

УДК 622.83:622.273:624.131

СОЛОВЬЕВ Г.И., НЕГРЕЙ С.Г. (ДонГТУ), ГИРИН В.С. (КТУ),  
КУБЛИЦКИЙ Е.В. (ДонГТУ)

## **О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

*Аналитически установлено распределение напряжений в почве выемочной выработки в зависимости от расстояния до контура почвы выработки с учетом основных влияющих факторов.\**

Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт, разрабатывающих тонкие и средней мощности пласты в условиях неустойчивых боковых пород, в основном зависит от их физико-механических свойств и глубины залегания. Породы почвы этих выработок в зависимости от литологического состава можно рассматривать как сплошные или дискретные среды.

При расположении выработки на небольшой глубине прочные породы почвы, представляющие собой сплошную среду, в зоне влияния очистного забоя выдавливаются в полость выработки с образованием складки, которая, как правило, имеет разлом в своей верхней части.

Слабые породы почвы выемочных выработок глубоких шахт в результате интенсивного трещинообразования разрушаются на отдельные, размер которых не более чем на порядок меньше поперечных размеров выработки. Здесь, с некоторыми допущениями, можно говорить о формировании в почве выработки дискретной распорной среды.

Естественно предположить, что проявление горного давления на контуре выемочной выработки, величина и характер деформаций крепи и породного контура в этом случае будут определяться свойствами дискретной распорной среды и размерами зоны ее распространения.

Эта зона не только передает усилия на крепь выработки, но и играет роль своеобразного демпфера между массивом и крепью. Очевидно, что учет особенностей свойств этой зоны в части передачи усилий между ее отдельностями, может влиять на деформацию контура выработки. В частности интенсивность смещений пород почвы в полость выработки можно уменьшить за счет применения средств механического противодействия процессу выдавливания почвы выработки [1].

В общем плане наши представления совпадают с общепринятыми взглядами на образование вокруг выработки зоны разрушенных пород. Поэтому для формирования физической модели поведения почвы выемочной выработки будет правомерным использовать результаты ряда исследований [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и др.], посвященных разработке моделей механических процессов в распорных и безраспорных средах.

\* Исследования проводились под руководством д.т.н. Бондаренко Ю.В.

В результате визуальных наблюдений в местах проведения подрывок почвы выемочных выработок и фотометрических исследований среза почвы, образованном на фронте подрывки [9], нами было установлено, что в условиях пласта  $c_{11}$  шахты «Южнодонецкая» №3 почва выемочных выработок представлена дискретной распорной средой.

Анализ стратиграфии почвы позволил установить, что слой разрушенных пород непосредственной почвы, состоящий из песчанистого сланца, распространяется до прочного слоя песчаника (рис. 1), который, как показывают наблюдения, не участвует в процессе дискретизации.

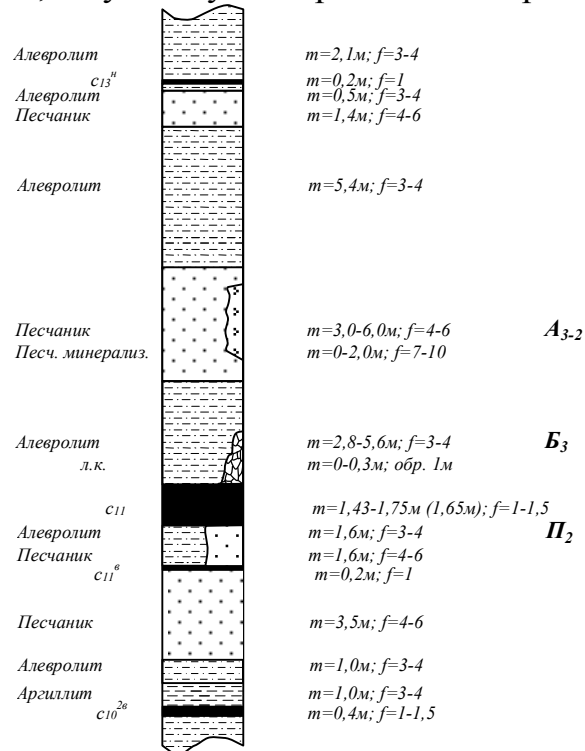


Рисунок 1 Стратиграфическая колонка по пласту  $c_{11}$

Выдавливание пород почвы как составная часть пучения является следствием реализации потенциальной энергии той части горного массива, которая вовлечена в деформационный процесс при ведении очистных работ. Выдавливание почвы в полость выработки в основном обусловлено:

1. Упругим восстановлением окружающих выработку пород.
2. Деформациями генетического возврата пород, вмещающих выработку.
3. Геостатическими напряжениями в подстилающих породах.
4. Опорным давлением в боках выработки.

Уточнение представлений о физико-механических характеристиках среды, в которой расположена выработка, выявление причин выдавливания почвы и определение особенностей реализации этого процесса в зоне влияния очистных работ, позволило нам перейти к формированию

физической модели выдавливания пород почвы в полость выработки для условий пласта  $c_{11}$ .

