

УДК 622.831

В.А. Гоголин, Т.И. Кургузкина

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОЛНОЙ ПОДРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящее время сложилось определенное единство в понимании общих закономерностей развития опорного давления, в то время как отдельные положения этого явления вызывают разные, часто противоречивые мнения.

Многообразие подходов и методов исследования [1-7] приводит к тому, что параметры распределения данной функции, такие как расстояние до точки максимума опорного давления и значение самого максимума в различных исследованиях далеко неоднозначны.

Неоднозначность значений может быть объяснена малой изученностью физико-механических и структурных параметров углевмещающей толщи, значительным разбросом значений этих параметров, а также не вполне адекватными постановками задач, которые используют методы теории упругости и сопротивления материалов, наиболее подходящие для металлических конструкций, а не для массивов горных пород.

В связи с этим представляется необходимым дать общую оценку возможного состояния опорного давления в краевой части пласта на основе имеющихся закономерностей поведения кровли и распределения напряжений в угольном пласте.

Рассмотрим изолированную очистную выработку длиной  $2x_0$ , проведенную в пласте мощностью  $2h$ , залегающую горизонтально на глубине  $H$  ( $h \leq H$ ,  $h \leq x_0$ ).

Подработка поверхности полная, т.е.  $x_0 > \ell$ . Напряженное состояние в пласте симметрично относительно середины длины выработки. Схема

к расчету области опорного давления приведена на рис. 1.

Закон нарастания нагрузки в зоне опорного давления от  $\sigma_0$  до  $\sigma_{max}$  согласно работе [7] можно считать прямолинейным.

Тогда в выбранной системе координат при  $0 \leq x \leq a$ :

$$\sigma = -\gamma H + \sigma_0 + \kappa x$$

где  $\sigma$  - опорное давление;  $\gamma$  - насыпной вес;  $H$  - глубина разработки;  $\sigma_0$  - напряжение на краю выработки;  $\kappa$  - коэффициент пропорциональности;  $x$  - расстояние от обнажения вглубь пласта.

Функция закона убывания нагрузки, согласно [6], может быть аппроксимирована как обратно пропорциональная квадрату расстояния от выработки.

Тогда при  $x \leq a$ :

$$\sigma_0 = \frac{c}{x^2}$$

где  $c$  - коэффициент аппроксимации.

При  $x = a$  напряжение непрерывно, т.е.

$$\begin{aligned} \sigma(a-0) &= \sigma(a+0), \\ -\gamma H + \sigma_0 + \kappa a &= \frac{c}{a^2}, \end{aligned}$$

где  $a$  - расстояние до точки максимума опорного давления.

Дополнительная нагрузка на пласт равна нагрузке, снятой с почвы выработки.

