

### Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.831

И.В. Антипов<sup>1</sup>, Н.В. Бондаренко<sup>2</sup>, И.А. Турбор<sup>3</sup>, А.В. Савенко<sup>3</sup>

#### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В ПЕРИОД ВТОРИЧНЫХ ПОСАДОК КРОВЛИ

<sup>1</sup>УкрНИМИ НАН Украины

<sup>2</sup>Институт последипломного образования и повышения квалификации

<sup>3</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины

*Исследовано напряженно-деформированное состояние вмещающих пород при комплексно-механизированной технологии отработки угольного пласта с учетом влияния механизированной крепи на перераспределение поля напряжений в окрестности выработки в зависимости от механических свойств пород.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, угольный пласт, горные породы, механизированная крепь, методы теории упругости анизотропного тела

Ранее проведенными исследованиями [1] установлено, что непроизводительные затраты времени обусловлены совокупностью факторов, среди которых доминирующими являются горно-геологические условия залегания пласта. Физико-механические свойства горных пород и угольного пласта обуславливают перераспределение напряжений в массиве вмещающих пород при отработке пластов.

Кроме того, на интенсивность изменения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород оказывают горнотехнические условия отработки угольного пласта. Ключевыми горнотехническими факторами являются несущая способность механизированной крепи, способ управления кровлей и ширина захвата исполнительного органа комбайна. Совокупность горно-геологических условий залегания угольного пласта и горнотехнических условий его отработки определяют состояние очистного забоя, окружающих подземных выработок и дневной поверхности.

Поэтому исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом его упругих и прочностных свойств и технологии отработки угольного пласта является актуальной научной задачей. Установление зависимостей взаимовлияния горно-геологических и горнотехнических факторов на напряжённо-деформированное состояние массива в

окрестности очистного забоя позволит разработать рекомендации по снижению непроизводительных затрат времени.

**Цель работы:** установить особенности перераспределения напряжений и деформаций в породах кровли и почвы пласта при выемке угля в зависимости от различных типов вмещающих пород.

Для исследования были приняты следующие исходные данные:

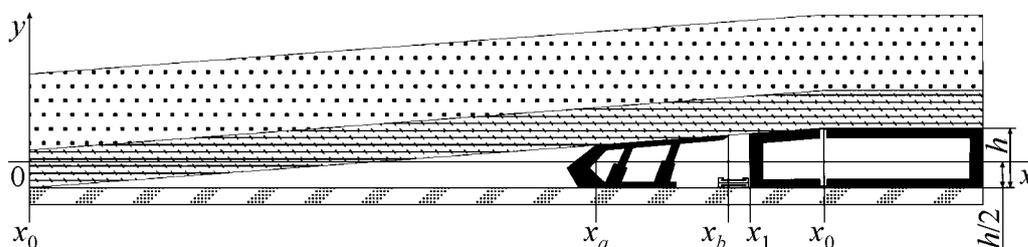
- массив горных пород – ортотропная среда [2];
- глубина залегания  $H = 1000$  м;
- мощность пласта  $2h = 1$  м;
- пласт залегает под углом  $\alpha$ .

К рассмотрению приняты три типа пород:

- аргиллит: модули Юнга  $E_1 = 4,5 \cdot 10^9$  Па,  $E_2 = 4 \cdot 10^9$  Па, модули сдвига  $G_1 = G_2 = 2 \cdot 10^9$  Па, прочность  $\sigma_{\text{раст}} = 7 \cdot 10^6$  Па,  $\sigma_{\text{сж}} = 5,2 \cdot 10^7$  Па;
- левролит: модули Юнга  $E_1 = 3 \cdot 10^9$  Па,  $E_2 = 7 \cdot 10^9$  Па, модули сдвига  $G_1 = G_2 = 2 \cdot 10^9$  Па, прочность  $\sigma_{\text{раст}} = 1,2 \cdot 10^7$  Па,  $\sigma_{\text{сж}} = 7 \cdot 10^7$  Па;
- песчаный сланец: модули Юнга  $E_1 = 3 \cdot 10^9$  Па,  $E_2 = 7 \cdot 10^9$  Па, модули сдвига  $G_1 = G_2 = 2 \cdot 10^9$  Па, прочность  $\sigma_{\text{раст}} = 1,2 \cdot 10^7$  Па,  $\sigma_{\text{сж}} = 9 \cdot 10^7$  Па.

