

УДК 622.834

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ДО ПЕРВИЧНОЙ ПОСАДКИ КРОВЛИ

Антипов И. В.

(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Турбор И. А.

(АДИ ДонНТУ, г. Горловка, Украина)

Савенко А. В.

(ИФГП НАНУ, г. Донецк, Украина)

Мануйленко Р. И.

(ИПММ НАНУ, г. Донецк, Украина)

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

Intense-deformed condition of containing breeds in complex-mechanized technology of coal layer working off taking into account mechanized fix influence on redistribution of pressure field in vicinity of development depending on physic and mechanical properties of rocks is investigated.

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

Кроме того, на интенсивность изменения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород оказывают влияние горнотехнические условия отработки угольного пласта. Ключевыми горнотехническими факторами являются способ управления кровлей, несущая способность и шаг передвижки механизированной крепи. Совокупность горно-геологических условий залегания угольного пласта и горнотехнических условий его отработки определяют состояние очистного забоя, окружающих забой 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 распределения напряжений, деформаций в породах кровли и почвы в начальной стадии разработки угольного пласта.

Расчётная схема представлена на рисунке 1.

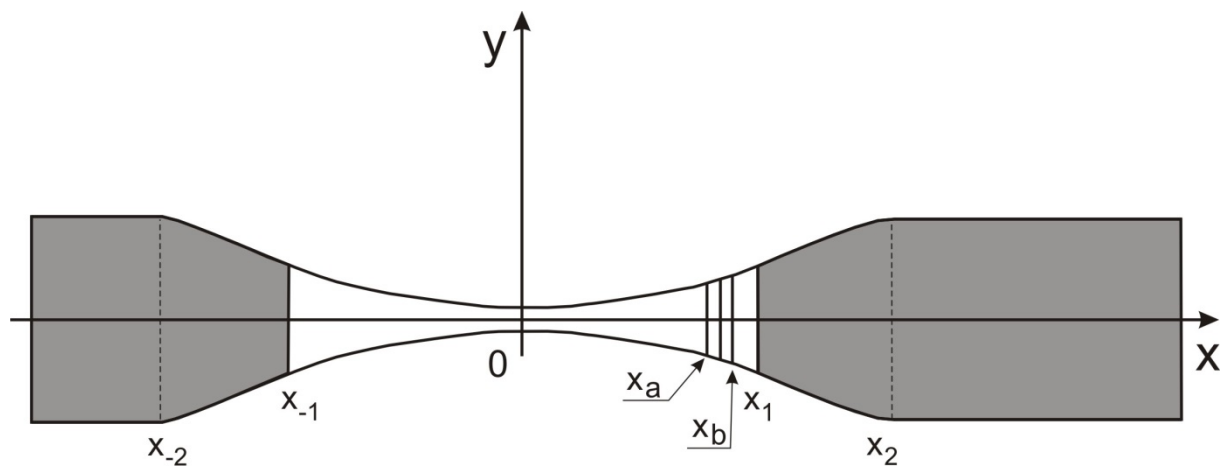


Рис. 1. Расчётная схема

Ось x декартовой системы координат направлена по простиранию пласта, ось y – перпендикулярно пласту в сторону дневной поверхности. За начало координат принимается середина выра-

ботанного пространства. Вблизи забоя угольный пласт находится в неупругом состоянии. Часть выработанного пространства на участке $(x_a; x_b)$ закреплена. Координаты краевой части пласта обозначим x_{-1} и x_1 . Границы зон призабойных пластических деформаций – x_{-2} и x_2 .

Естественное напряженное состояние пород вызвано их весом и выражается формулами [2]:

$$\begin{aligned}\sigma_y^{(0)} &= -\gamma(H - y); \\ \sigma_x^{(0)} &= -\lambda\gamma(H - y); \\ \tau_{xy}^{(0)} &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

где γ – удельный вес горных пород;

λ – коэффициент бокового распора.

После того как часть угольного пласта была удалена, происходит перераспределение напряжений в угольном пласте и вмещающих породах. Представим возникающие компоненты напряжений:

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

$\sigma_y^{(1)}, \sigma_x^{(1)}, \tau_{xy}^{(1)}$ – дополнительные напряжения, которые необходимо найти.

