

УДК 622.834.1

Доктор техн. наук ГАВРИЛЕНКО Ю. Н., канд. техн. наук. ПЕТРУШИН А. Г.,  
инж. МАЛАНЧУК Е. О. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

## **СКАШИВАНИЕ И СКРУЧИВАНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ЛАВАМИ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ И ПРИ ПОДРАБОТКЕ РАЗРЫВОВ**

### **Введение**

Существующие методики прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности при разработке угольных месторождений [1] имеют ряд существенных недостатков и довольно узкую область применения. Это обусловлено прежде всего тем, что они базируются на решение плоских главных сечений толщи, а остальная часть мульды сдвижения уже экстраполируется по результатам этого предрасчета. Это в свою очередь делает невозможным учет формы и ориентации выработанного пространства, изменения величины вынимаемой мощности по площади выработки, влияния подрабатываемых разрывных нарушений произвольно ориентированных относительно выработки и т.д.

Современные методы на базе пространственных математических моделей дают возможность исследовать любую совокупность влияющих факторов, причем обеспечивается быстрый результат и повторяемость эксперимента [7, 8]. Однако при этом существует проблема анализа получаемых результатов и их сравнения со «стандартными» условиями при изучении мульды сдвижения от выработок неправильной формы и при подработке диагональных разрывных нарушений. Использование для целей анализа главных или параллельных им сечений мало информативно. Поэтому необходимо использовать такие параметры сдвижения, которые характеризовали бы, во-первых, всю мульду сдвижения, а, во-вторых, были бы независимыми от направления. К таким параметрам можно отнести скашивание и скручивание земной поверхности [5, 6], которые иногда называют «площадными» деформациями.

В научной литературе по вопросам сдвижения земной поверхности отсутствует описание характера распределения указанных видов деформаций. Поэтому в рамках данной работы решались следующие задачи:

- детально рассмотреть сущность деформаций скашивания и скручивания, а также их влияние на подрабатываемые сооружения;
- разработать математический аппарат и программные средства для вычисления скашивания и скручивания земной поверхности по результатам решения пространственных задач сдвижения методом конечных элементов (МКЭ);
- исследовать закономерности распределения скашивания и скручивания для горизонтальной выработки правильной формы;
- изучить особенности распределения скашивания и скручивания в мульде сдвижения от выработки неправильной формы;
- исследовать особенности распределения скашивания и скручивания при подработке разрывных тектонических нарушений.

### **Скашивания и скручивания земной поверхности; их влияние на подрабатываемые объекты**

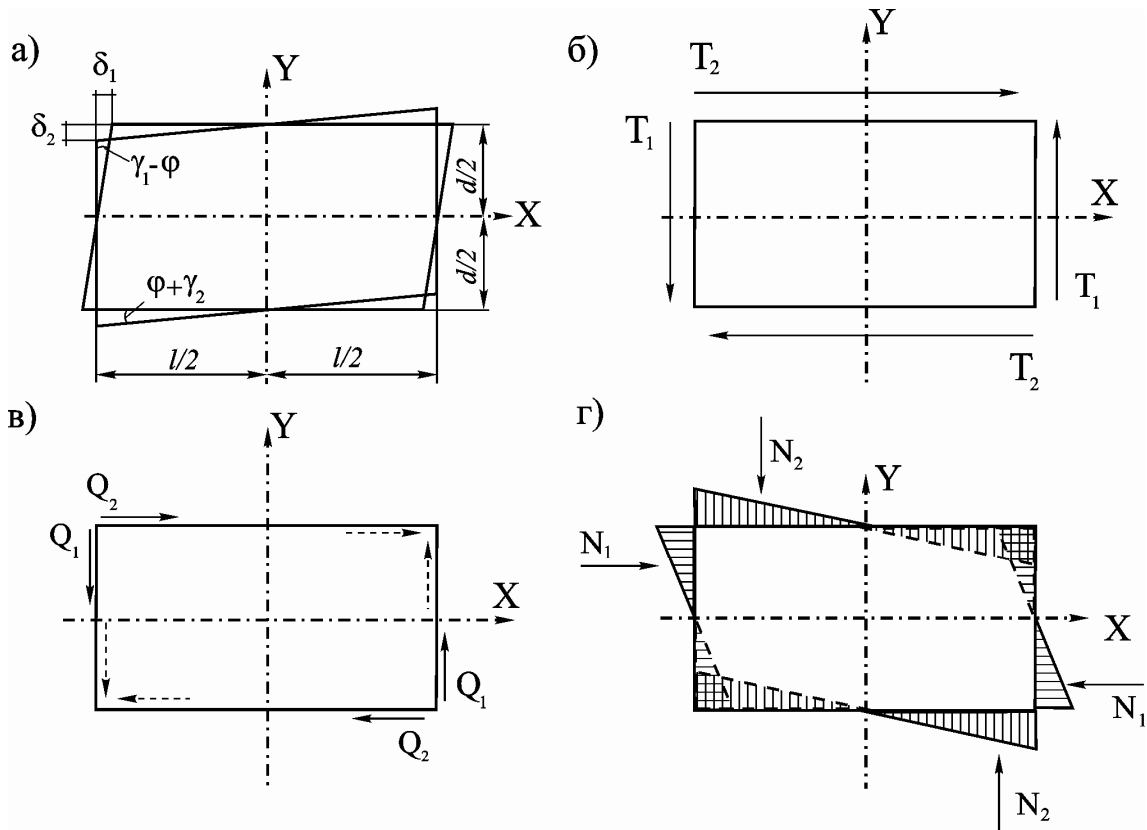
Скашивания и скручивания земной поверхности вводятся для характеристики деформаций по площади и являются интегральной характеристикой горизонтальных сдвижений и наклонов соответственно.