Управление кровлей – полное обрушение.

Расчётная схема приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема разработки пласта:  $x_a$  – координата посадочного ряда стоек,  $x_b$  – координата первого ряда стоек,  $x_1$  – координата очистного забоя,  $x_2$  – координата конца области неупругих деформаций

Распределение напряжений и деформаций находится методами теории упругости анизотропного тела. Распределение напряжений и деформаций находится методами теории упругости анизотропного тела.

Угольный пласт залегает под углом  $\alpha$  к дневной поверхности. Ось  $x$  направим по падению пласта. Ось  $y$  декартовой системы координат направим перпендикулярно пласту в сторону поверхности. Начало координат поместим в точку смыкания пород кровли и почвы. Исходное состояние ненарушенного массива задается формулами Динника [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_y^{(0)} &= -m\gamma(H - x \sin \alpha - y \cos \alpha); \\ \sigma_x^{(0)} &= -\lambda\gamma(H - x \sin \alpha - y \cos \alpha); \\ \tau_{xy}^{(0)} &= -l\gamma(H - x \sin \alpha - y \cos \alpha). \end{aligned} \quad (1)$$

Наличие выработки приводит к образованию дополнительного поля напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(1)}; \\ \sigma_x &= \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(1)}; \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(1)},\end{aligned}\tag{2}$$

где  $\sigma_y^{(0)}$ ,  $\sigma_x^{(0)}$ ,  $\tau_{xy}^{(0)}$  – компоненты напряжений ненарушенного массива;  $\sigma_y^{(1)}$ ,  $\sigma_x^{(1)}$ ,  $\tau_{xy}^{(1)}$  – дополнительные компоненты напряжений, возникающих при ведении очистных работ.

Для определения напряжений сформулируем краевые условия. В области смыкания пород вертикальные смещения равны нулю

$$v^+ = v^- = 0, \quad x < 0, \quad y = 0,\tag{3}$$

где  $v^+$  – вертикальные перемещения пород кровли,  $v^-$  – смещения пород почвы.

В зоне свободного зависания кровли отсутствуют вертикальные напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0, \quad 0 < x < x_a, \quad y = 0; \\ \sigma_y &= 0, \quad x_b < x < x_1, \quad y = 0.\end{aligned}\tag{4}$$

На закрепленном участке краевые условия имеют вид:

$$\sigma_y = -R + px, \quad x_a < x < x_b, \quad y = 0,\tag{5}$$

где  $x_a$  – координата первого ряда стоек,  $x_b$  – координата посадочного ряда стоек,  $-R + px$  – реакция крепи.

На участке между крепью и забоем породы находятся в свободном состоянии:

$$\sigma_y = 0, \quad x_b < x < x_1, \quad y = 0.\tag{6}$$

Вблизи забоя уголь находится в пластическом состоянии, а напряжения имеют вид [2]:

$$\sigma_y = -(ax/h + c), \quad x_1 < x < x_2, \quad y = 0.\tag{7}$$

где  $a = k/\gamma H$ ,  $c = k/\gamma H (\pi h/2 - x_1)$ ,  $k$  – прочность угля при сдвиге,  $x_1$  – координата забоя,  $x_2$  – пик опорного давления.

За пределами зоны опорного давления угольный пласт считается недеформируемым:

$$v^+ - v^- = 2h, \quad x > x_2, \quad y = 0.\tag{8}$$

Считаем, что сдвиговые напряжения при  $y = 0$  отсутствуют, т.е.

$$\tau_{xy} = 0, \quad y = 0. \quad (9)$$

Координаты  $x_1, x_2$  неизвестны и определяются в ходе решения задачи. Задаются величины  $l_1$  – ширина поддерживаемого пространства и  $l_2$  – расстояние от забоя до посадочного ряда:

$$l_1 = x_b - x_a, \quad l_2 = x_1 - x_b. \quad (10)$$

Связь деформаций с напряжениями в линейной теории упругости можно записать в виде закона Гука [3].