Для этого условно область пород, участвующих непосредственно в процессе выдавливания под выработкой была ограничена следующими границами (рис. 2): АВ- верхняя поверхность, которая при выдавливании перемещается, изменяя форму; CD- нижняя ограничивающая плоскость на контакте с породой, условно не участвующей в процессе дискретизации; АС и ВD- боковые поверхности, по которым происходит скольжение выдавливаемой части почвы (зона I) по относительно неподвижной массе пород (зона II) и которые являясь границами между перемещающимися и неподвижными отдельностями пород почвы, могут располагаться как вертикально, так и с наклоном в обе стороны к вертикальной оси выработки.

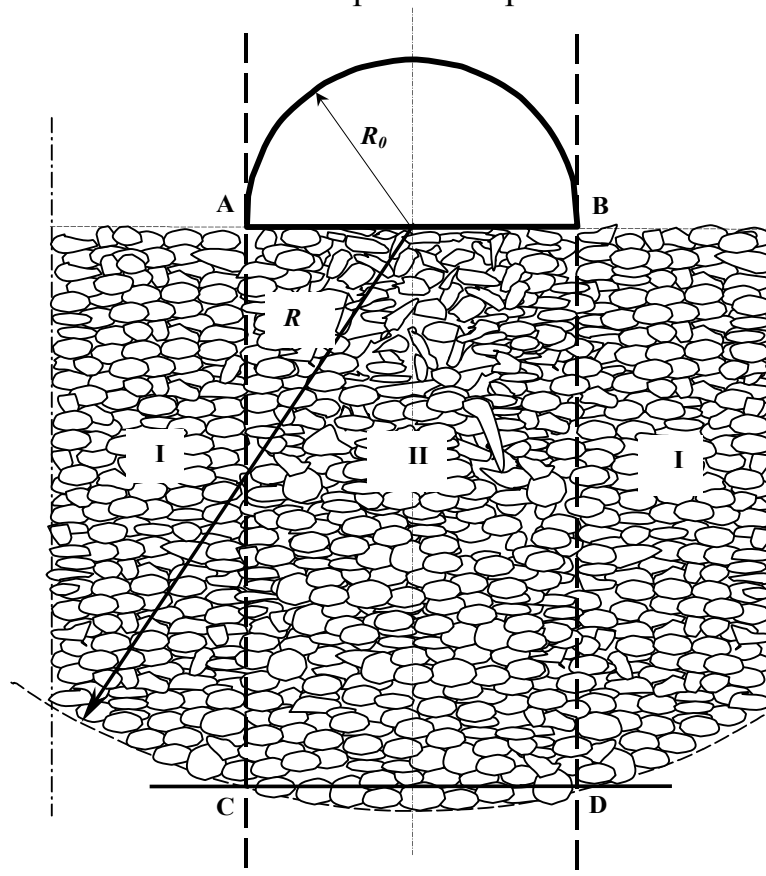


Рисунок 2 Схема к интерпретации процесса выдавливания пород почвы выработки

При аналитическом решении задачи о выдавливании пород почвы, было принято условие, что границы АС и ВD параллельны оси выработки. Однако, разработанная модель может учитывать и иное положение границ.

Для установления величины и характера распределения сил по выделенным границам в общем виде нами было принято, что по нижней границе силы на область II распределены равномерно и равны  $k_0\gamma H$  (где  $k_0$ - некоторый коэффициент, отличающийся от 1). Силы, действующие на АС и

VD были приняты равными  $\beta k \gamma H$  (где  $\beta$ - коэффициент бокового давления;  $k$ - коэффициент концентрации напряжений в зоне опорного давления по бокам выработки;  $\gamma$ - объемная масса толщи пород и  $H$ - глубина расположения выработки). Для определения коэффициентов  $k_0$ ,  $\beta$  и  $k$ , изменяющихся по глубине почвы, необходимо проведение дополнительных специальных исследований.

При реализации разработанной модели была принята такая система допущений, при которой численные значения  $\beta$  распределялись равномерно по глубине зоны и принимались для малых и средних глубин равными от 0,17 до 0,33 [10, 11].

Коэффициент концентрации напряжений  $k$  имеет свое максимальное значение в непосредственной почве вблизи боков выработки [12, 13] и убывает с глубиной от  $k_n$  – начального в точках А и В до  $k_k$  –конечного в точках С и D (рис. 2). Для установления количественной определенности изменения  $k$  в пределах операционного пространства модели нами были использованы некоторые положения теории грунтов [6].

Размеры зоны разрушенных пород, в зависимости от горно-геологических и горнотехнических факторов, колеблются в пределах от 0,8 до 9,5 м [12, 14, 15, 16, 17, 18 и др.], а радиус зоны влияния выработки составляет 2,5÷3,0 ширины выработки [12, 18]. В качестве допущения размер зоны разрушенных пород в кровле, боках и почве выработки был принят одинаковым.

Общая картина распределения напряжений в окрестности выработки представлена на рисунке 3.

В пределах зоны разрушенных пород в боках выработки на горизонтальную плоскость действует неравномерная нагрузка. Для простоты расчетов принято треугольное ее распределение по длине зоны разрушенных пород. Максимальный коэффициент концентрации напряжений  $k_{max}$  в боках выработки наблюдается на границе зоны разрушенных пород и зоны, в которой породы не участвуют в процессе разрушения [12, 16, 19].