Дополнительное поле напряжений находится из граничных условий. В области свободного состояния пород отсутствуют нормальные и касательные напряжения

$$\begin{aligned}\sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0, \quad x_{-1} < x < x_a, \quad y = 0 \\ \sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0, \quad x_b < x < x_1, \quad y = 0\end{aligned}\tag{3}$$

На закрепленном участке реакция крепи распределена по линейному закону:

$$\sigma_y = -R + px, \quad \tau_{xy} = 0, \quad x_a < x < x_b, \quad y = 0,\tag{4}$$

где R, p – коэффициенты реакции крепи.

Вблизи забоя уголь находится в неупругом состоянии, и напряжения имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= -\gamma H(ax/h + c), \tau_{xy} = 0, \quad x_1 < x < x_2, \quad y = 0 \\ \sigma_y &= -\gamma H(-ax/h + c), \tau_{xy} = 0, \quad x_{-2} < x < x_{-1}, \quad y = 0 \end{aligned}, \quad (5)$$

где $a = k / \gamma H, c = k / \gamma H(\pi h / 2 - x_1)$;

k – прочность угля при сдвиге.

За пределами зоны опорного давления угольный пласт считается недеформируемым.

$$\begin{aligned} v = h, \tau_{xy} &= 0, \quad x > x_2, \quad y = 0; \\ v = h, \tau_{xy} &= 0, \quad x < x_{-2}, \quad y = 0 \end{aligned}. \quad (6)$$

Таким образом, граничные условия для компонент дополнительных напряжений запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_y^{(1)} &= \gamma H, \tau_{xy} = 0, \quad x_{-1} < x < x_a, \quad y = 0 \\ \sigma_y^{(1)} &= \gamma H, \tau_{xy} = 0, \quad x_b < x < x_1, \quad y = 0 \\ \sigma_y^{(1)} &= \gamma H - \gamma H(ax/h + c), \tau_{xy} = 0, \quad x_1 < x < x_2, \quad y = 0 \\ \sigma_y^{(1)} &= \gamma H - \gamma H(-ax/h + c), \tau_{xy} = 0, \quad x_{-2} < x < x_{-1}, \quad y = 0 \\ \sigma_y^{(1)} &= \gamma H - R + px, \tau_{xy} = 0, \quad x_a < x < x_b, \quad y = 0 \\ v = h, \tau_{xy} &= 0, \quad x > x_2, \quad y = 0 \\ v = h, \tau_{xy} &= 0, \quad x < x_{-2}, \quad y = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Длину перекрытия секции механизированной крепи обозначим l_1 , а расстояние от перекрытия до груди забоя – l_2 .

Координаты x_2 и x_{-2} заранее неизвестны и определяются в ходе решения задачи.

Известно, что для нахождения напряженно-деформированного состояния углепородного массива используются методы теории упругости [4]

В работах С. Г. Лехницкого [5] показано, что напряжения и перемещения в анизотропном массиве выражаются как функции обобщенных комплексных переменных:

$$z_j = x + \mu_j y$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(1)} &= 2 \operatorname{Re}(\mu_1^2 \Phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \Phi_2'(z_2)), \\ \sigma_y^{(1)} &= 2 \operatorname{Re}(\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)), \\ \tau_{xy}^{(1)} &= -2 \operatorname{Re}(\mu_1 \Phi_1(z_1) + \mu_2 \Phi_2(z_2)), \\ u &= 2 \operatorname{Re}(\rho_1 \Phi_1(z_1) + \rho_2 \Phi_2(z_2)) + u_0, \\ v &= 2 \operatorname{Re}(q_1 \Phi_1'(z_1) + q_2 \Phi_2'(z_2)) + v_0, \\ z_1 &= x + \mu_1 y; \quad z_2 = x + \mu_2 y \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \beta_{11} \mu_1^2 + \beta_{12} - \beta_{16} \mu_1, & q_1 &= \beta_{12} \mu_1 + \beta_{22} / \mu_1 - \beta_{26} \\ \rho_2 &= \beta_{11} \mu_2^2 + \beta_{12} - \beta_{16} \mu_2, & q_2 &= \beta_{12} \mu_2 + \beta_{22} / \mu_2 - \beta_{26} \end{aligned}$$

Обобщенные комплексные потенциалы определяются из граничных условий.