Как правило, протяженность очистного забоя является достаточно большой величиной, поэтому в средней части лавы с достаточной степенью достоверности можно считать, что вмещающие породы при отработке угольного пласта испытывают плоскую деформацию. Это позволяет вместо рассмотрения всей области, занятой телом, ограничиться рассмотрением его элемента, выделенного двумя поперечными сечениями. Очевидно следующее:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Плоская деформация представляет собой такое напряженно-деформированное состояние, когда все перемещения точек тела происходят параллельно одной плоскости.

Плоская деформация реализуется, например, в призматическом теле, теоретически бесконечной длины, нагруженном поверхностными и объемными силами, перпендикулярными оси  $z$ . Тогда все поперечные сечения тела находятся в одинаковых условиях. Это позволяет вместо рассмотрения всей области, занятой телом, ограничиться рассмотрением его элемента, выделенного двумя поперечными сечениями.

Для ортотропного материала, при совмещении координатных плоскостей с плоскостями ортотропии закон Гука записывается в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= c_{11}\sigma_x + c_{12}\sigma_y + c_{13}\sigma_z; \\ \varepsilon_y &= c_{21}\sigma_x + c_{22}\sigma_y + c_{23}\sigma_z; \\ \varepsilon_z &= c_{31}\sigma_x + c_{32}\sigma_y + c_{33}\sigma_z; \\ \gamma_{xy} &= c_{44}\tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = c_{44}\tau_{yz}; \quad \gamma_{zx} = c_{44}\tau_{zx}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициенты  $c_{ij}$  ортотропного материала обычно связывают с механическими характеристиками материала – модулями упругости и коэффициентами Пуассона для трех направлений ортотропии [7]. Тогда формулы (12) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{xz}}{E_z} \sigma_z; \quad \varepsilon_y = -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{yz}}{E_z} \sigma_z; \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{zy}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z = 0; \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}; \end{aligned} \quad (13)$$

где  $E_x, E_y, E_z$  – модули упругости;  $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{yz}, \nu_{zy}, \nu_{zx}, \nu_{xz}$  – коэффициенты Пуассона;  $G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}$  – модули сдвига ортотропного материала.

В систему уравнений плоской деформации входят уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y &= 0. \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

уравнения связи между напряжениями и перемещениями (11) и уравнение совместности деформации

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}. \quad (15)$$

Введем функцию напряжения  $U$ , через которую компоненты тензора напряжения выражаются в виде:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}. \quad (16)$$

Подставив соотношение (16) в уравнение совместности деформаций с учетом закона Гука (13), относительно функции напряжения  $U$ , получим уравнение в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( b_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + b_{12} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - b_{16} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( b_{21} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + b_{22} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - b_{26} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = \\ = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( b_{61} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + b_{62} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - b_{66} \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right). \end{aligned}$$

После упрощений получим

$$b_{22} \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - b_{26} \frac{\partial^4 U}{\partial x^3 \partial y} + (2b_{12} + b_{66}) \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} - 2b_{16} \frac{\partial^4 U}{\partial x \partial y^3} + b_{11} \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0. \quad (17)$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$b_{11} \mu^4 = 2b_{16} \mu^3 + (2b_{12} + a_{66}) \mu^2 - 2b_{26} \mu + b_{22} = 0. \quad (18)$$

Это алгебраическое уравнение четвертой степени. В работах С.Г. Лехницкого [3] доказано, что корни этого уравнения являются комплексными и показано, что напряжения выражаются как функции обобщенных комплексных переменных  $z_j = x + \mu_j y$ :