Скашивание земной поверхности идентично понятию сдвига в теории деформаций. Под **скашиванием** земной поверхности понимают изменение прямых, до деформирования углов элементарных квадратов земной поверхности. Его определяют по формуле [5, 6]:

$$\gamma_{xy} = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\partial \xi_x}{\partial y} + \frac{\partial \xi_y}{\partial x} \quad (1)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – перекосы относительно оси OY и оси OX соответственно,  
 $\partial \xi_x, \partial \xi_y$  – горизонтальные сдвиги точек земной поверхности в направлении оси OX и оси OY соответственно, если данные оси направлены по простиранию и по падению пласта.

Согласно работе [5] в результате скашивания земной поверхности здание развернется в горизонтальной плоскости на некоторый угол  $\varphi$  (рис. 1, а). При этом на него будут оказываться дополнительные воздействия, вызванные силами трения по подошве фундаментов T (рис. 1, б), силами трения по боковым поверхностям фундаментов Q (рис. 1, в) и силами бокового давления грунта N (рис. 1, г). На рис.1 показаны силы трения по боковым поверхностям фундаментов и эпюры сил бокового давления грунта для здания с подвалом. Для здания без подвала учитывают дополнительные силы трения по боковым поверхностям и силы бокового давления грунта, действующие внутри здания (они на рис.1 показаны пунктиром).



**Рис. 1.** Схема дополнительных сил, действующих на здание без внутренних стен при скашивании земной поверхности для здания с подвалом:

- а) перемещение грунта относительно фундамента здания;
- б) силы трения по подошве фундаментов;
- в) силы трения по боковым поверхностям фундаментов;
- г) эпюра сил бокового давления грунта.

В результате совместного действия дополнительных усилий здание повернется в горизонтальной плоскости относительно своего центра тяжести на угол  $\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq \gamma_{XY}$ ), определяемый из условия, что возникший суммарный перекашивающий момент ( $T+Q+N$ ) после поворота будет равен нулю. Величина дополнительных усилий, изгибающих здание в горизонтальной плоскости, существенно зависит не только от величин скашивания, но и от угла разворота здания  $\varphi$ . Вид эпюры обжатий и расслоений грунта сохранится и после поворота здания.

