

Геннадий СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, Александр ТОЛКАЧЕВ<sup>2</sup>,  
Олег МОРОЗ<sup>3</sup>, Ярослав ЛЯШОК<sup>4</sup>, Сергей ГРЕБЕНКИН<sup>5</sup>,  
Андрей КАСЬЯНЕНКО<sup>6</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

### *Аннотация*

Предложен алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных разностей

### *Summary*

Here represented the algorithm of rock-massive constrainedly-deformed state parameters by method of final diversities

Развитие глубоких шахт Донбасса во многом зависит от эффективной работы современных высокопроизводительных механизированных комплексов и устойчивости подготовительных выработок,

---

<sup>1</sup> Доцент, к.т.н. Соловьев Г.И. – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

<sup>2</sup> Доцент Толкачев А.Ф. – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

<sup>3</sup> Профессор, к.т.н. Мороз О.К. – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

<sup>4</sup> Доцент, к.т.н. Ляшок Я.О. – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

<sup>5</sup> Профессор, д.т.н. Гребенкин С.С. – Донецкая национальный университет управления, г. Донецк, Украина

<sup>6</sup> Бакалавр Касьяненко А.С. – Донецкая национальный технический университет, г. Донецк, Украина

*Соловьёв Г.И. Определение параметров напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных разностей/ Г. И. Соловьёв, А. Ф. Толкачёв, О. К. Мороз, Я. А. Ляшок, С. С. Гребёнкин, А. Л. Касьяненко // XIII Szkola geotechniki: материалы международной конференции. – Гливице-Устронь, 2008. – С. 215-221.*

поддерживаемых в зоне влияния очистных работ. Существующие способы поддержания и охраны выемочных выработок [1-3] недостаточно эффективны и не получили широкого распространения.

При подготовке 4-й западной лавы пласта  $m_3$  шахты им. Е.Т.Абакумова ПО «Донецкуголь» в качестве основного варианта нарезки выемочного поля была принята схема, при которой в средней части поля между выработанными пространствами 4-й и ранее отработанной 5-й западных лав образовывался продольный треугольный целик угля (рис. 1). Опыт охраны вентиляционного штрека 6-й западной лавы пласта  $m_3$  треугольным угольным целиком (рис. 1) показал, что смещения боковых пород на контуре вентштрека на участке влияния целика в 3-4 раза превышали технологическую податливость арочной крепи и выработку невозможно было эксплуатировать без перекрепления на сопряжении с очистным забоем.

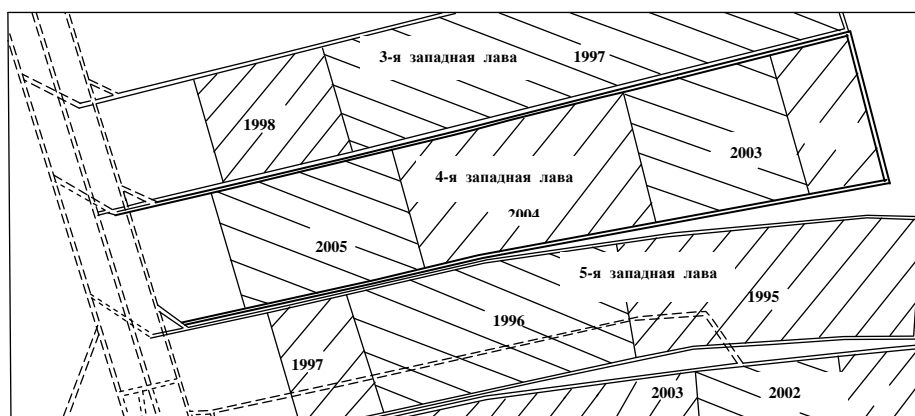


Рис. 1. Схема горных выработок 4-й западной лавы пласта  $m_3$  шахты им. Е.Т.Абакумова ПО «Донецкуголь»

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния боковых пород в окрестности конвейерного штрека были выполнены аналитические исследования с использованием метода конечных разностей [4,5], сущность которого заключается в замене исходного дифференциального уравнения его конечно-разностным аналогом,

разбиении исследуемого тела на конечное число узлов, составлении уравнений для этих узлов и решении системы алгебраических уравнений.