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= 2 \operatorname{Re}(\mu_1^2 \Phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \Phi_2'(z_2)), \\
 \sigma_y &= 2 \operatorname{Re}(\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)), \\
 \tau_{xy} &= -2 \operatorname{Re}(\mu_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \Phi_2'(z_2)), \\
 u &= 2 \operatorname{Re}(p_1 \Phi_1(z_1) + p_2 \Phi_2(z_2)) + u_0, \\
 v &= 2 \operatorname{Re}(q_1 \Phi_1(z_1) + q_2 \Phi_2(z_2)) + v_0, \\
 z_1 &= x + \mu_1 y, \quad z_2 = x + \mu_2 y,
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \beta_{11} \mu_1^2 + \beta_{12} - \beta_{16} \mu_1, \quad q_1 = \beta_{12} \mu_1 + \beta_{22} / \mu_1 - \beta_{26}, \\
 p_2 &= \beta_{11} \mu_2^2 + \beta_{12} - \beta_{16} \mu_2, \quad q_2 = \beta_{12} \mu_2 + \beta_{22} / \mu_2 - \beta_{26}.
 \end{aligned}$$

Для ортотропных сред уравнение (18) является биквадратным, а его корни чисто мнимыми:

$$b_{11} \mu^4 + (2b_{12} + b_{66}) \mu^2 + b_{22} = 0.$$

Обобщенные комплексные потенциалы определяются из граничных условий [4, 5].

Условие (9) выполняется, если комплексные потенциалы  $\Phi_1'(z_1)$  и  $\Phi_2'(z_2)$  выражены через  $F(z)$ :

$$\Phi_1'(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1); \quad \Phi_2'(z_2) = \frac{\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} F(z_2). \tag{20}$$

Функцию  $F(z)$  выбираем так, что напряжение на бесконечности должно стремиться к нулю, так как влияние выработки носит локальный характер. Это выражается граничным условием [5]

$$F(\infty) = 0. \tag{21}$$

Для решения задачи используется метод интегралов типа Коши [2,4]. В общем случае граничные условия напряжений задаются формулами:

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \sigma(x), \quad x \in (0; x_2), \quad y = 0; \\
 v &= \pm h, \quad x \geq x_2, \quad y = 0; \\
 \tau_{xy} &= \tau(x), \quad x \in (-\infty; +\infty).
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Решение задачи определяется по формуле Келдыша-Седова и имеет следующий вид:

$$\Phi_1'(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1); \quad \Phi_2'(z_2) = \frac{\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} F(z_2) + \frac{i}{2\pi\mu_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tau(t) dt}{t - z}; \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 F(z) = & \frac{1}{\pi i \sqrt{z^2 - (x_2)^2}} \int_0^{x_2} \frac{\sqrt{t^2 - (x_2)^2} \left( \frac{\sigma(t)}{2} + 2 \operatorname{Re} \frac{p(t)}{\mu_2} \right)}{t - z} dt + \\
 & + \frac{1}{\pi i \sqrt{z^2 - (x_2)^2}} \int_{-\infty}^0 \frac{2\sqrt{t^2 - (x_2)^2} \operatorname{Re} \left( \frac{q_2 p(t)}{\mu_2} \right)}{t - z} + \\
 & + \frac{1}{\pi i \sqrt{z^2 - (x_2)^2}} \int_{x_2}^{+\infty} \frac{2\sqrt{t^2 - (x_2)^2} \operatorname{Re} \left( \frac{q_2 p(t)}{\mu_2} \right)}{t - z}, \\
 p(t) = & \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tau(s)}{t - s} ds + \frac{\tau(t)}{2}. \tag{24}
 \end{aligned}$$

