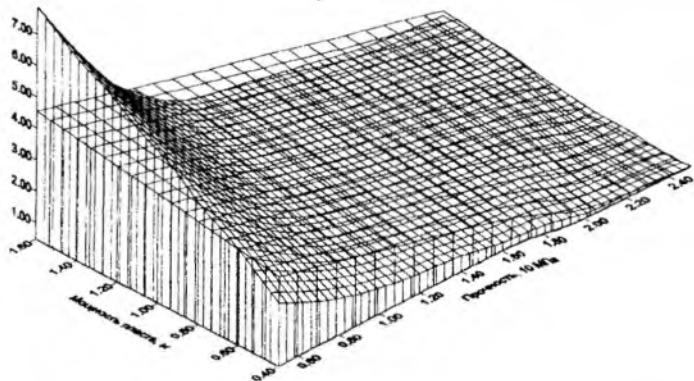


Рис. 4. Сравнительная характеристика результатов полученных в результате аналитического расчета и по предложенной формуле.

$\sigma_{сж}$  – прочность угля на сжатие, МПа;

$m$  – мощность пласта, м.

Общий вид зависимости можно представить следующим образом:

$$R_{\max} = k(1,56 - 0,08\sigma_{сж} + 0,5m), \quad (16)$$

где:  $k$  – коэффициент зависимости от глубины, равный 1,0; 1,35; 1,7; 2,0; 2,4 для глубин 600; 800; 1000; 1200; 1400 м соответственно.

Статистическая обработка полученных результатов с помощью того же пакета программ показала, что сходимость расчетных результатов по формулам (10) и (16) составляет 82%, причем наибольшее значение расхождения результатов отмечается для мощности пластов в диапазоне от 1,2 до 1,6 м при прочности до 10 МПа (рис. 4). С учетом того, что пласты такой мощности встречаются в Донбассе редко, порядка 13% [7], то формулу (16) можно принять для инженерного определения расстояния до максимума опорного давления в пластовых подготовительных выработках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космодамянский А.С., Левшин А.А., Доклады АН УССР 9, 34. – 1986.
2. Левшин А.А. Механика твердого тела // Известия АН СССР. - 1981 - №5. - С. 180.



3. Левшин А.А., Мануйленко Р.И., Федотов С.Н. 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. Механика горных пород /В.Г.Ильющенко, В.В.Пудак, А.А.Левшин, С.И.Егоров. –Донецк: 1994. – 366 с.
5. Хилл Р., Математическая теория пластичности – М.: Изд-во техн.-теорет. лит., 1956.
6. Разработка паспортов управления горным давлением с использованием компьютерной техники / Н.А.Шаловал, Н.А.Альшев, Э.В.Борисенко, Д.М.Житленок, Б.И.Курицын, А.А.Левшин, Ю.Г.Литвинов, Ю.А.Пивень, Е.И.Питаленко / Под ред. Н.А.Шаповала. Донецк. - 1998. -118 с.
7. Вопросы управления горным давлением на тонких крутых пластах Донбасса / В.Г.Александров, А.В.Аксенов, Н.А.Альшев и др. – Донецк: Лебедь, 1998. - 288 с.