Для решения задачи рассмотрим основную кровлю при отработке 4-й западной лавы пласта  $m_3$ , представленную прочными песчаниками мощностью 18 - 20 м, как защемленную с трех сторон выработанного пространства плиту.

Размер выработанного пространства в плане при длине лавы  $a = 220$  м меняются поэтапно от 100 до 600 м через каждые 100 м. С трех сторон плита считается защемленной, а слева опирается на целик переменной ширины (от 53 м в начале до 0 в конце выработки). В связи с этим граничные условия на левом контуре плиты считаем переменными (в начале плиты угол поворота и прогиб равны нулю, в конце также изгибающий момент и прогиб равны нулю).

Расчет пластин сводится к решению бигармонического уравнения [6]:

$$\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W_i}{\partial y^4} = \frac{q_i}{D} \quad (1)$$

где:  $W$  – прогиб пород основной кровли, представляющей собой плиту;  
 $q$  – интенсивность распределенной нагрузки;

$D$  - цилиндрическая жесткость плиты,  $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)}$ ;

$E$  и  $\nu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала плиты;  
 $\delta$  - толщина плиты.

Для выражения производных через значения функции в отдельных узлах воспользуемся разложением в ряд Тейлора [7]:

$$W_{x-2h} = W_x - 2h \frac{dW_x}{dx} + \frac{(2h)^2}{2!} * \frac{d^2W_x}{dx^2} - \frac{(2h)^3}{3!} * \frac{d^3W_x}{dx^3} + \frac{(2h)^4}{4!} * \frac{d^4W_x}{dx^4} - \dots (2)$$

$$W_{x-h} = W_x - h \frac{dW_x}{dx} + \frac{h^2}{2!} * \frac{d^2W_x}{dx^2} - \frac{h^3}{3!} * \frac{d^3W_x}{dx^3} + \frac{h^4}{4!} * \frac{d^4W_x}{dx^4} - \dots (3)$$

$$W_{x+h} = W_x + hW_x' + \frac{h^2}{2!} W_x'' + \frac{h^3}{3!} W_x''' + \frac{h^4}{4!} W_x^{IV} + \frac{h^5}{5!} W_x^V + \dots (4)$$

$$W_{x+2h} = W_x + 2hW_x' + \frac{(2h)^2}{2!} W_x'' + \frac{(2h)^3}{3!} W_x''' + \frac{(2h)^4}{4!} W_x^{IV} + \frac{(2h)^5}{5!} W_x^V + \dots (5)$$

Здесь  $+h$  и  $-h$  – шаг разбиения (шаг сетки, рис.2). Из (3) и (4) можно получить выражение для первой производной:

$$\frac{dW_x}{dx} = \frac{1}{2h_x}(-W_{x-h} + W_{x+h}) - \frac{h^2}{3!} * \frac{d^3W}{dx^3} - \dots \quad (6)$$

Исключая из рядов (2), (3) и (4) вторые и третьи производные, получим более точные выражения для первой производной:

$$\frac{dW_x}{dx} = \frac{1}{6hx}(-2W_{x-h} - 3W_x + 6W_{x+h} - W_{x+2h}) + \frac{h^3}{12} * \frac{d^4W_x}{dx^4} + \dots \quad (7)$$

Аналогично из рядов (2), (3) и (4) получим:

$$\frac{dW_x}{dx} = \frac{1}{6h_x}(W_{x-2h} - 6W_{x-h} + 3W_x + 2W_{x+h}) - \frac{h^3}{12} * \frac{d^4W_x}{dx^4} + \dots \quad (8)$$

Из рядов (3) и (4) получим вторую производную :

$$\frac{d^2W_x}{dx^2} = \frac{1}{h^2_x}(W_{x-h} - 2W_x + W_{x+h}) - \frac{h_x^2}{12} * \frac{d^4W_x}{dx^4} - \dots \quad (9)$$

$$\frac{d^2W_y}{dy^2} = \frac{1}{h^2_y}(W_{y-h} - 2W_y + W_{y+h}) - \frac{h_y^2}{12} * \frac{d^4W_y}{dy^4} - \dots \quad (10)$$