Согласно данным работы [5], дополнительные усилия для прямоугольного здания определяются по формулам:

➤ силы трения грунта по подошве фундаментов:

$$\begin{cases} T = a \cdot (q \cdot \operatorname{tg} \rho + b \cdot c) \cdot \frac{a \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)}{4 \cdot \Delta_{\text{ПР}}} \\ \Delta_{\text{ПР}} = 10^{-4} \cdot (35 + 12 \cdot q) \end{cases} \quad (2)$$

➤ силы бокового давления грунта:

$$N = \frac{a^2 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot h}{16 \cdot \left( \frac{h \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right)}{E_r} + \frac{f}{E_3} \right)} \quad (3)$$

➤ силы трения грунта по боковым поверхностям фундаментов:

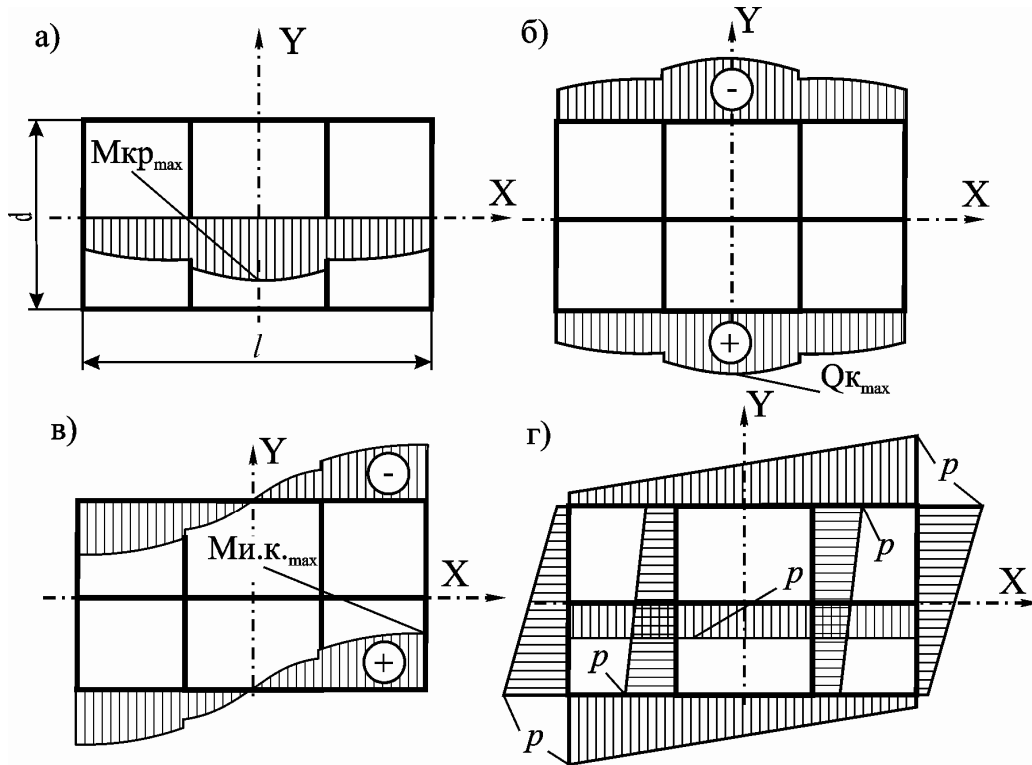
$$Q = \left( \frac{a \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot h}{\frac{h \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right)}{E_r} + \frac{f}{E_3}} \cdot \frac{1}{8} \cdot \operatorname{tg} \rho + c \right) \cdot \frac{a \cdot h}{2} \quad (4)$$

где  $q$  – погонная нагрузка по стороне здания;  
 $a$  – сторона здания;  
 $b$  – ширина фундамента;  
 $\rho, c$  – расчетные углы трения и сцепления грунта;  
 $\Delta_{\text{ПР}}$  – предельный сдвиг грунта по подошве фундаментов.  
 $h$  – величина заглубления фундаментов;  
 $f$  – средняя ширина пазух между фундаментом и стенкой котлована;  
 $E_r, E_3$  – модули боковой деформации грунта и засыпки.

Под **скручиванием** (углом закручивания) земной поверхности понимают разность наклонов двух параллельных линий, отнесенную к расстоянию между ними и определяют по формуле [5]:

$$S_{XY} = \frac{i_2 - i_1}{l} = \frac{\partial^2 \eta(x, y)}{\partial x \cdot \partial y} \quad (5)$$

где  $i_2, i_1$  – наклоны параллельных линий;  
 $l$  – расстояние между линиями (длина здания);  
 $\eta(x, y)$  – функция оседаний земной поверхности.