Комплексные потенциалы $\Phi_1'(z_1)$ и $\Phi_2'(z_2)$, выраженные через $F(z)$:

$$\Phi_1'(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \frac{F(z_1)}{\gamma H}; \quad \Phi_2'(z_2) = \frac{\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} \frac{F(z_2)}{\gamma H} \tag{9}$$

удовлетворяют граничным условиям на касательные напряжения.

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

$$F(\infty) = 0. \tag{10}$$

Таким образом, задача сводится к нахождению функции по граничным условиям.

При решении задачи используется метод интегралов Коши для полуплоскости. Поле напряжений находится по формуле Келдыша-Седова [6]. В данном случае она имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{F(z_j)}{\gamma H} = & \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi i \sqrt{(z_j - x_2)(z_j - x_{-2})}} \int_{x_2}^{x_2} \frac{\sqrt{(t - x_2)(t - x_{-2})}}{2(t - z_j)} dt + \\ & - \frac{1}{\pi i \sqrt{(z_j - x_2)(z_j - x_{-2})}} \int_{x_2}^{x_1} \frac{\sqrt{(t - x_2)(t - x_{-2})}(c - at)}{t - z_j} dt - \\ & - \frac{1}{\pi i \sqrt{(z_j - x_2)(z_j - x_{-2})}} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{(t - x_2)(t - x_{-2})}(c + at)}{t - z_j} dt + \\ & + \frac{1}{\pi i \sqrt{(z_j - x_2)(z_j - x_{-2})}} \int_{x_a}^{x_b} \frac{\sqrt{(t - x_2)(t - x_{-2})}(pt - R)}{t - z_j} dt \end{aligned} \quad (11)$$

$$v(b_k) - v(a_k) = 2 \int_{a_k}^{b_k} \operatorname{Re}(q_1 \Phi'_1(x) + q_2 \Phi'_2(x)) dx. \quad (12)$$

Для нахождения x_{-2} и x_2 составим систему трансцендентных алгебраических уравнений. Удовлетворим условию (10) локальности влияния выработки. Для этого разложим функцию в степенной ряд Лорана:

$$F(z) = f_0 + \frac{f_1}{z} + \frac{f_2}{z^2} + \dots \quad (13)$$

Тогда условие (10) переписывается в виде:

$$f_0 = 0. \quad (14)$$

Также необходимо удовлетворить граничным условиям (6) и (7) для перемещений. Уравнение переписывается в виде

$$v \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=0}} - v \Big|_{\substack{x=x_{-2} \\ y=0}} = 0. \quad (15)$$

Решив систему уравнений (14) и (15), найдем координаты границ зон пластических деформаций.

Условие смыкания пород кровли и почвы имеет вид:

$$v^+(x_0) = v^-(x_0) = 0. \quad (16)$$

Численные исследования проводились для таких условий: глубина залегания $H = 1000$ м, мощность пласта $2h = 1$ м. Вмещающие породы считаются анизотропными. В качестве боковых

пород взят песчанистый сланец: модули Юнга $E_1 = 3 \cdot 10^5$ Па, $E_2 = 7 \cdot 10^5$ Па, модули сдвига $G_1 = G_2 = 2 \cdot 10^5$ Па, прочность $\sigma_{\text{раст}} = 1,2 \cdot 10^7$ Па, $\sigma_{\text{сж}} = 9 \cdot 10^7$ Па. Реакция крепи в точке x_b равнялась $0,04 \gamma H$, коэффициент $p = 78$ кПа/м.

Результаты решения представлены на графиках вертикальных напряжений (рис. 2, 4) и горизонтальных напряжения (рис. 3, 5) при $x_1 = 5$ и $x_1 = 32$, соответственно.