При реализации аналитической модели (с использованием решения Н.А. Цытовича [6] для условий плоской задачи и неравномерной боковой нагрузке, интенсивность которой изменяется по закону треугольника) было получено выражение для определения величины вертикальных напряжений  $\sigma_z'$ , действующих на горизонтальные площадки, параллельные плоскости напластования:

$$\sigma_z' = \frac{P}{\pi} \left( \frac{y}{(R_0 - R_0)} \cdot \left( \frac{y}{z} \arctg \frac{y - (R_0 - R_0)}{z} - \arctg \frac{y - (R_0 - R_0)}{z} \right) - \frac{z \cdot (y - (R_0 - R_0))}{z^2 + (y - (R_0 - R_0))^2} \right), \quad (1)$$

где  $P$  – величина треугольной нагрузки, Н;  $y, z$  – координаты рассматриваемой точки, м (рис. 4);  $(R - R_0)$  – длина треугольной эпюры

нагрузки, м ( $R_6$ – размер зоны разрушенных пород в боках выработки, м;  $R_0$ – радиус выработки, м).

Так как:

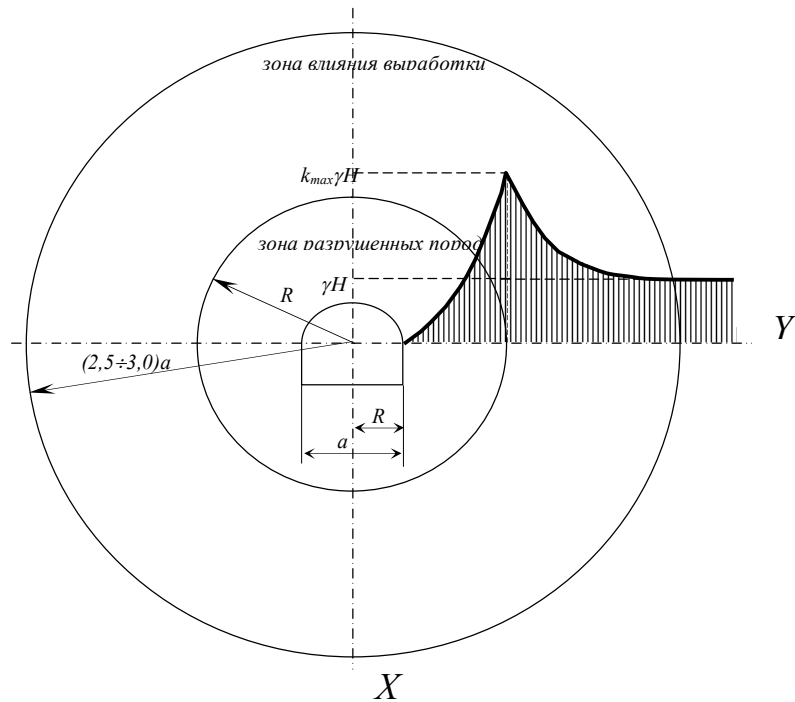


Рисунок 3 Схема формирования напряженного состояния в окрестности выработки

$$P = k_{\max} \gamma H, \quad (2)$$

$$y = x \cdot \operatorname{ctg} \theta, \quad (3)$$

$$z = x + \frac{h}{2}, \quad (4)$$

$$k = \frac{\sigma_z}{\sigma_x}, \quad (5)$$

где  $\gamma$ – объемная масса толщи пород,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $H$ – глубина расположения выработки, м;  $x$ – вертикальное расстояние от почвы выработки до рассматриваемой точки, м;  $\theta$ – угол наклона линии скольжения к горизонтали, град.;  $h/2$ – половина ширины выработки, м;  $\sigma_x = \gamma H$ – гидростатическая сила.

Из выражений (1)-(5) следует:

$$k = \frac{k_{\max}}{\pi} \left[ \frac{x \cdot \operatorname{ctg} \theta}{(R_6 - R_0)} \left( \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \operatorname{ctg} \theta}{x + h/2} - \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \operatorname{ctg} \theta - (R_6 - R_0)}{x + h/2} \right) \frac{(x + h/2)(x \cdot \operatorname{ctg} \theta - (R_6 - R_0))}{(x + h/2)^2 + (x \cdot \operatorname{ctg} \theta - (R_6 - R_0))^2} \right] \quad (6)$$

В случае, когда AC и BD будут параллельны оси выработки выражение (6) примет вид:

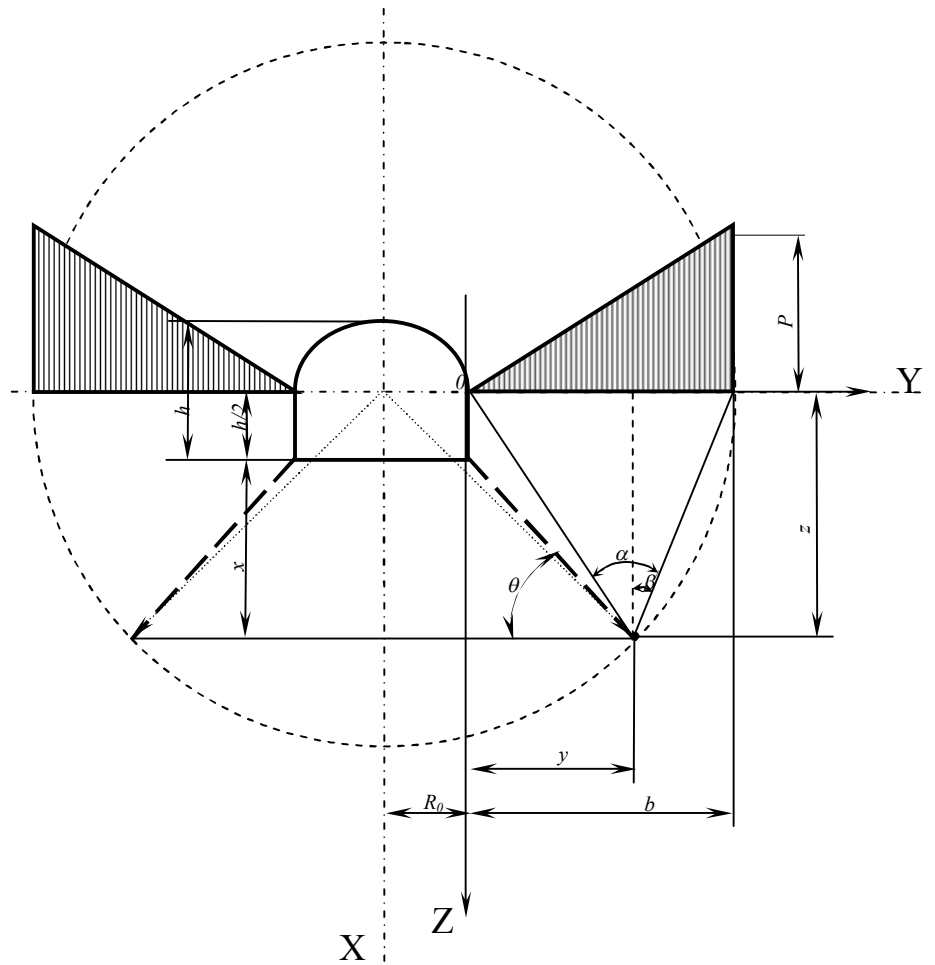


Рисунок 4 Схема к определению сжимающих напряжений в зоне разрушенных пород при действии в боках выработки треугольной нагрузки в условиях плоской задачи

$$k = \frac{k_{\max}}{\pi} \left[ \frac{(x+h/2)(R_0-R_0)}{(x+h/2)^2 + (R_0-R_0)^2} \right]. \quad (7)$$

Графически зависимость коэффициента концентрации напряжений от расстояния от почвы выработки при вертикальном расположении поверхностей AC и BD и различных размерах зоны разрушенных пород в боках выработки представлена на рисунке 5.

Для определения напряжений в породах почвы горных выработок нами было составлено и решено дифференциальное уравнение предельного равновесия элементарного объема  $dV$ , ограниченного контуром abcdefik. Этот объем расположен на расстоянии  $x$  от поверхности почвы выработки (рис. 6) и находится под действием сил, участвующих в процессе его выдавливания.

На элементарный объем действует выталкивающая сила:  $2R_0k_0(\sigma_x + (\partial\sigma_x/\partial x) dx)$ , обуславливающая перемещение разрушенной породы в

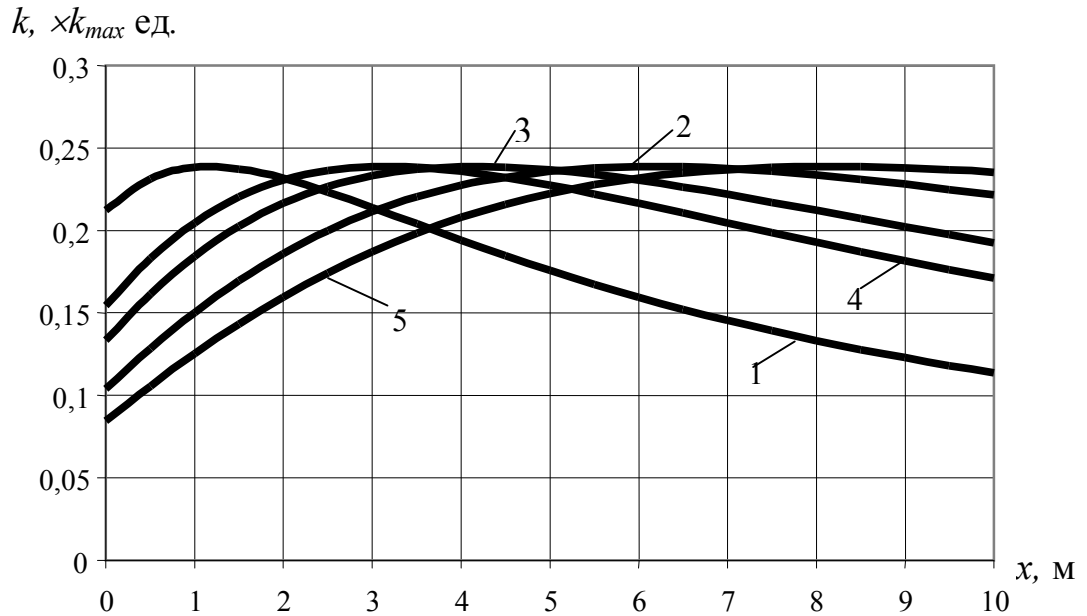


Рисунок 5 Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k$  от расстояния до контура почвы выработки  $x$  при размерах зоны разрушенных пород в боках выработки  $R_0$ : 1, 2, 3, 4, 5- соответственно 3, 5, 6, 8 и 10 метров