Из рядов (2), (5) третью и четвертую производные:

$$\frac{d^3W_x}{dx^3} = \frac{1}{2h^3_x}(-W_{x-2h} + 2W_{x-h} - 2W_{x+h} + W_{x+2h}) - \frac{h_x^2}{4} * \frac{d^5W_x}{dx^5} - \dots \quad (11)$$

$$\frac{d^4W_x}{dx^4} = \frac{1}{h^4_x}(W_{x-2h} - 4W_{x-h} + 6W_x - 4W_{x+h} + W_{x+2h}) - \frac{h_x^2}{6} * \frac{d^6W_x}{dx^6} - \dots \quad (12)$$

$$\frac{d^4W_y}{dy^4} = \frac{1}{h^4_y}(W_{y-2h} - 4W_{y-h} + 6W_y - 4W_{y+h} + W_{y+2h}) - \frac{h_y^2}{6} * \frac{d^6W_y}{dy^6} - \dots \quad (13)$$

При прямоугольной сетке (рис. 2) с шагами  $h_x$  и  $h_y$  получим четвертую смешанную производную [8]:

$$\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right) \quad (14)$$

Используя выражения (8) и (9) получим:

$$\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[ \frac{1}{h_x^2} * (W_k - 2W_i + W_e) - \frac{hx^2}{12} * \frac{\partial^4 W_i}{\partial x^4} \right]$$

или

$$\frac{\partial^4 W_i}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{1}{h_x^2 h_y^2} [4W_i - 2(W_k + W_l + W_m + W_n) + (W_o + W_p + W_q + W_r)] \quad (15)$$

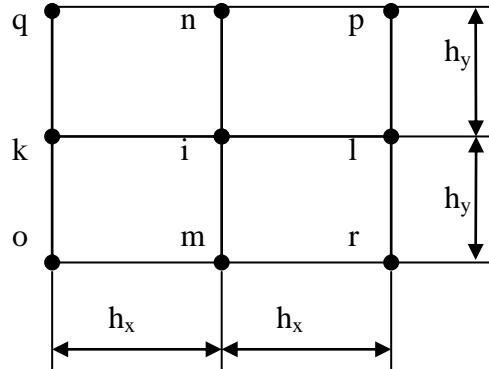


Рис. 2 Обозначение узлов прямоугольной сетки

Подставим в дифференциальное уравнение (15) производные (12), (13), (14) и получим конечно-разностный оператор этого уравнения (рис. 2), обозначив  $\alpha = \frac{h_x}{h_y}$ .

$$\left[ 6 \left( \frac{1}{\alpha^2} + \alpha^2 \right) + 8 \right] W_i - 4 \left( \frac{1}{\alpha^2} + 1 \right) (W_k + W_l) - 4 (\alpha^2 + 1) (W_m + W_n) + 2 (W_o + W_p + W_q + W_r) + \frac{1}{\alpha^2} (W_s + W_t) + \alpha^2 (W_u + W_v) = \frac{q_i h_x^2 h_y^2}{D} = \bar{q} \quad (16)$$

Используя для определения угла формулу первой производной (8), а для изгибающих моментов формулы вторых производных (9) и (10) получим:

$$W_{x-h} = (3W_{x+h} - 0.5W_{x+2h} + \frac{\alpha^2}{8} \bar{q}) (1 - \frac{y_i}{l}) + [-W_{x+h} + \frac{(\alpha^2 + \nu)}{24} \bar{q}] \frac{y_i}{l} = W_{x+h} (3 - \frac{4y_i}{l}) - 0.5 (1 - \frac{y_i}{l}) W_{x+2h} + \frac{\bar{q}}{24} [3\alpha^2 - (2\alpha^2 - \nu) \frac{y_i}{l}] \quad (17)$$

где  $\alpha = \frac{h_x}{h_y}$  - отношение шагов сетки по горизонтали и по вертикали,  $\bar{q} = \frac{qh_x^2 h_y^2}{D}$ ;

$\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\nu = 0,2$ ;

$y$  – координата длины выработанного пространства,  $y_i$  изменяется от 0 до  $l = 600$  м через каждые 50 м (т.е. через  $h_y = 50$  м).