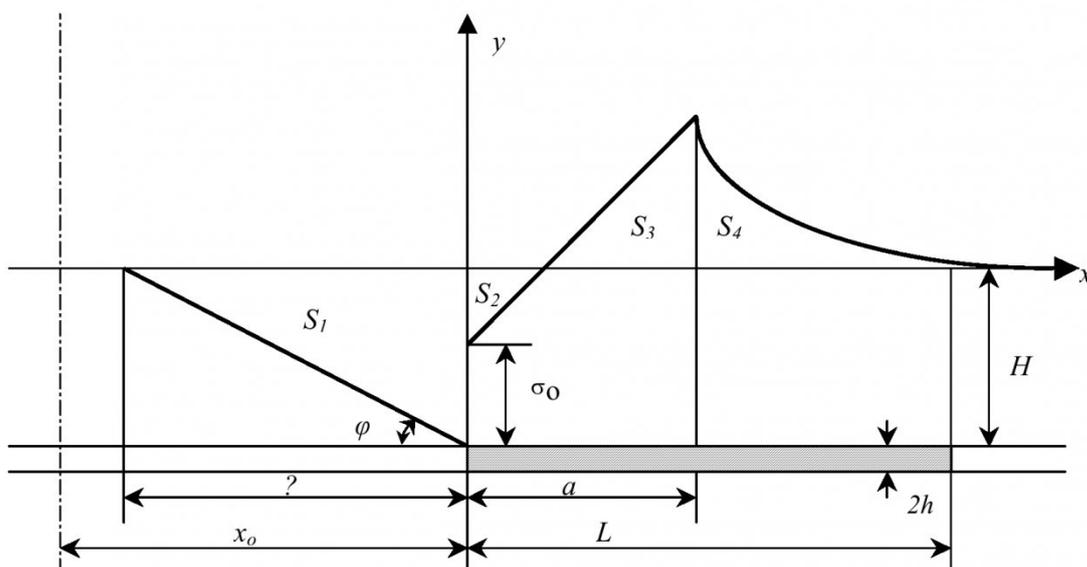


Рис. 1. Схема к расчету области опорного давления

Уравнение баланса нагрузки (рис.1):

$$S_1 + S_2 = S_3 + S_4$$

где  $S_1, S_2, S_3, S_4$  определяется из геометрических соображений как площади соответствующих фигур.

$$S_1 = \frac{1}{2} \gamma H \ell = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{ctg} \varphi,$$

где  $\varphi$  - угол давления ( $\varphi = 50 - 64^\circ$ , зависит от крепости подрабатываемых пород)

$$S_2 = \frac{1}{2} (\gamma H - \sigma_0) \left( \frac{\gamma H - \sigma_0}{\kappa} \right) = \frac{(\gamma H - \sigma_0)^2}{2\kappa};$$

$$S_3 = \int_{\frac{\gamma H - \sigma_0}{\kappa}}^a (-\gamma H + \sigma_0 + \kappa x) dx =$$

$$= -\gamma H a + \sigma_0 a + \frac{\kappa}{2} a^2 + \frac{1}{2\kappa} (\gamma H - \sigma_0)^2;$$

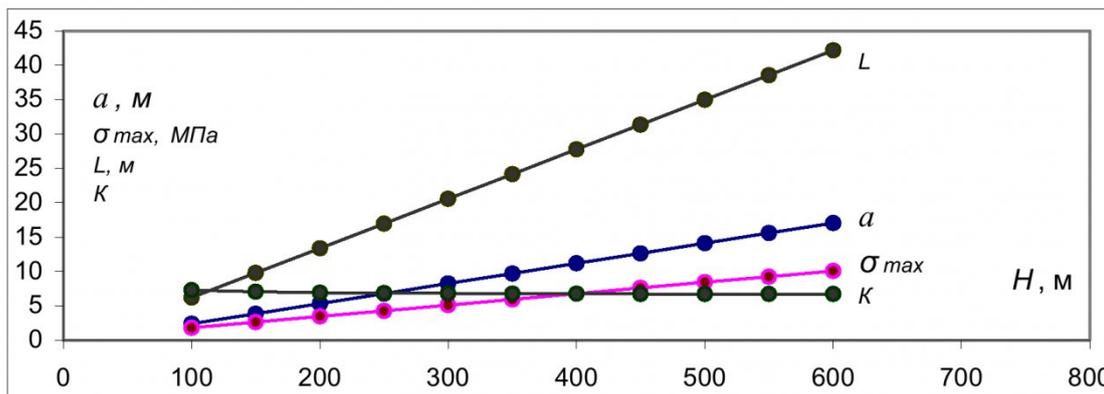


Рис. 2. Графики зависимостей  $a, \sigma_{max}, L$  и  $K$  от  $H$  при  $\sigma_0 = 0,5$  МПа