**Рис. 2** Схема распределения крутящих и изгибающих моментов и поперечных сил при скручивании здания по длине:

- а) эпюра крутящих моментов;
- б) эпюра поперечных сил при кручении;
- в) эпюра изгибающих моментов;
- г) эпюра отпора основания под фундаментами здания.

В результате скручивания земной поверхности на здание будут оказываться дополнительные воздействия, вызванные крутящим моментом  $M_{кр}$  (рис.2, а), изгибающим моментом при кручении  $M_{и.к}$  (рис.2, в), поперечной силой при кручении  $Q_k$  (рис.2, б) [5].

Эти усилия для прямоугольного здания определяются по следующим формулам [5]:

➤ крутящий момент:

$$M_{кр} = S_{XY} \cdot \left( \frac{1}{12} + \frac{1}{8} \cdot \frac{F_1}{F_2} \right) \cdot q_2 \cdot d \quad (6)$$

➤ изгибающий момент при кручении:

$$M_{и.к.} = S_{xy} \cdot \frac{1}{12} \cdot q \cdot l^2 \quad (7)$$

➤ поперечная сила при кручении:

$$Q_k = S_{xy} \cdot \frac{1}{8} \cdot q \cdot l \quad (8)$$

где  $F_1, F_2$  – площади фундаментов торцевых и продольных стен соответственно;  
 $q_2$  – погонная нагрузка по торцевой стене;  
 $d$  – длина торцевой стены.  
 $q$  – погонная нагрузка по стене в анализируемом направлении;  
 $l$  – длина стены в анализируемом направлении.

Анализ формул (2) – (8) позволяет заключить, что величины дополнительных усилий на здание, возникающие при скашивании и скручивании земной поверхности прямо пропорциональны величинам указанных деформаций.

### Вычисление скашивания и скручивания земной поверхности по результатам трехмерного математического моделирования

Пространственная математическая модель сдвижения на базе метода конечных элементов [2, 3] позволяет определить сдвижения в любой точке элемента и соответственно в любой точке подрабатываемого массива по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_x &= N_1 \cdot u_1 + \dots + N_8 \cdot u_8 \\ \xi_y &= N_1 \cdot v_1 + \dots + N_8 \cdot v_8 \\ \eta &= N_1 \cdot w_1 + \dots + N_8 \cdot w_8 \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\xi_x, \xi_y$  – горизонтальные сдвижения в направлении OX и OY;  
 $\eta$  – оседание (сдвижение в направлении оси OZ);  
 $N_i$  – функции формы  $i$ -ого узла конечного элемента;  
 $u_i, v_i, w_i$  – перемещения узловых точек элемента вдоль осей OX, OY, OZ соответственно.

Вертикальные и горизонтальные деформации являются функциями сдвижений и для земной поверхности определяются по следующим формулам [5, 6]:

$$\begin{aligned} i_y &= \frac{\partial \eta(x, y)}{\partial y} & i_x &= \frac{\partial \eta(x, y)}{\partial x} \\ k_x &= \frac{\partial^2 \eta(x, y)}{\partial x^2} & k_y &= \frac{\partial^2 \eta(x, y)}{\partial y^2} \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial \xi(x, y)}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial \xi(x, y)}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial x} & S_{xy} &= \frac{\partial^2 \eta(x, y)}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (10)$$

где  $i_x, i_y, k_x, k_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y$  – наклоны, кривизна и горизонтальные деформации в направлении соответствующих осей;  
 $\gamma_{xy}$  – скашивание;  
 $S_{xy}$  – скручивание.

С учетом формул (9) для расчета сдвижений и деформаций в любой точке моделируемого массива можно воспользоваться формулами:

$$\begin{aligned}
 \eta(x, y, z) &= N_1(x, y, z) \cdot w_1 + N_2(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N_8(x, y, z) \cdot w_8 \\
 i_x(x, y, z) &= N'_{1x}(x, y, z) \cdot w_1 + N'_{2x}(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N'_{8x}(x, y, z) \cdot w_8 \\
 i_y(x, y, z) &= N'_{1y}(x, y, z) \cdot w_1 + N'_{2y}(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N'_{8y}(x, y, z) \cdot w_8 \\
 k_x(x, y, z) &= N''_{1x}(x, y, z) \cdot w_1 + N''_{2x}(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N''_{8x}(x, y, z) \cdot w_8 \\
 k_y(x, y, z) &= N''_{1y}(x, y, z) \cdot w_1 + N''_{2y}(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N''_{8y}(x, y, z) \cdot w_8 \\
 S_{xy}(x, y, z) &= N''_{1xy}(x, y, z) \cdot w_1 + N''_{2xy}(x, y, z) \cdot w_2 + \dots + N''_{8xy}(x, y, z) \cdot w_8 \\
 \varepsilon_x(x, y, z) &= N'_{1x}(x, y, z) \cdot u_1 + N'_{2x}(x, y, z) \cdot u_2 + \dots + N'_{8x}(x, y, z) \cdot u_8 \\
 \varepsilon_y(x, y, z) &= N'_{1y}(x, y, z) \cdot v_1 + N'_{2y}(x, y, z) \cdot v_2 + \dots + N'_{8y}(x, y, z) \cdot v_8 \\
 \xi_x(x, y, z) &= N_1(x, y, z) \cdot u_1 + N_2(x, y, z) \cdot u_2 + \dots + N_8(x, y, z) \cdot u_8 \\
 \xi_y(x, y, z) &= N_1(x, y, z) \cdot v_1 + N_2(x, y, z) \cdot v_2 + \dots + N_8(x, y, z) \cdot v_8 \\
 \gamma_{xy}(x, y, z) &= N'_{1x}(x, y, z) \cdot v_1 + N'_{1y}(x, y, z) \cdot u_1 + \dots + N'_{8x}(x, y, z) \cdot v_8 + N'_{8y}(x, y, z) \cdot u_8
 \end{aligned} \tag{11}$$

где  $u_i, v_i, w_i$  – сдвижения в узловых точках из результатов расчета вдоль осей координат OX, OY, OZ соответственно;  
 $N'_{ix}, N'_{iy}$  – первая частная производная функций форм по осям координат OX и OY соответственно;  
 $N''_{ix}, N''_{iy}$  – вторая частная производная функций форм по осям координат OX и OY соответственно.

Таким образом, дифференцируя перемещения точек по координатам X, Y, Z (11), получаем деформации в пределах элемента. При этом производные функций формы по координатам X, Y, Z связаны с производными по координатам прообраза конечного элемента матрицей Якоби [2, 3, 7]:

$$[J] = \begin{bmatrix} X'_X & Y'_X & Z'_X \\ X'_Y & Y'_Y & Z'_Y \\ X'_Z & Y'_Z & Z'_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N'_{1\bar{X}} & N'_{2\bar{X}} & \dots & N'_{8\bar{X}} \\ N'_{1\bar{Y}} & N'_{2\bar{Y}} & \dots & N'_{8\bar{Y}} \\ N'_{1\bar{Z}} & N'_{2\bar{Z}} & \dots & N'_{8\bar{Z}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_8 & Y_8 & Z_8 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} N'_{ix} \\ N'_{iy} \\ N'_{iz} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} N'_{i\bar{X}} \\ N'_{i\bar{Y}} \\ N'_{i\bar{Z}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} N'_{i\bar{X}} &= \frac{1}{8} \cdot \bar{X}_i \cdot (1 + \bar{Y} \cdot \bar{Y}_i) \cdot (1 + \bar{Z} \cdot \bar{Z}_i) \\ N'_{i\bar{Y}} &= \frac{1}{8} \cdot \bar{Y}_i \cdot (1 + \bar{X} \cdot \bar{X}_i) \cdot (1 + \bar{Z} \cdot \bar{Z}_i) \\ N'_{i\bar{Z}} &= \frac{1}{8} \cdot \bar{Z}_i \cdot (1 + \bar{X} \cdot \bar{X}_i) \cdot (1 + \bar{Y} \cdot \bar{Y}_i) \end{aligned} \quad (14)$$

где  $[J]$  – матрица Якоби или якобиан;  
 $\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{Z}_i$  – координаты узловых точек в системе координат прообраза  $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ ;  
 $N'_{i\bar{X}}, N'_{i\bar{Y}}, N'_{i\bar{Z}}$  – частные производные функции формы  $i$ -ой точки по координатным осям прообраза  $\bar{O}\bar{X}, \bar{O}\bar{Y}, \bar{O}\bar{Z}$  соответственно.