выработку (где  $R_0$ - половина ширины выработки, м;  $k_0$  – коэффициент концентрации напряжений, на нижней поверхности объема ABCDEFIK). Препятствуют этому перемещению: сила трения  $2\sigma_y f dx$  (где  $\sigma_y$ - боковое давление, МПа), реакция породы  $2R_0 k_0 \sigma_x$  и вес элементарного объема  $2R_0 \gamma dx$ .

Дифференциальное уравнение проекций на вертикальную ось сил, действующих на элементарный объем при условии предельного равновесия будет иметь вид:

$$2k_0 R_0 \left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) - 2\sigma_y f dx - 2k_0 R_0 \sigma_x - 2R_0 \gamma dx = 0 \quad (8)$$

Так как:

$$\sigma_y = \beta k \gamma H = \beta k \sigma_x \quad (9)$$

где  $\beta$ – коэффициент бокового давления;  $k$ – коэффициент концентрации напряжений.

После преобразований из выражений (7)-(9) получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} \frac{\beta f k_{max} (R_0 - R_0)}{\pi R_0 k_0} \left( \frac{(x+h/2)}{(x+h/2)^2 + (R_0 - R_0)^2} \right) \sigma_x = \frac{\gamma}{k_0} \quad (10)$$

где  $f$  – коэффициент трения пород;  $k_{max}$  – максимальный коэффициент концентрации напряжений на границе зоны разрушенных пород и зоны, вмещающей породы не участвующие в процессе разрушения;  $R_0$  – размер зоны разрушенных пород в боках выработки, м;  $h/2$  – половина высоты выработки, м;  $\gamma$  - объемный вес пород, т/м<sup>3</sup>.

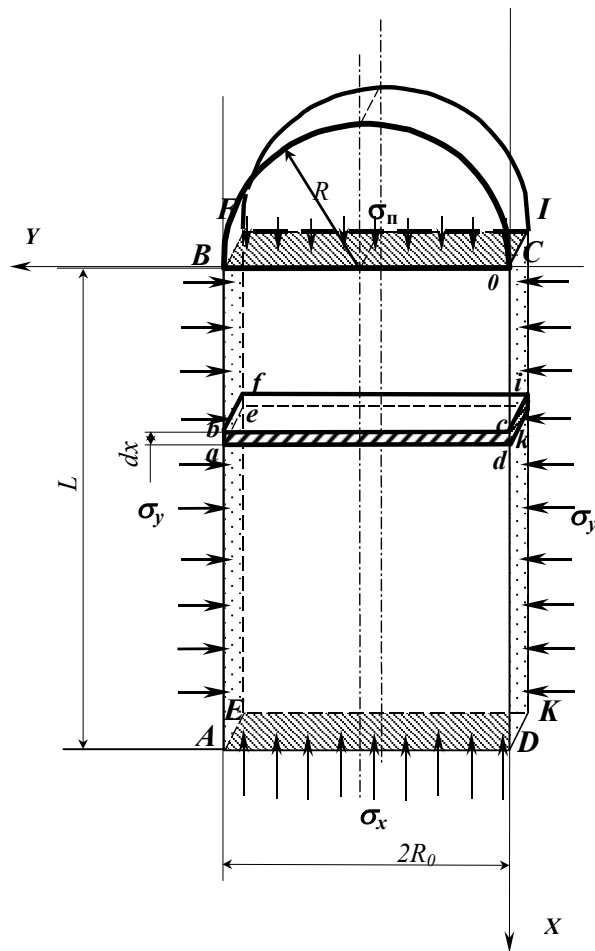


Рисунок 6 Схема физической модели для составления уравнения предельного равновесия элементарного объема в почве выработки

Интегрируем соответствующее однородное уравнение с разделением переменных, получим:

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} - \frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_{\delta} - R_0)}{\pi \cdot R_0 \cdot k_0} \cdot \left( \frac{(x+h/2)}{(x+h/2)^2 + (R_0 - R_{\delta})^2} \right) \cdot dx = 0 \quad (11)$$

$$\ln \sigma_x - \frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_{\delta} - R_0)}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot k_0} \cdot \ln \left( (x+h/2)^2 + (R_0 - R_{\delta})^2 \right) = \ln C \quad (12)$$

$$\sigma_x = C(x) \cdot \left( (x+h/2)^2 + (R_0 - R_{\delta})^2 \right)^{\frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_{\delta} - R_0)}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot k_0}} \quad (13)$$

где  $C(x)$  – неизвестная функция.