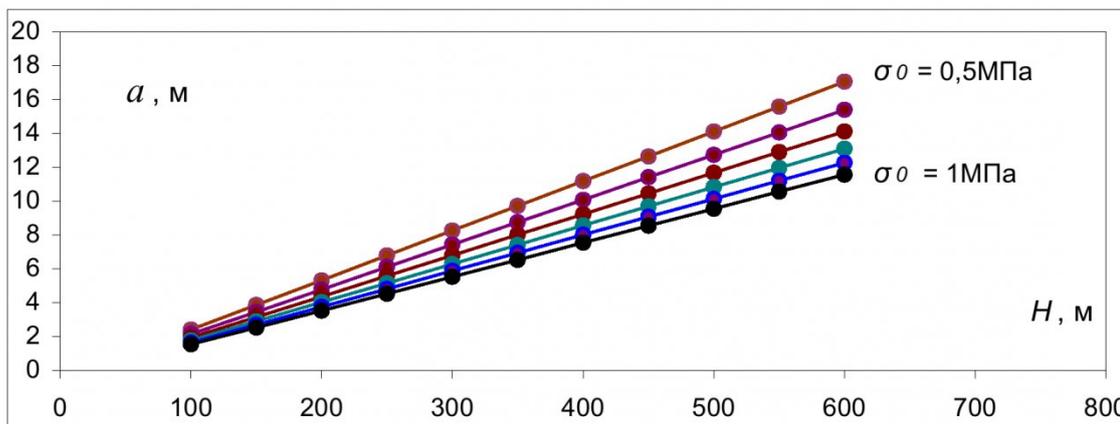


Рис. 3. Зависимость  $a$  от  $H$

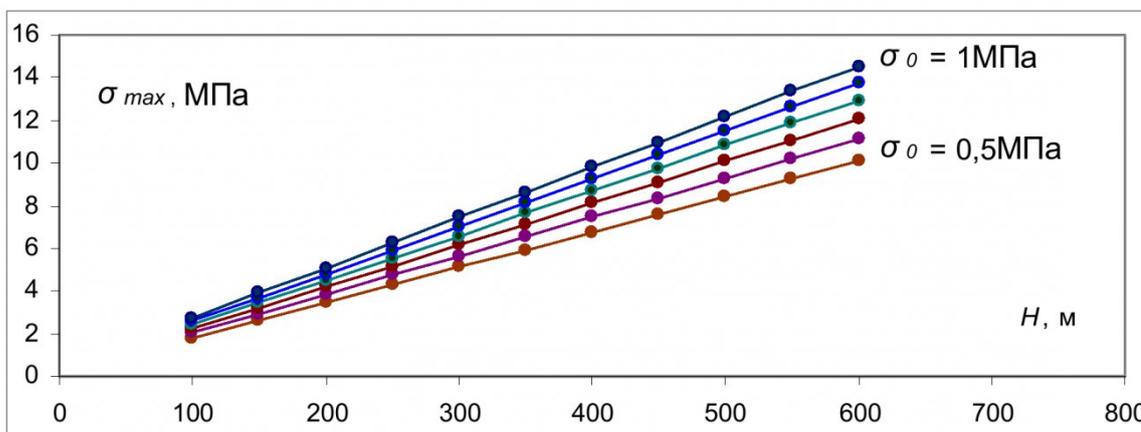


Рис. 4. Зависимость  $\sigma_{max}$  от  $H$

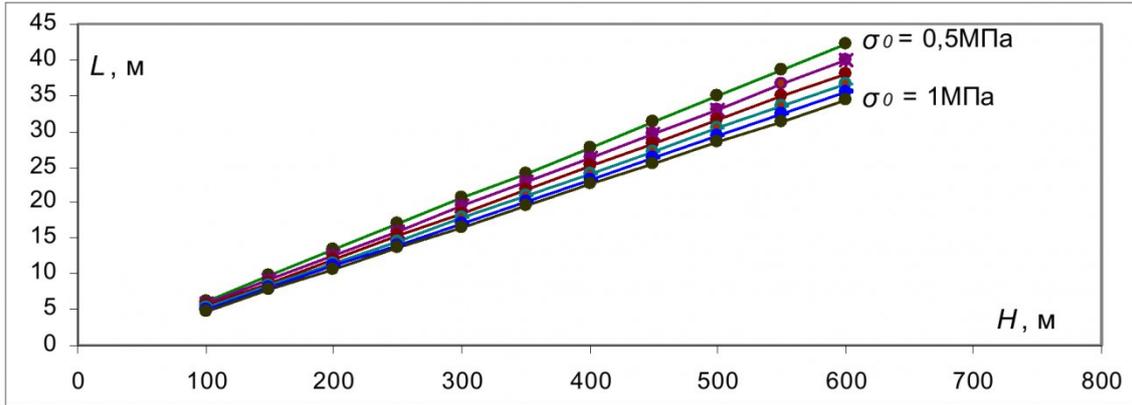


Рис. 5. Зависимость  $L$  от  $H$