Функция  $F(z)$ , удовлетворяющая условиям (3)–(9), (21) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 F(z) = & \frac{1}{2} \frac{(az/h + c)i}{2\pi} \ln \frac{-x_1(2z - x_2) + zx_2 + 2i\sqrt{z(z - x_2)}\sqrt{x_1(x_2 - x_1)}}{x_2(x_1 - z)} - \\
 & - \frac{i}{2\pi} a \frac{\sqrt{z(z - x_2)}}{h} \ln \frac{2x_1 - x_2 + 2i\sqrt{x_1(x_2 - x_1)}}{x_2} - \\
 & - \rho \frac{i}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{-(x_1 - l_2)(x_2 - x_1 + l_2)}\sqrt{z(z - x_2) - zx_2 + 2(x_1 - l_2)z - (x_1 - l_2)x_2}}{(z - x_1 + l_2)h} + \\
 & + \frac{i}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{-(x_1 - l_2 - l_1)(x_2 - x_1 + l_2 + l_1)}\sqrt{z(z - x_2) - zx_2 + 2(x_1 - l_2 - l_1)z}}{(z - x_1 + l_2 + l_1)h} + \\
 & + \frac{1}{8} p(8z^2 \ln(-x_2 + 2x_1 - 2l_1 - 2l_2 + 2\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}) - \\
 & - 4x_2z \ln(-x_2 + 2x_1 - 2l_1 - 2l_2 + 2\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}) - \\
 & - x_2^2 \ln(-x_2 + 2x_1 - 2l_1 - 2l_2 + 2\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}) - \\
 & - 8z\sqrt{z(z - x_2)} \ln\left(-\frac{1}{z - x_1 + l_1 + l_2} (2\sqrt{z(z - x_2)}\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)} - \right. \\
 & \left. - 2l_1z - 2l_2z + 2x_1z - x_2z + x_2l_1 + x_2l_2 + x_2x_1)) - 8z^2 \ln(2) + 4x_2 \ln(2) + x_2^2 \ln(2) + \right. \\
 & + 8z\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)} - 4\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}l_1 - \\
 & - 4\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}l_2 + 4\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}x_1 - \\
 & \left. - 2\sqrt{(-x_1 + l_1 + l_2)(l_1 + l_2 - x_1 + x_2)}x_2\right). \tag{25}
 \end{aligned}$$

Условие локальности влияния выработки определяется из разложения функции  $F(z)$  в ряд Лорана:

$$\begin{aligned}
 & 1 - \frac{a\sqrt{x_1(x_2-x_1)}}{\pi h} - \frac{c}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{x_1(x_2-x_1)}}{2x_1-x_2} - \frac{cx_2}{2\pi h} \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{x_1(x_2-x_1)}}{2x_1-x_2} - \\
 & - \frac{1}{8} p - 2\sqrt{(-x_1+l_1+l_2)(l_1+l_2-x_1+x_2)}x_2 - 4\sqrt{(-x_1+l_1+l_2)(l_1+l_2-x_1+x_2)}l_1 - \\
 & - x_2^2 \ln\left(-x_2+2x_1-2l_1-2l_2+2\sqrt{(-x_1+l_1+l_2)(l_1+l_2-x_1+x_2)}\right) \\
 & + x_2^2 \ln(2) - 4\sqrt{(-\gamma_1+l_1+l_2)(l_1+l_2-\gamma_1+\gamma_2)}l_2 + \\
 & + 4\sqrt{(-\gamma_1+l_1+l_2)(l_1+l_2-\gamma_1+\gamma_2)}\gamma_1 - \\
 & - p \ln \frac{2x_2h-2l_2h-x_2h+2x_1^2-4x_1l_1-2x_1x_2+2l_2^2+2l_2x_2}{x_1h-2l_2h-2l_1h-x_2h2x_1^2-4x_1l_2-4x_1l_1-2x_1x_2+x_2+2l_1^2+2l_2x_2+2l_2^2+4l_1l_2+2l_2} = 0. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Условия (3) и (8) на вертикальные смещения принимают вид:

$$\int_0^{x_2} -\operatorname{Im} F(t) dt = h. \quad (27)$$

Уравнения (26) и (27) образуют систему, из которой находятся координаты  $x_1, x_2$ . Далее, из соотношений (20) находятся комплексные потенциалы, а из них по формулам Лехницкого (19) определяется поле напряжений и смещений в массиве с выработкой.

Таким образом, аналитические методы теории упругости позволяют определить напряженно-деформированное состояние массива при разработке угольного пласта и различных технологических условиях. Расчеты можно провести для разнообразных свойств вмещающих пород и технологических параметров ведения очистных работ [7, 8]. Это позволяет определить способы управления горным давлением и породами для оптимизации добычи полезных ископаемых [9]. На рис. 2, 3 и в табл. 1, 2 показаны результаты вычислений при глубине залегания  $H = 1000$  м, мощности пласта  $2h = 2$  м,  $l_1 = 4$  м,  $l_2 = 2$  м [10].