Отсюда:

$$\sigma'_x = C'(x) \cdot \left( (x+h/2)^2 + (R_0 - R_{\delta})^2 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_{\delta} - R_0)}{2 \pi R_0 k_0}} + C(x) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_{\delta} - R_0) (x+h/2)}{\pi R_0 k_0} \cdot \left( (x+h/2)^2 + (R_0 - R_{\delta})^2 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_{\delta} - R_0)}{2 \pi R_0 k_0} - 1} \quad (14)$$



Подставляя  $\sigma_x$  и  $\sigma'_x$  в исходное выражение (10), приходим к уравнению:

$$\begin{aligned} & C'(x) \cdot \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^2 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0}} + C(x) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0) \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)}{\pi R_0 k_0} \\ & \cdot \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^2 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} - 1} - C(x) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0) \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)}{\pi R_0 k_0} \\ & \cdot \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^2 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} - 1} = \frac{\gamma}{k_0} \end{aligned} \quad (15)$$

или

$$C'(x) \cdot \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^2 \right)^{\frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_0-R_0)}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot k_0}} = \frac{\gamma}{k_0} \quad (16)$$

откуда

$$\begin{aligned} C(x) &= \frac{\gamma}{k_0} \int \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^2 \right)^{\frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_0-R_0)}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot k_0}} dx = \\ &= \frac{\gamma}{k_0} \cdot \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^{\frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_0-R_0)}{\pi \cdot R_0 \cdot k_0}} \cdot \int \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + 1 \right)^{\frac{\beta \cdot f \cdot k_{\max} \cdot (R_0-R_0)}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot k_0}} dx \end{aligned} \quad (17)$$

Для простоты расчетов разложим подинтегральное выражение в степенной ряд:

$$\begin{aligned} & \left( \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + 1 \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0}} = 1 + \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \\ & \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} \cdot \left( \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^4 + \dots \end{aligned} \quad (18)$$

Получим:

$$\begin{aligned} C(x) &\approx \frac{\gamma}{k_0} \cdot \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{\pi R_0 k_0}} \\ &\cdot \int \left[ 1 + \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 + \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} \cdot \left( \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} - 1 \right) \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^4 \right] dx = \\ &= \frac{\gamma}{k_0} \cdot \left( \frac{R_0-R_0}{R_0-R_0} \right)^{\frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{\pi R_0 k_0}} \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{\pi R_0 k_0} \cdot \\ &\cdot \left[ \frac{\pi R_0 k_0}{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)} \int dx - \int \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^2 \right) dx + \int \left( \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\beta f k_{\max} (R_0-R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1 \right) \cdot \left( \frac{x+h/2}{R_0-R_0} \right)^4 \right) dx \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$C(x) = \frac{\gamma}{k_0} \cdot (R_\sigma - R_0) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0} \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0} \cdot \left[ \frac{\pi R_0 k_0}{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)} \int dx - \frac{1}{2(R_\sigma - R_0)} \int (x+h/2)^2 dx + \frac{\left( \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1 \right)}{4(R_\sigma - R_0)} \int (x+h/2)^4 dx \right] \quad (20)$$

$$C(x) = \frac{\gamma}{k_0} (R_\sigma - R_0) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0} \left[ \frac{\beta f k_{\max}}{\pi R_0 k_0} \frac{\pi R_0 k_0 x}{\beta f k_{\max}} \frac{(x+h/2)^3}{6(R_\sigma - R_0)} + \frac{\left( \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1 \right) (x+h/2)^5}{20(R_\sigma - R_0)^3} \right] + C \quad (21)$$

где  $C$  – произвольная постоянная.

$$\text{Принимаем } C = \frac{\gamma \beta f k_{\max}}{\pi R_0 k_0^2} (R_\sigma - R_0) \cdot C_1 \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0}$$

Из выражений (13) и (21) следует:

$$\sigma_x = \left( (x+h/2)^2 + (R_\sigma - R_0)^2 \right) \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{2\pi R_0 k_0} \cdot \left\{ \frac{\gamma}{k_0} (R_\sigma - R_0) \cdot \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0} \left[ \frac{\beta f k_{\max}}{\pi R_0 k_0} \frac{\pi R_0 k_0 x}{\beta f k_{\max}} \frac{(x+h/2)^3}{6(R_\sigma - R_0)} + \frac{\left( \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1 \right) (x+h/2)^5}{20(R_\sigma - R_0)^3} \right] + C_1 \right\} \quad (22)$$

ИЛИ

$$\sigma_x = \frac{\gamma \beta f k_{\max}}{\pi R_0 k_0^2} \left( \frac{\sqrt{(x+h/2)^2 + (R_\sigma - R_0)^2}}{(R_\sigma - R_0)} \right) \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{\pi R_0 k_0} \cdot \left\{ \left[ \frac{\pi R_0 k_0 x}{\beta f k_{\max}} \frac{(x+h/2)^3}{6(R_\sigma - R_0)} + \frac{\left( \frac{\beta f k_{\max} (R_\sigma - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1 \right) (x+h/2)^5}{20(R_\sigma - R_0)^3} \right] + C_1 \right\} \quad (23)$$