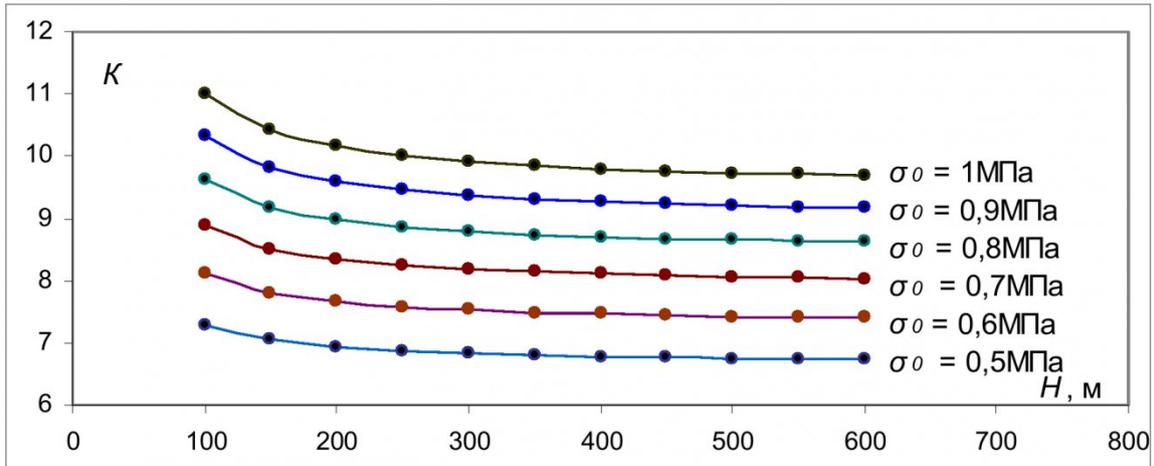


Рис. 6. Зависимость  $K$  от  $H$

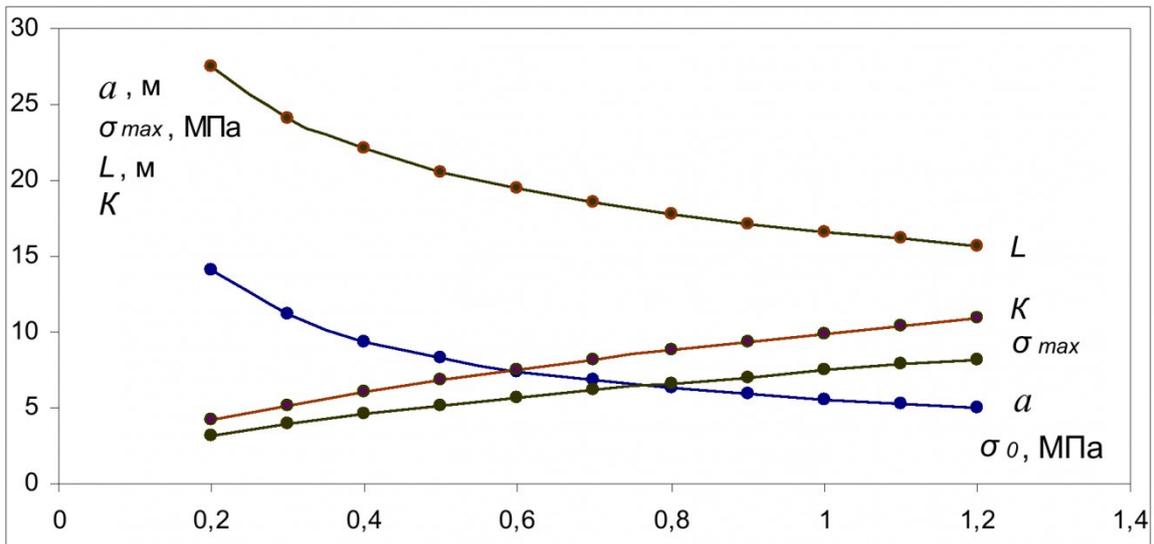


Рис. 7. Графики зависимостей  $a$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $L$  и  $K$  от  $\sigma_0$  при  $H = 300$  м