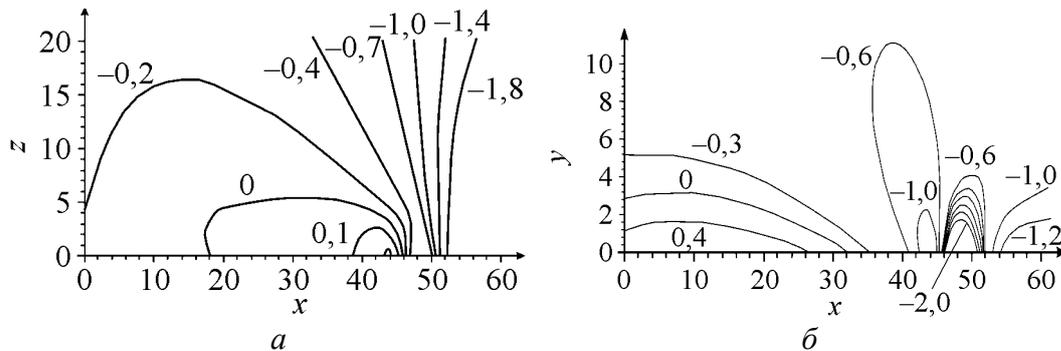


Рис. 2. Изолинии: а – вертикальных ( $\sigma_y/\gamma H$ ) и б – горизонтальных ( $\sigma_x/\gamma H$ ) напряжений

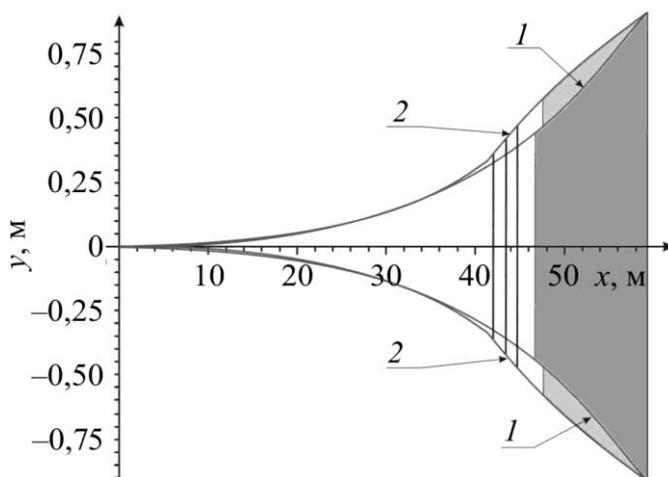


Рис. 3. Конвергенция пород кровли и почвы без крепи (1) и с крепью (2)

Таблица 1

Напряжения в породах кровли вблизи пласта

Расстояние от забоя, м	Напряжения в породах кровли, $10^7$ Па					
	песчанистый сланец		аргиллит		алевролит	
	вертикальные	горизонтальные	вертикальные	горизонтальные	вертикальные	горизонтальные
-20	1,312	0,000	0,362	0,000	0,721	0,000
-5	0,421	-0,010	0,294	-0,001	0,432	-0,012
-2	-0,241	-0,109	0,114	-0,099	0,092	-0,102
0	-2,143	-1,153	-1,057	-1,025	-1,427	-1,122
2	-5,198	-4,459	-4,281	-4,263	-4,665	-4,281
4	-8,306	-6,696	-6,823	-6,763	-7,557	-6,682
6	-11,290	-9,458	-9,277	-9,462	-10,261	-9,081
8	-13,956	-11,852	-9,566	-9,616	-12,204	-11,441
12	-13,206	-10,340	-5,894	-5,940	-8,976	-7,361
16	-9,861	-7,601	-4,884	-4,985	-6,985	-5,866
20	-8,234	-6,478	-4,347	-4,479	-5,893	-5,149

Таблица 2

Максимальные сжимающие напряжения в зоне опорного давления

Порода	Свободное зависание, м	Протяженность пластической зоны, м	Максимум сжимающего вертикального напряжения, Па	Максимум сжимающего горизонтального напряжения, Па
Песчанистый сланец (с крепью)	46,2	13,2	$-14,2 \cdot 10^7$	$-16,0 \cdot 10^7$
Аргиллит (с крепью)	35,4	7,6	$-10,3 \cdot 10^7$	$-9,6 \cdot 10^7$
Алевролит (без крепи)	39,9	9,8	$-12,2 \cdot 10^7$	$-12,8 \cdot 10^7$
Песчанистый сланец (без крепи)	45,2	13,6	$-13,9 \cdot 10^7$	$-15,9 \cdot 10^7$
Аргиллит (без крепи)	34,7	8,0	$-10,1 \cdot 10^7$	$-9,5 \cdot 10^7$