Так как при  $x=0$   $\sigma_x = \sigma_n$  (где  $\sigma_n$  – напряжения на поверхности почвы выработки возникающие за счет противодействия выдавливанию пород почвы, МПа), то выражение (23) примет вид:

$$\sigma_n = \frac{\gamma\beta k_{\max}}{\pi R_0 k_0^2} \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2}}{(R_{\sigma} - R_0)} \right)^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{\pi R_0 k_0}} \cdot \left\{ \left[ \frac{\left(\frac{h}{2}\right)^3}{6 \cdot (R_{\sigma} - R_0)} + \frac{\left(\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1\right) \left(\frac{h}{2}\right)^5}{20 \cdot (R_{\sigma} - R_0)^3} \right] + C_1 \right\} \quad (24)$$

откуда

$$C_1 = \frac{\pi R_0 k_0^2 \sigma_n}{\gamma\beta k_{\max} \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2}}{(R_{\sigma} - R_0)} \right)^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{\pi R_0 k_0}}} \left[ \frac{\left(\frac{h}{2}\right)^3}{6 \cdot (R_{\sigma} - R_0)} + \frac{\left(\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1\right) \left(\frac{h}{2}\right)^5}{20 \cdot (R_{\sigma} - R_0)^3} \right] \quad (25)$$

Из выражений (23) и (25) получим:

$$\sigma_x = \frac{\gamma\beta k_{\max}}{\pi R_0 k_0^2} \left( \frac{\sqrt{\left(x + \frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2}}{(R_{\sigma} - R_0)} \right)^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{\pi R_0 k_0}} \cdot \left\{ \left[ \frac{\pi R_0 k_0 x}{\beta k_{\max}} \frac{\left(x + \frac{h}{2}\right)^3}{6 \cdot (R_{\sigma} - R_0)} + \frac{\left(\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1\right) \left(x + \frac{h}{2}\right)^5}{20 \cdot (R_{\sigma} - R_0)^3} \right] + \left[ \sigma_n \cdot \frac{\pi R_0 k_0^2}{\gamma\beta k_{\max}} \left( \frac{(R_{\sigma} - R_0)}{\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2}} \right)^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{\pi R_0 k_0}} + \frac{\left(\frac{h}{2}\right)^3}{6 \cdot (R_{\sigma} - R_0)} + \frac{\left(\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi R_0 k_0} + 1\right) \left(\frac{h}{2}\right)^5}{20 \cdot (R_{\sigma} - R_0)^3} \right] \right\} \quad (26)$$

После тождественных преобразований выражение (26) примет вид:

$$\sigma_x = \sigma_n \cdot \left[ \frac{\left(x + \frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2}{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (R_{\sigma} - R_0)^2} \right]^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi k_0 \cdot R_0}} + \frac{\gamma\beta k_{\max}}{\pi k_0^2 \cdot R_0} \cdot \left[ \frac{\left(x + \frac{h}{2}\right)^2}{(R_{\sigma} - R_0)^2} + 1 \right]^{\frac{\beta k_{\max} (R_{\sigma} - R_0)}{2\pi k_0 \cdot R_0}} \cdot \left[ \frac{\pi k_0 \cdot R_0 \cdot x}{\beta k_{\max}} \frac{1}{6} \left[ \frac{\left(x + \frac{h}{2}\right)^3 - \left(\frac{h}{2}\right)^3}{(R_{\sigma} - R_0)} \right] + \frac{1}{20} \left[ \frac{\left(x + \frac{h}{2}\right)^5 - \left(\frac{h}{2}\right)^5}{(R_{\sigma} - R_0)^3} \right] + \frac{1}{40} \frac{\beta k_{\max}}{\pi k_0} \frac{\left[\left(x + \frac{h}{2}\right)^5 - \left(\frac{h}{2}\right)^5\right]}{R_0 \cdot (R_{\sigma} - R_0)^2} \right] \quad (27)$$

Полученное уравнение позволяет определять напряжения в выделенном объеме сыпучего тела в зависимости от его высоты с учетом  $\sigma_n$ ,

$h, R_0, R_0, \beta, f, k_0, k_{max}$  и показывает, что с удалением от контура почвы выработки  $x$  интенсивность напряжений возрастает.

Графически характер изменения напряжений в породах почвы выработки в пределах зоны разрушенных пород в зависимости от удаления вглубь массива от контура почвы выработки при подстановке значений влияющих факторов для условий конвейерной выработки 5-ой восточной лавы пласта  $c_{11}$  шахты «Южнодонбасская» №3 может быть представлена в следующем виде – рисунок 7.