$$S_4 = \int_0^{\infty} \frac{c}{x^2} dx = \frac{c}{a}$$

Тогда уравнение баланса нагрузки:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{ctg} \varphi + \frac{1}{2\kappa} (\gamma H - \sigma_0) = \\ & = -\gamma H a + \sigma_0 a + \frac{\kappa}{2} a^2 + \frac{1}{2\kappa} (\gamma H - \sigma_0)^2 + \frac{c}{a}; \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}\gamma H^2 \operatorname{ctg}\varphi + \gamma H a - \sigma_o a - \frac{\kappa}{2} a^2 = \frac{c}{a}$$

Решая систему двух уравнений с неизвестными  $a$  и  $c$ :

$$-\gamma H + \sigma_o + \kappa a = \frac{c}{a^2};$$

$$\frac{1}{2}\gamma H^2 \operatorname{ctg}\varphi + \gamma H a - \sigma_o a - \frac{\kappa}{2} a^2 = \frac{c}{a},$$

получаем квадратное уравнение:

$$3\kappa a^2 - 4(\gamma H - \sigma_o)a - \gamma H^2 \operatorname{ctg}\varphi = 0.$$

с единственным решением ( $a > 0$ ):

$$a = \frac{2\gamma H + \sqrt{4(\gamma H - \sigma_o)^2 + 3\kappa\gamma H^2 \operatorname{ctg}\varphi}}{3\kappa} - \frac{2\sigma_o}{3\kappa} \quad (1)$$

Тогда максимальное напряжение :

$$\sigma_{max} = -\gamma H + \sigma_o + \kappa a \quad (2)$$

Коэффициент концентрации напряжения:

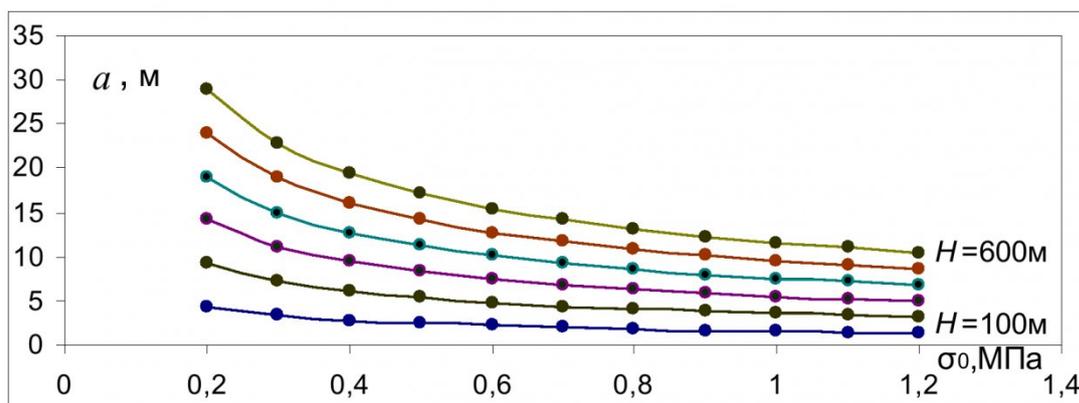


Рис. 8. Зависимость  $a$  от  $\sigma_0$

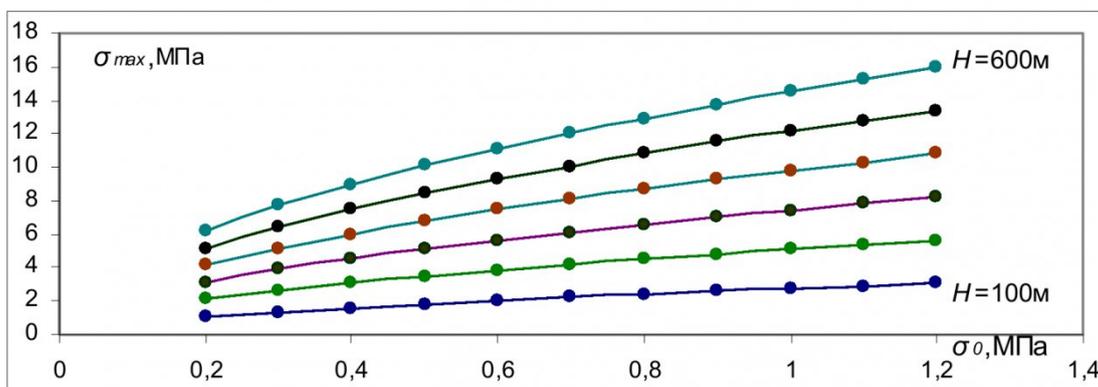


Рис. 9. Зависимость  $\sigma_{max}$  от  $\sigma_0$

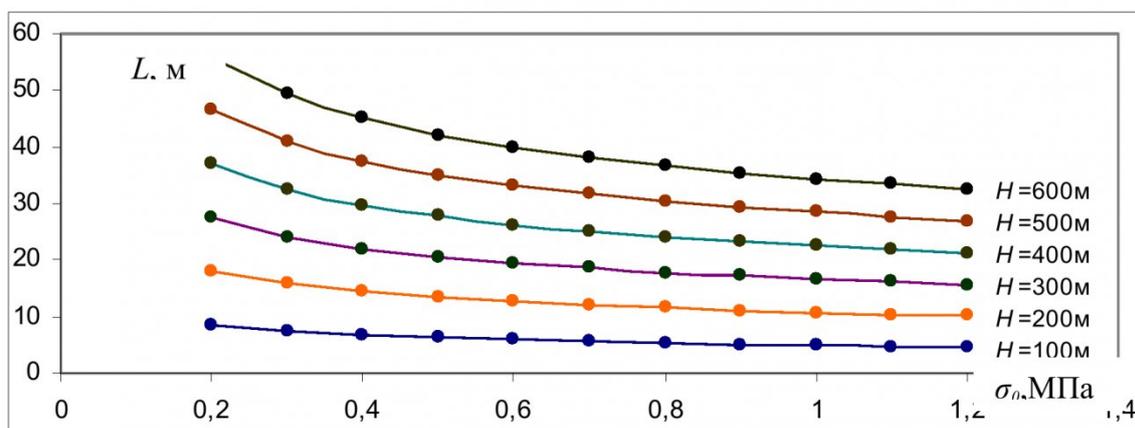
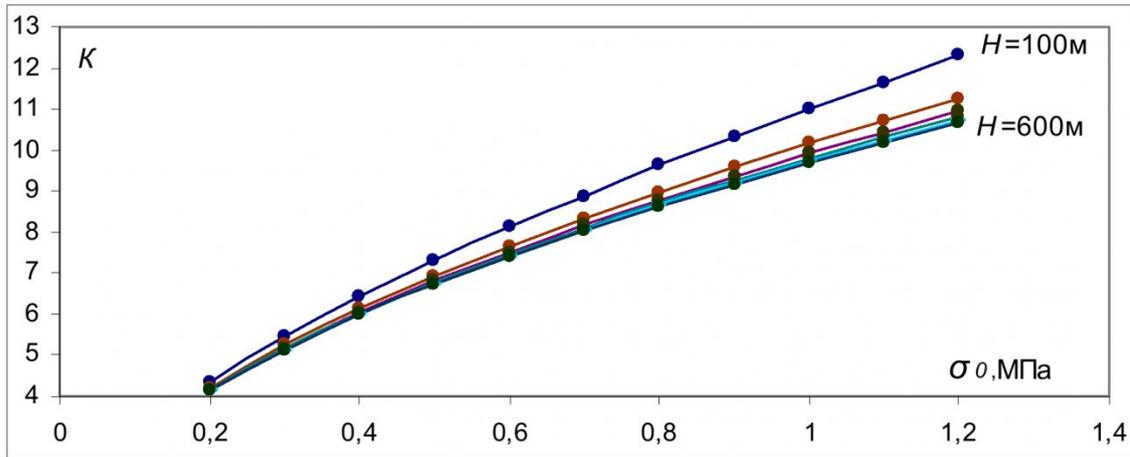
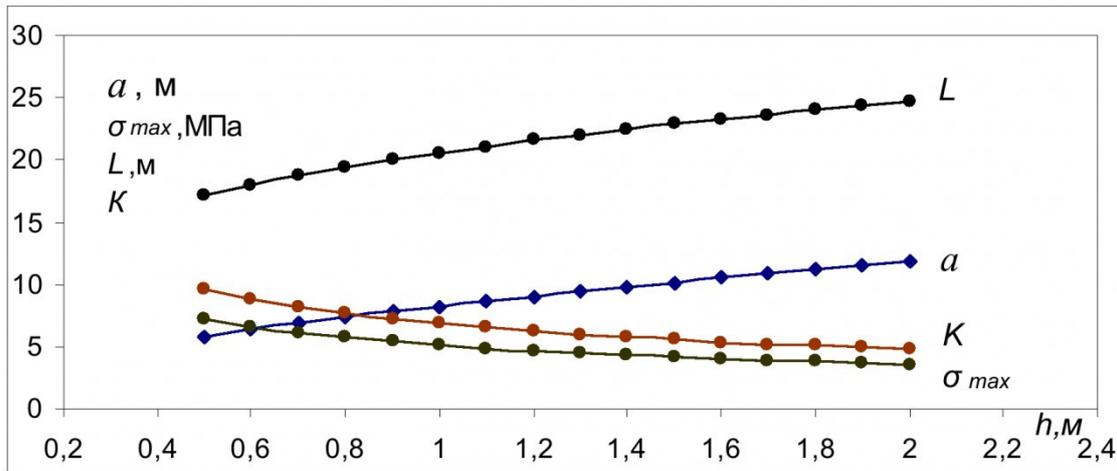