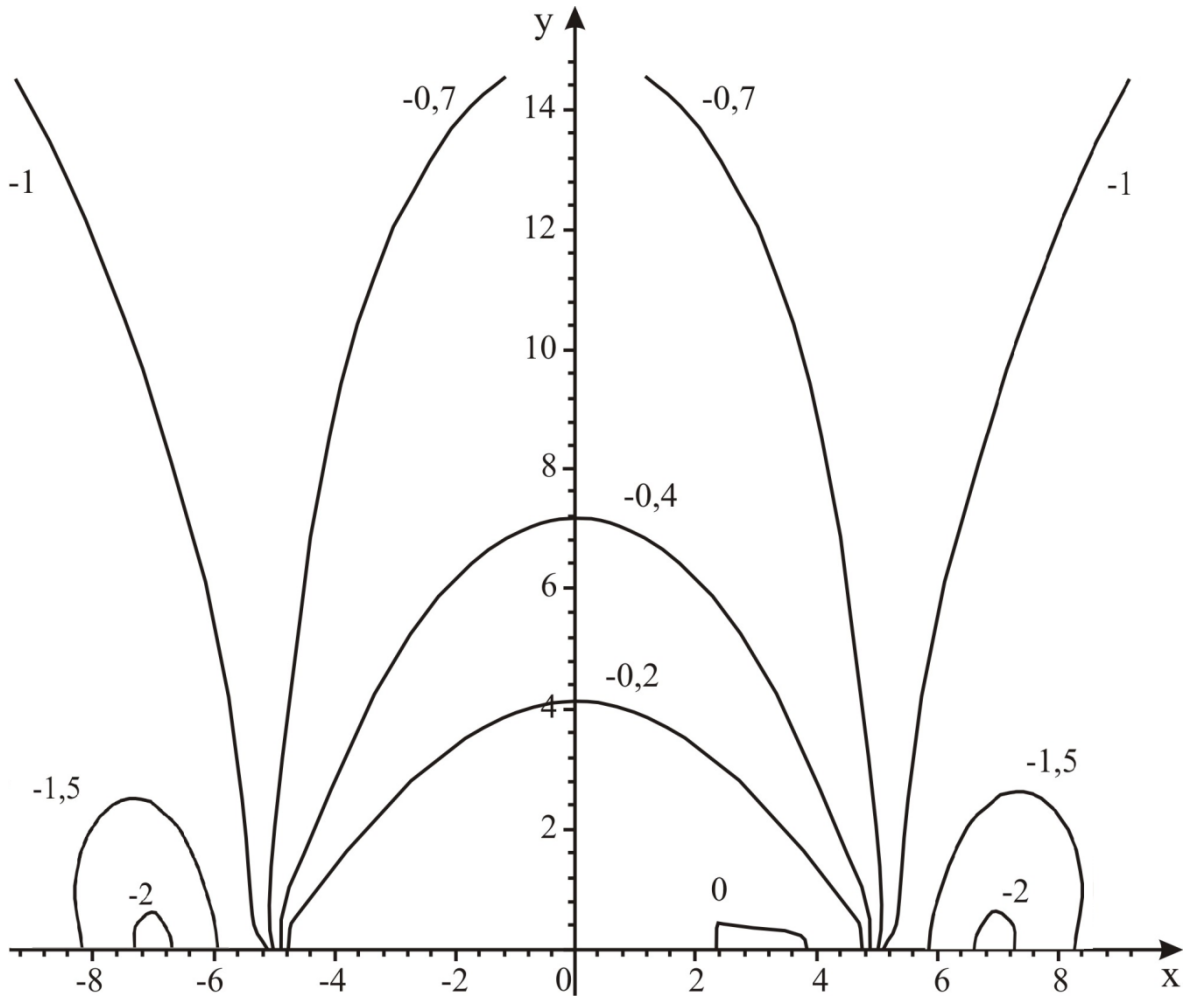


Рис. 2. Вертикальные напряжения при $x_1 = 5$

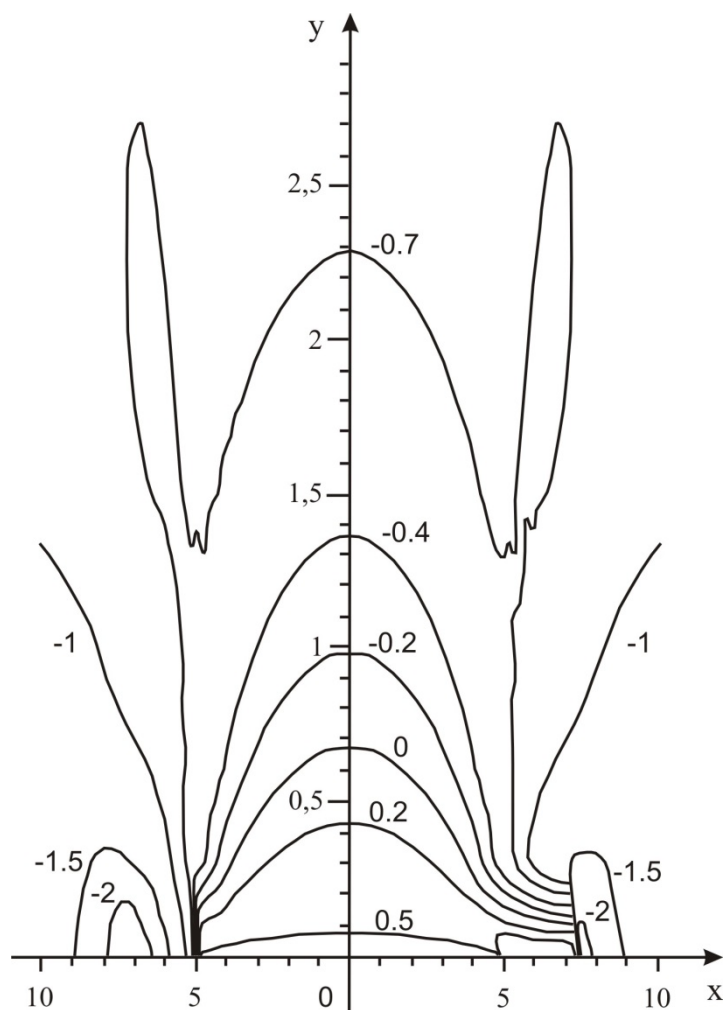


Рис. 3. Горизонтальные напряжения при $x_1 = 5$

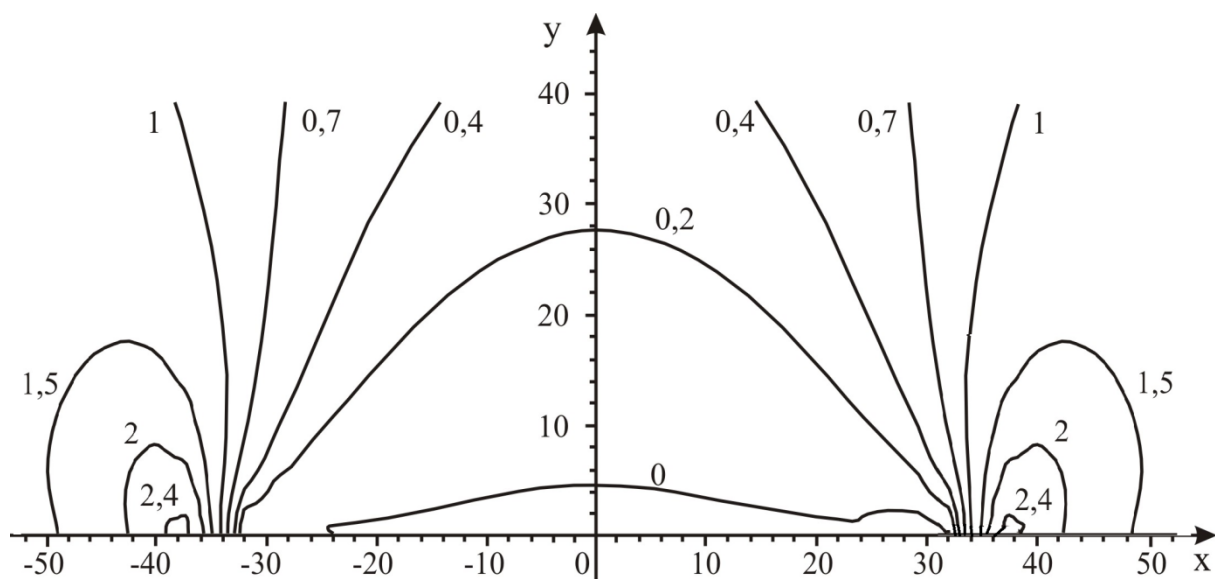


Рис. 4. Вертикальные напряжения при $x_1 = 32$

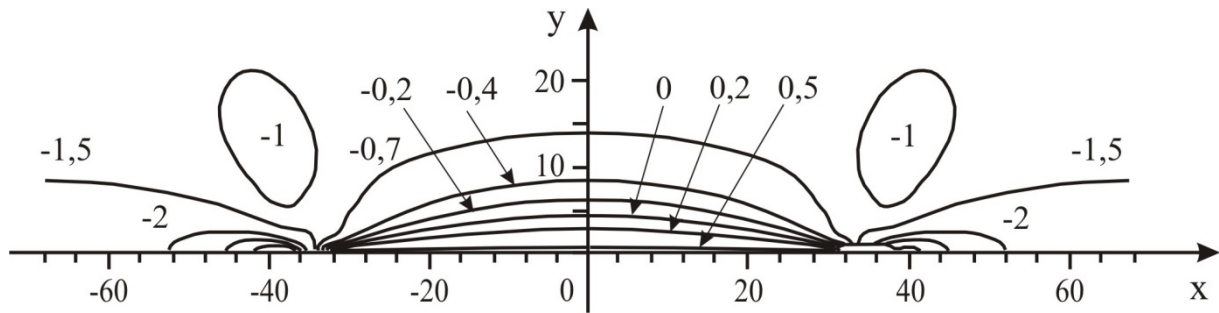


Рис. 5. Горизонтальные напряжения при $x_1 = 32$

Присутствие крепи приводит к перераспределению напряжений и изменению длины пластической зоны. Длина пролета пород до первичной посадки лавы при наличии крепи незначительно возрастает.

На рисунке 6 представлены результаты расчётов при отсутствии и наличии механизированной крепи в очистном забое.

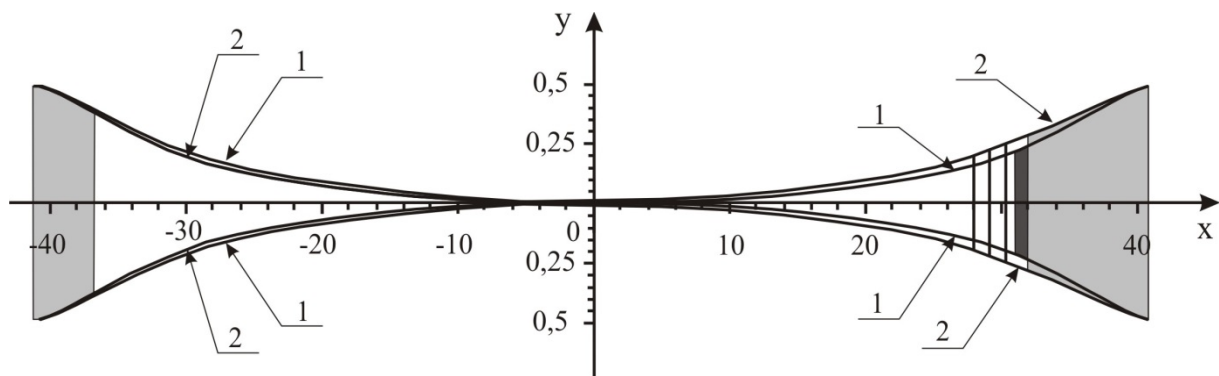


Рис. 6. Конвергенция пород при отсутствии (1) и при наличии (2) крепи