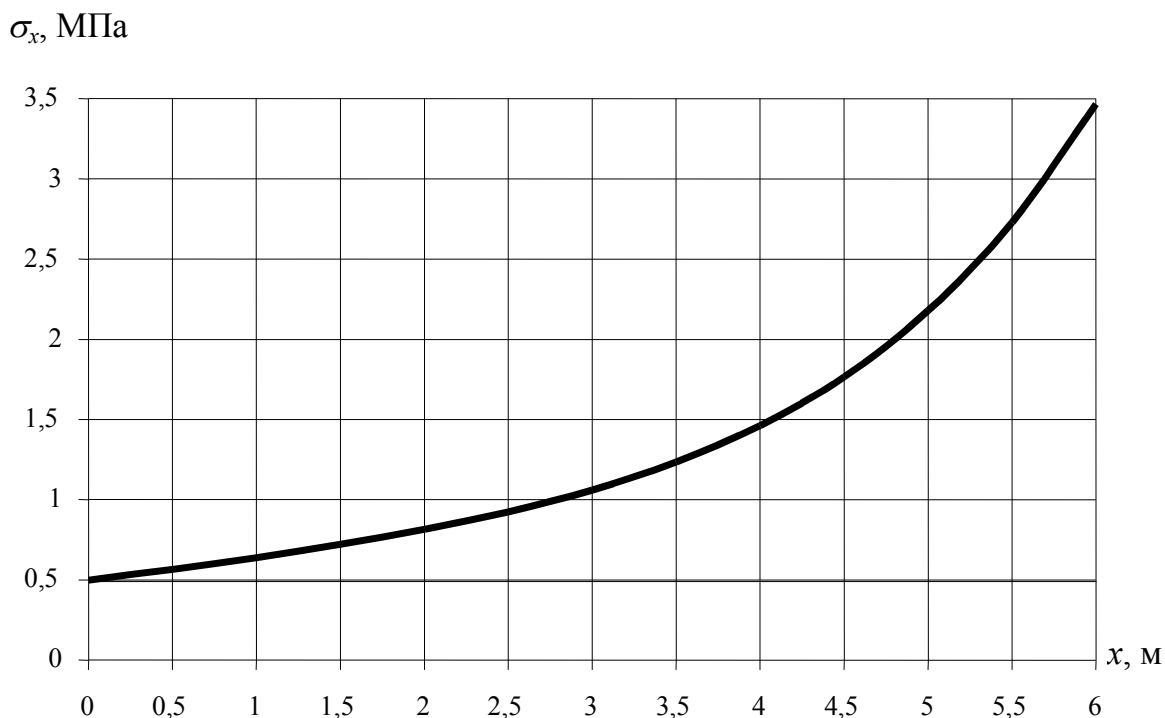


Рисунок 7 Характер изменения напряжений в породах почвы выработки в пределах зоны разрушенных пород в зависимости от удаления вглубь массива от контура почвы выработки

### Библиографический список

1. Соловьев Г.И., Негрей С.Г., Кублицкий Е.В. Опытнo-промышленная проверка способа локализации выдавливания пород почвы // Геотехнологии на рубеже XXI века – Донецк – ДУНПГО. – 2001. – С.63-68.
2. Цимбаревич П.М. Рудничное крепление. – М.-Х.: Углетехиздат, 1951. - 607 с.
3. Бондаренко Ю.В. Научные основы безлюдной и безотходной технологии выемки весьма тонких пологих пластов. Дис... докт. техн. наук: 05.15.02. – Донецк, 1991. – 355 с.
4. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

5. Махно Е.Я. Вопросы разработки крутопадающих пластов угля с применением щитовой крепи. – М.: Углетехиздат, 1957. – 230 с.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1983. – 288 с.
7. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высш школа, 1982. – 503 с.
8. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. – Ленингр.- Москва: Изд. литературы по строительству, 1966. – 319 с.
9. Бондаренко Ю.В., Соловьев Г.И., Негрей С.Г., Мороз О.К. Моделирование механических процессов в породах почвы подготовительной выработки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения – Донецк – ДонГТУ. – 2000. – С. 105-109.
10. Цвылев Н.А. Исследование давления на крепь и смещений в породах, окружающих штрек // Исследования горного давления – Москва. Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу – 1976. – С. 58-69.
11. Цимбаревич П.М. Об углах внутреннего сопротивления в горных породах // Горный журнал. – 1933. - № 7-8. – С. 48-51.
12. Максимов А.П. Горное давление и крепь выработок. – М.: Недра, 1973. – 288 с.
13. Терентьев Б.Д., Кушнарченко Г.Л., Фрянов В.Н. Исследования напряженно-деформированного состояния пород вокруг подготовительной выработки в зоне влияния очистных работ // Уголь. – 1991. - №6. – С. 3-6.
14. Сонин С.Д., Черняк И.Л., Лукичев В.С. О влиянии некоторых горнотехнических и горно-геологических факторов на интенсивность пучения почвы горных выработок в условиях Подмосковского бассейна // Разработка месторождений полезных ископаемых - М.: Недра – 1965. – С. 172-181.
15. Авторский надзор за внедрением рациональных способов охраны подготовительных выработок, предотвращающих пучение почвы: Заключ. отчет/ ДПИ; Руковод. А.И. Костоманов .- Х-77-11; № ГР 76038286; Инв. № 0282.0082385.- Донецк. - 1980.- 64 с.
16. Гмошинский В.Г. Горное давление и расчет крепей горизонтальных выработок // Исследования горного давления – Москва. Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу – 1976. – С. 411-434.
17. Долоткин Ю.Н., Стесев В.В., Погудин Ю.М. Анализ состояния повторно- используемых выработок глубокого заложения // Уголь. – 1993. - №3. – С. 9-10.
18. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / Под ред. А.Н. Зорина. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

19. Дашко Р.Э. Механика горных пород. – М.: Недра, 1987. – 263 с.

*© Соловьев Г.И., Негрей С.Г., Гирин В.С., Кублицкий Е.В.*