На защемленных сторонах пластины угол поворота и прогиб равны нулю, т.е.  $W_i = 0$ , а угол поворота по формуле (7) дает следующие условия:

$$\text{- на нижней кромке: } W_{y-h} = 3W_{y+h} - 0.5W_{y+2h} + \frac{\bar{q}}{8\alpha^2} \quad (18)$$

$$\text{- на верхней кромке: } W_{y+h} = 3W_{y-h} - 0.5W_{y-2h} + \frac{\bar{q}}{8\alpha^2} \quad (19)$$

$$\text{- на правой кромке } W_{x+h} = 3W_{x-h} - 0.5W_{x-2h} + \frac{\alpha^2 \bar{q}}{8} \quad (20)$$

Решая уравнение (16) для внутренних узлов сетки с учетом условий (18-20), получим только прогибы плиты. Для определения изгибающих моментов воспользуемся выражением:

$$M_i \Big|_x = -D \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right) \quad (21)$$

с учетом формул (9) и (10) выражение (21) можно записать в виде:

$$M_i \Big|_x = -D \left[ \frac{W_k - 2W_i + W_l}{h_x^2} - \frac{qh_x^2}{24D} + D \left( \frac{W_m - 2W_i + W_n}{h_y^2} - \frac{qhy^2}{24D} \right) \right], \quad \text{или} \quad (22)$$

$$M_i \Big|_x = -\frac{D}{h_x^2} \left[ -2(1 + \nu\alpha^2)W_i + W_k + W_l + \nu\alpha^2(W_m + W_n) - \frac{\alpha^2 + \nu}{24} \bar{q} \right]$$

где по-прежнему  $\alpha = \frac{h_x}{h_y}$ ,  $\bar{q} = \frac{qh_x^2 \cdot h_y^2}{D}$

Аналогично получим:

$$M_i \Big|_y = -D \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right) \quad (23)$$

или подставив в (23) выражения (9 и (10):

$$M_i \Big|_y = -\frac{D}{h_y^2} \left[ -2 \left( 1 + \frac{\nu}{\alpha^2} \right) W_i + W_m + W_n + \frac{\nu}{\alpha^2} (W_k + W_l) - \left( \frac{1}{\alpha^2} + \nu \right) \frac{\bar{q}}{24} \right] \quad (24)$$

После определения изгибающих моментов можно определить нормальные напряжения:

$$\sigma_x = + - \frac{M_x}{W_z}, \quad \sigma_y = + - \frac{M_y}{W_z} \quad (25)$$

где  $W_z$  - момент сопротивления, ( так как моменты – погонные)

$$W_z = \frac{l \cdot \delta^2}{6} \quad (26)$$

$\delta$  - толщина плиты.

Плита кровли с размерами в плане: длина лавы -  $a = 220$  м (вдоль оси  $x$ ) и длина выработанного пространства  $b = 600$  м (вдоль оси  $y$ ), толщина плиты  $\delta = 20$  м. Для песчаника модуль упругости  $E = (3.3 - 4.4) \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2 - 0,25$ ,

$\sigma_6^{сж} = -(60 - 120)$  МПа,  $\sigma_6^{раст} = (4 - 6)$  МПа, объемный вес  $\gamma = (2,1 - 2,8)$  т/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим плиту кровли при поэтапной выемке угля ( $h_x = 55$  м,  $h_4 = 50$  м,  $\alpha = 1,1$ )

**Этап:** длина лавы -  $a = 220$  м, длина выработанного пространства -  $b_1 = 100$  м. В этом случае:

$$W_I = W_{II} = W_{III} = W_{IV} = W_A = W_B = W_C = W_K = W_L = W_4 = W_5 = W_6 = 0,$$

При  $y_i = y_l = h_y = 50$  м по формуле (24) находим:

$$W_{37} = (3W_1 - 0,5W_2 + \frac{1,1^2}{8} \bar{q}) \left( 1 - \frac{50}{600} \right) + \left( -W_1 + \frac{1,1^2 + 0,2}{24} \bar{q} \right) \frac{50}{600}, \text{ т.е.}$$

$$W_{37} = 2, (6)W_1 - 0,458(3)W_2 + 0,143541(6) \bar{q} \quad (27)$$

По формулам (18-20) получим:

$$W_{34} = 3W_1 + 0,103305785 \bar{q}; \quad W_{35} = 3W_2 + 0,103305785 \bar{q};$$