Анализ полученных численных результатов указывает на то, что напряжение в призабойной зоне возрастает и могут превысить предел прочности породы. Для пород с более сильной анизотропией (алевролит, песчанистый сланец) наблюдается превышение горизонтальных напряжений над вертикальными [11]. В случае если породы близки к изотропным (аргиллит), вертикальные и горизонтальные напряжения практически совпадают. Протяженность зоны опорного давления и максимальные сжимающие напряжения будут большими для пород с большими модулями упругости.

Установлено, что в области свободного зависания кровли вблизи забоя породы находятся в разгруженном состоянии. На расстоянии 5–10 м от забоя образуется зона растягивающих горизонтальных напряжений. Чем сильнее анизотропия пород, тем больше величина растягивающих горизонтальных напряжений. Наиболее сильная анизотропия наблюдается у песчанистого сланца, в этом случае горизонтальные напряжения превышают предел прочности, что может привести к обвалам пород [12].

Таким образом, полученное аналитическое решение позволяет в зависимости от свойств вмещающих пород и технологии отработки разрабатывать рекомендации для управления состоянием пород кровли с целью снижения негативного проявления горного давления: обвалов до механизированной крепи, посадку механизированной крепи на жесткую. Это позволит сократить или исключить нерегламентированные простои при передвижении механизированной крепи.

1. Антипов И.В., Турбор И.А. Применение МГУА для формализации производственных процессов и операций в очисных забоях // Технико-экономические проблемы горного производства. – Вып. 15. – 2012. – С. 152–168.
2. Левшин А.А., Мануйленко Р.И. Напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород // Теоретическая и прикладная механика, вып. 27. – 1997. – С. 81–86.
3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
4. Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
5. Александров А.Я., Соловьев Ю.И. Пространственные задачи теории упругости (применение методов теории функций комплексного переменного). – М.: Наука, 1978.
6. Александров В.М., Коваленко Е.В. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. – М.: Наука, 1986.
7. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. – М.: Наука, 1974.
8. Аннин Б.Д., Черепанов Г.П. Упруго-пластическая задача. – Новосибирск: Наука, 1983.
9. Амензаде Ю.А. Теория упругости (3-е издание). – М.: Высшая школа, 1976.
10. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980.
11. Варвак П.М., Рябов А.Ф. Справочник по теории упругости. – Киев: Будівельник, 1971.
12. Ершов Л.В., Либерман И.Б., Нейман Л.К. Механика горных пород. – М.: Недра, 1987. – 192 с.

*I.B. Антипов, M.B. Бондаренко, I.O. Турбор, A.B. Савенко*

### **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ВУГІЛЬНИХ ПОРІД В ПЕРІОД ВТОРИННОЇ ПОСАДКИ ПОКРІВЛІ**

Досліджено напружено-деформований стан вміщуючих порід при комплексно-механізованій технології відробітку вугільного пласта з урахуванням впливу механізованого кріплення на перерозподіл поля напруги в околі виробки в залежності від механічних властивостей порід.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, вугільний пласт, гірські породи, механізоване кріплення, методи теорії пружності анізотропного тіла

*I.V. Antypov, N.V. Bondarenko, I.A. Turbor, A.V. Savenko*

### **TENSELY-DEFORMED STATE OF CONTAINING BREEDS IN THE PERIOD OF SECONDARY LANDINGS OF ROOF**

Intense-deformed condition of containing breeds at the complex-mechanised technology of coal layer working taking into account influence mechanised support on redistribution of pressure field in development vicinity depending on breeds mechanical properties is investigated.

**Keywords:** stress-strain state, the coal seam, rocks, powered roof supports, methods of the theory of elasticity of an anisotropic body