Анализ полученных результатов указывает на то, что в кровлю и почву пласта на расстоянии 5–10 м в обе стороны распространяется зона растягивающих горизонтальных напряжений. Так как песчаный сланец обладает выраженной анизотропией, то горизонтальные деформации, возникающие в породах кровли вблизи выработки, могут превысить предел прочности, что приведет к вывалам пород [7].

Таким образом, получено решение, позволяющее с учетом свойств вмещающих пород и технологии ведения очистных работ, разрабатывать рекомендации для управления кровлей с це-

лью снижения негативного проявления горного давления: вывалов породы в призабойное пространство и посадки на жесткую секций механизированной крепи. Это позволит сократить или исключить нерегламентированные простои очистного забоя в процессе крепления и управления кровлей.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Антипов И. В., Турбор И. А. Применение МГУА для формализации производственных процессов и операций в очистных забоях. // Техничко-економические проблемы горного производства, вып. 15. — 2012 — С. 152—168.
2. Динник А. Н., Моргаевский А. Б., Савин Г. Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок // Труды совещания по управлению горным давлением. — Л.–М., 1938.
3. Левшин А. А., Мануйленко Р. И. Напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород. // Теоретическая и прикладная механика, вып. 27, — 1997 — С. 81—86.
4. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М. : Наука, 712 с.
5. С. Г. Лехницкий. Теория упругости анизотропного тела. — М. : Наука, 1977 — 416 с.
6. Н. И. Мусхелишвили. Сингулярные интегральные уравнения. М. : Наука, 1969 — 512 с.
7. Ершов Л. В., Либерман И. Б., Нейман Л. К. Механика горных пород. — М. : Недра, 1987. — 192 с.