$$W_{36} = 3W_3 + 0,103305785 \bar{q}; \quad (28)$$

$$W_7 = 3W_1 + 0,103305785\bar{q}; W_8 = 3W_2 + 0,103305785\bar{q};$$

$$W_9 = 3W_3 + 0,103305785\bar{q} \quad (29)$$

$$W_{38} = -0,5W_2 + 3W_3 + 0,15125\bar{q}. \quad (30)$$

С учетом выражения (16) оставим уравнения для  $i$ -ой точки при  $\alpha^2 = 1,1^2 = 1,21$ :

$$20,2186776 W_i - 7,305785124(W_k + W_l) - 8,84(W_m + W_n) + 2(W_o + W_p + W_q + W_r) +$$

$$+ 0,82644628(W_s + W_t) + 1,21(W_u + W_v) = \bar{q} \quad (31)$$

Составляя это уравнение для точек 1, 2, и 3 условий (27 – 30), получим систему трех уравнений, решение которой можно записать как:

$$W_1 = 0,031811341\bar{q}; W_2 = 0,044085053\bar{q}; W_3 = 0,03134394\bar{q};$$

$$W_{37} = 0,206975963\bar{q}; W_{38} = 0,223239293\bar{q}; W_8 = W_{35} = 0,235560944\bar{q}.$$

Изгибающие моменты определяются по формулам (22-24):

$$M_2 \Big|_x = 0,105102 \frac{\bar{q} D}{h_x^2} = 0,105102 q h_y^2 = 0,105102 q \frac{a^2}{16\alpha^2} = 0,0054288 q a^2;$$

$$M_2 \Big|_y = 0,135073382 \frac{\bar{q} D}{h_y^2} = 0,135073382 q h_x^2 = 0,008442086 q a^2;$$

$$M_I \Big|_x = -0,00929945 q a^2; M_{II} \Big|_x = -0,010115352 q a^2;$$

$$M_B \Big|_y = M_S \Big|_y = -0,014804837 q a^2.$$

Напряжения (при  $W_z = \frac{\delta^2}{6} = \frac{20^2}{6} = 66,6(6) \text{ м}^2$ ), если

$$q = \gamma H = 2,8 * 10 * 700 = 19600 \frac{\text{КН}}{\text{м}^2} \text{ и } a = 220 \text{ м, то}$$

$$\sigma_2 \Big|_x = \frac{M_x}{W_z} = \frac{0,0054288 * 19600 * 10^3 * 220^2}{66,6(6)} = 77,23 * 10^6 \text{ Па} = 77,23 \text{ МПа.}$$

**II этап:** длина лавы –  $a = 220$  м, длина выработанного пространства  $b_B = 200$  м. В этом случае при граничных условиях:

$$W_L = W_A = W_B = W_C = W_K = W_I = W_{II} = W_{III} = W_{IV} = W_V = W_{VI} = W_{VII} = W_{10} = W_{11} = W_{12} = W_{VIII} = 0$$



Решение системы уравнений второго этапа можно представить в виде:

$$W_1 = 0,129392397\bar{q}; W_2 = 0,197037217\bar{q}; W_3 = 0,124697047\bar{q}; W_4 = 0,212524866\bar{q}$$

$$W_5 = 0,32163347\bar{q} = 0,00103833\frac{qa^4}{D}; W_6 = 0,202590826\bar{q}; W_7 = 0,132638444\bar{q};$$

$$W_8 = 0,198164908\bar{q}; W_9 = 0,124936794\bar{q}; W_{14} = 0,526983774\bar{q}; W_{35} = 0,533600701\bar{q}$$

$$W_{39} = 0,497710741\bar{q}; W_{40} = 0,598205743\bar{q};;$$

Изгибающие моменты находим по формулам (22-24):

$$M_5 \Big|_x = -\frac{D}{h_x^2} \left[ -2,484W_5 + W_4 + W_6 + 0,242(W_2 + W_8) - 0,058759\bar{q} \right] = 0,017920qa^2$$

$$M_5 \Big|_y = -\frac{D}{h_y^2} \left[ -2,3305785W_5 + W_2 + W_8 + 0,165289(W_4 + W_6) - 0,0427686\bar{q} \right] = 0,020534qa^2$$

$$M_{III} \Big|_x = -0,033651qa^2, M_{IV} \Big|_x = -0,038329qa^2, M_B \Big|_y = -0,042992qa^2,$$

$$M_{11} \Big|_y = -0,043274qa^2.$$

Аналогичным образом определены прогибы для остальных этапов расчета и их результаты сведены в таблицы 1-4.