Рис. 10. Зависимость  $L$  от  $\sigma_0$

Рис. 11. Зависимость  $K$  от  $\sigma_0$ Рис. 12. Графики зависимостей  $a$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $L$  и  $K$  от  $h$  при  $\sigma_0 = 0,5$  МПа и  $H = 300$  м.

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\gamma H} = \frac{-\gamma H + \sigma_0 + \kappa a}{\gamma H} \quad (3)$$

Принимая 10% превышение уровня  $\gamma H$ , определяем протяженность зоны опорного давления:

$$L = \sqrt{\frac{c}{1.1\gamma H}} = \sqrt{\frac{-\gamma H a^2 + \sigma_0 a^2 + \kappa a^3}{1.1\gamma H}} = a \sqrt{\frac{K}{1.1}} \quad (4)$$

Принимаем прочность пласта значительно меньше прочности вмещающих пород. Тогда, согласно работе [7]:

$$\sigma_0 = \sigma_{куб}, \quad \kappa = \frac{1,3\sigma_{куб}}{h},$$

где  $\sigma_{куб}$  – прочность куба достаточных размеров, вырезанного из пласта и испытанного в натуральных условиях.

Принимая  $h = 1$  м,  $\varphi = 61^0$ ,  $\gamma = 2500$  кг/м<sup>3</sup> по формулам (1-4) определяем  $a$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $K$  и  $L$ .

На рис. 2 и рис. 7 совмещены графики зависимостей расстояния до точки максимума  $a$ , максимального напряжения  $\sigma_{max}$ , длины зоны опорного давления  $L$  и коэффициента концентрации напряжения  $K$  от глубины разработки  $H$  при  $\sigma_0 = 0,5$  МПа и от прочности угля  $\sigma_0 = \sigma_{куб}$  при  $H = 300$  м соответственно.

Результаты расчетов  $a$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $L$  и  $K$  для других значений  $\sigma_0$  представлены на рис. 3 - 6, а для различных значений  $H$  на рис. 8 - 11.