Таблица 1. Значение прогибов кровли над выработанным пространством лавы при поэтапном его удлинении

$W_i$ / q	1 этап $b_1=100м$	2 этап $b_2=200м$	3 этап $b_3=300м$	4 этап $b_4=400$ м	5 этап $b_5=500м$	6 этап $b_6=600м$
$W_1$	0,032	0,13	0,169	0,173	0,173	0,173
$W_2$	0,0441	0,197	0,27	0,277	0,277	0,277
$W_3$	0,0313	0,125	0,16	0,163	0,163	0,162
$W_4$	-	0,213	0,356	0,381	0,382	0,381
$W_5$	-	0,322	0,56	0,605	0,608	0,607
$W_6$	-	0,203	0,33	0,351	0,351	0,350
$W_7$	-	0,133	0,431	0,512	0,521	0,521
$W_8$	-	0,2	0,67	0,686	0,821	0,821
$W_9$	-	0,125	0,393	0,46	0,465	0,464
$W_{10}$	-	-	0,373	0,57	0,606	0,609
$W_{11}$	-	-	0,57	0,88	0,937	0,941
$W_{12}$	-	-	0,333	0,50	0,521	0,521
$W_{13}$	-	-	0,183	0,554	0,657	0,672

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО...

W <sub>14</sub>	-	-	0,274	0,833	0,992	1,014
W <sub>15</sub>	-	-	0,161	0,47	0,544	0,552
W <sub>16</sub>	-	-	-	0,438	0,676	0,727
W <sub>17</sub>	-	-	-	0,642	0,992	1,066
W <sub>18</sub>	-	-	-	0,363	0,542	0,572
W <sub>19</sub>	-	-	-	0,207	0,636	0,773
W <sub>20</sub>	-	-	-	0,297	0,636	1,10
W <sub>21</sub>	-	-	-	0,169	0,909	0,585
W <sub>22</sub>	-	-	-	-	0,495	0,794
W <sub>23</sub>	-	-	-	-	0,688	1,10
W <sub>24</sub>	-	-	-	-	0,231	0,579
W <sub>25</sub>	-	-	-	-	0,131	0,751
W <sub>26</sub>	-	-	-	-	0,314	1,0
W <sub>27</sub>	-	-	-	-	0,174	0,531

Таблица 2. Прогибы кровли вдоль конвейерного штрэка

№ замерн. точки	Значения прогибов кровли по расчетным точкам в выработанном пространстве:										
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31
Расст., м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Прогиб $\bar{W}_i/q$	0,032	0,213	0,133	0,570	0,554	0,676	0,636	0,495	0,231	0,50	0,272

Таблица 3. Прогибы кровли по центру лавы

№ замерн. точки	Значения прогибов кровли по расчетным точкам в выработанном пространстве:										
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31
Расст., м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Прогиб $\bar{W}_i/q$	0,044	0,322	0,198	0,568	0,274	0,642	0,297	0,688	0,314	0,760	0,343

Таблица 4. Прогибы кровли вдоль вентиляционного штрэка

№ замерн. точки	Значения прогибов кровли по расчетным точкам в выработанном пространстве:										
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31
Расст., м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Прогиб $\bar{W}_i/q$	0,0313	0,203	0,125	0,333	0,161	0,363	0,169	0,231	0,174	0,404	0,183