Упростим формулу (1), пренебрегая в подкоренном выражении слагаемым  $(4\sigma_0^2 - 8\gamma H\sigma_0)$ , имеющем меньший порядок относительно других.

Обозначим

$$A = \sqrt{4\gamma^2 + 3\kappa\gamma\text{ctg}\varphi}.$$

Тогда

$$a = \frac{2\gamma + A}{3\kappa} \cdot H - \frac{2\sigma_0}{3\kappa} \quad (5)$$

Из (2) и (5) следует:

$$\sigma_{max} = \frac{A - \gamma}{3} \cdot H + \frac{\sigma_o}{3} \quad (6)$$

Из (3) и (5) определяем

$$K = \frac{A}{3\gamma} - \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{\sigma_o}{\gamma H} \right);$$

пренебрегая вторым слагаемым, имеем

$$K = \frac{A}{3\gamma} \quad (7)$$

Определяем  $L$  по формулам (4), (5):

$$L = \sqrt{\frac{A}{3 \cdot 3\gamma} \left( \frac{2\gamma + A}{3\kappa} \cdot H - \frac{2\sigma_o}{3\kappa} \right)} \quad (8)$$

При этом относительная погрешность для  $a$ ,  $\sigma_{max}$  и  $K$  не превышают 1%, для  $L$  максимальная относительная погрешность 3%.

На рис. 12 совмещены графики зависимостей  $a$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $L$  и  $K$  от  $h$  при  $\sigma_o = 0,5$  МПа и  $H = 300$  м.

Анализ формул (5 – 8) и исследование полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- зависимость расстояния до точки максимума напряжения  $a$ , максимального напряжения  $\sigma_{max}$  и длины зоны опорного давления  $L$  от глубины разработки  $H$  линейная, коэффициент концентрации напряжения  $K$  с увеличением  $H$  меняется

незначительно, т.к. обратно пропорционален  $2\sqrt[3]{H}$ ;

- расстояние до точки максимума напряжения обратно пропорционально  $\sqrt{\sigma_o}$ , максимальное напряжение и коэффициент концентрации напряжения пропорциональны  $\sqrt{\sigma_o}$ , а длина зоны опорного давления обратно пропорциональна  $\sqrt[4]{\sigma_o}$ , ( $\sigma_o = \sigma_{куб}$ ).

- расстояние до точки максимума напряжения пропорционально  $\sqrt{h}$ , максимальное напряжение и коэффициент концентрации напряжения обратно пропорциональны  $\sqrt{h}$ , а длина зоны опорного давления пропорциональна  $\sqrt[4]{h}$ .

Таким образом, в работе получены аналитические выражения для определения расстояния до точки максимума напряжения, максимальной нагрузки, длины зоны опорного давления и коэффициента концентрации напряжения, позволяющие оценить распределение опорного давления при полной подработке поверхности; выявлены их зависимости от глубины разработки, прочности угля и мощности пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ардашев К.А. Исследование и анализ проявлений горного давления при разработке мощных крутых пластов Прокопьевско – Киселевских месторождений и месторождений Кузбасса. Дис. д-ра тех. наук. - Л. 1968.
2. Борисов А.А. Исследование вопросов горного давления методом объемных моделей // Исследование горного давления. – М.: Госгортехиздат. 1960.
3. Борисов А.А. Расчет горного давления в лавах пологих пластов. – М.: Недра. 1964.
4. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. – Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ие. 1960.
5. Егоров П.В. Предупреждение горных ударов. – Кемерово. КузПИ. 1984.
6. Лехницкий С.Г. Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения. – Л. ВНИМИ. 1962.
7. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. Теория защитных пластов. – М.: Недра. 1976.

□ Автор статьи:

Гоголин  
Вячеслав Анатольевич  
- докт. техн. наук, проф. каф. прикладной математики

Куркузкина  
Татьяна Ивановна  
- ст. преп. каф. высшей и прикладной математики (Московский Государственный Университет коммерции. Кемеровский институт)