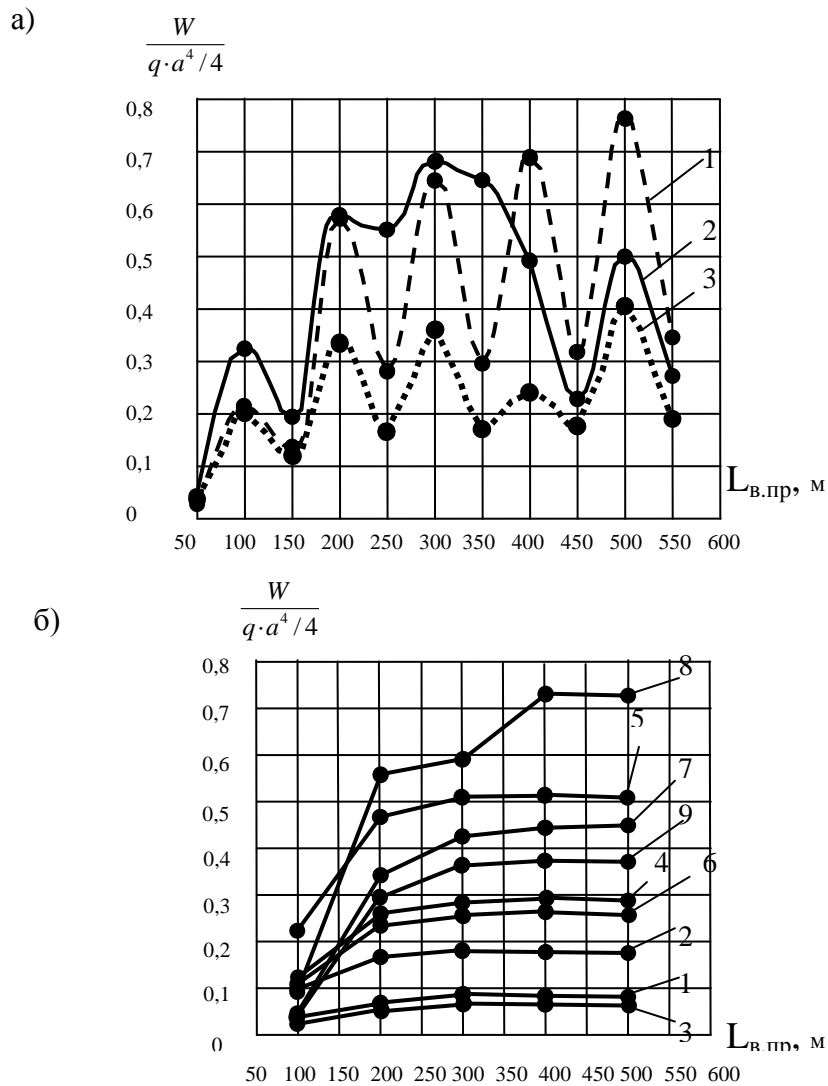


Рис. 4 Изменение прогиба кровли 4-й западной лавы пласта  $m_3$  шахты им. Абакумова: а) по длине выработанного пространства - 1 – вдоль вентиляционного штрека; 2 – по средней линии лавы; 3 – вдоль конвейерного штрека на участке его охраны треугольным целиком угля; б) в замерных точках выработанного пространства (1-9)

Таким образом, в результате решения поставленной задачи разработан алгоритм, позволяющий определять величины смещений и изгибающих моментов пород основной кровли, представляющей собой защемленную по контуру выработанного пространства плиту.

Как видно из представленных графиков на рис. 4а, смещения пород основной кровли вдоль подготовительных выработок и по средней линии лавы весьма неравномерны по длине выработанного пространства. При увеличении длины выработанного пространства смещения пород кровли, рассчитанные на 9 точкам (рис. 4б), возрастают достаточно равномерно, причем, наибольшая их величина получена для средней точки №8.

Разработанный алгоритм можно использовать для уточнения параметров способов поддержания и выемочных выработок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушко В.Т., Широков А.З. Механика горных пород и охрана горных выработок. К.: Наукова думка, 1967. – 153 с.
2. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок. К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.
3. Соловьев Г.И. Особенности физической модели самоорганизации боковых пород на контуре выемочной выработки при продольно-жестком усилении арочной крепи // Науковий вісник НГУ, Дніпропетровськ. 2006, №1. С.11-18.
4. Соловьев Г.И. Определение параметров напряженно-деформированного состояния горного массива в окрестности выемочной выработки методом конечных разностей // Изв. высш. уч. завед.Новочеркасск, 2006 г. Прилож. 9. С.13-22.
5. Справочник по теории упругости (для инженеров-строителей). Под ред. П.М.Варвака и А.Ф.Рябова. Будівельник, 1971. – 420 с.
6. С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. «Пластины и оболочки. М.: Наука. -1966.
7. Н.Н. Воробьев. Теория рядов. М.: Наука.-1979.
8. Сальвадори М. Д.. Численные методы в технике. М.: Иностранная литература. 1955. – 436 с.