Расчет с использованием формул (12)-(14) целесообразно применять в том случае, если координатная система прообраза и расчетной схемы развернуты друг относительно друга и исследуются сдвигения и деформации внутри элемента (например, на уровне фундамента и подвальных помещений). При изучении же мульды сдвигения земной поверхности расчет можно упростить, используя только узловые перемещения точек верхней грани расчетной схемы.

Согласно [2, 3, 4] для плоского четырехугольного элемента (рис. 3) функции формы, описывающие влияние его узлов имеют следующий вид:

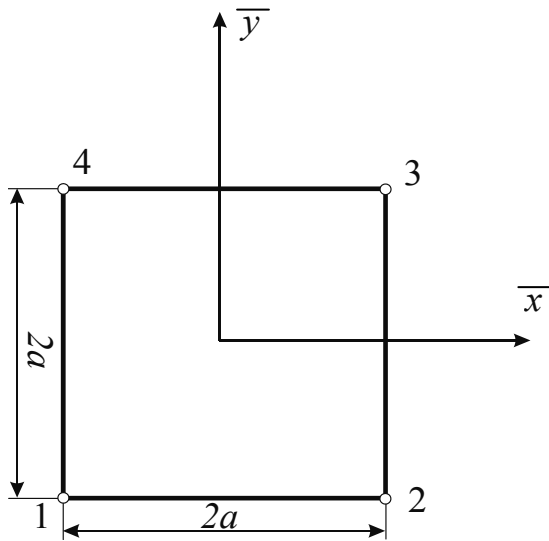


Рис. 3 Плоский четырехугольный элемент

$$N_i = \frac{1}{4 \cdot a^2} \cdot (a + (-1)^i \cdot \bar{X}) \cdot \left( a + (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}} \cdot \bar{Y} \right) \quad (15)$$

где  $a$  – половина длины стороны квадрата.

Тогда производные функций формы по координатам прообраза:

$$\begin{aligned} N'_{i\bar{X}} &= \frac{1}{4 \cdot a^2} \cdot \left( a \cdot (-1)^i + (-1)^i \cdot (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}} \cdot \bar{Y} \right) \\ N'_{i\bar{Y}} &= \frac{1}{4 \cdot a^2} \cdot \left( a \cdot (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}} + (-1)^i \cdot (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}} \cdot \bar{X} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$N''_{i\bar{X}\bar{Y}} = \frac{1}{4 \cdot a^2} \cdot (-1)^i \cdot (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}}$$

Следовательно, в центре элемента, для точки с координатами (0,0):

$$N'_{i\bar{X}} = \frac{(-1)^i}{4 \cdot a}; \quad N'_{i\bar{Y}} = \frac{(-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}}}{4 \cdot a}; \quad N''_{i\bar{X}\bar{Y}} = \frac{1}{4 \cdot a^2} \cdot (-1)^i \cdot (-1)^{\text{int}\frac{i+1}{2}} \quad (17)$$

Зная координаты узловых точек верхней поверхности трехмерного элемента в системе координат расчетной схемы до начала процесса деформирования, можно определить его площадь и вычислить размер стороны эквивалентного квадрата:

$$P_{кв} = 0.5 \sum_{i=1}^4 x_i (y_{i-1} - y_{i+1}) , \text{ тогда } a = \frac{\sqrt{P_{кв}}}{2} \quad (18)$$

Таким образом, формулы (15)–(18) позволяют существенно уменьшить объем вычислений при расчете сдвижений и деформаций, а получаемые результаты совпадают со строгим расчетом по методу Якоби в пределах допустимых погрешностей.

### **Распределение скашивания и скручивания земной поверхности при очистной выработке прямоугольной формы**

В литературных источниках, посвященных вопросам теории сдвижения горных пород и земной поверхности, не описывается характер распределения деформаций скашивания и скручивания в мульде сдвижения очистной выработки. Поэтому целесообразно в начале рассмотреть общую картину распределения этих деформаций для некоторых «стандартных» условий отработки. На рис. 4 представлены изолинии деформаций скашивания и скручивания, полученные по описанной выше методике, для модели, реализующей следующие горно-геологических условий:

- горизонтально залегающий угольный пласт мощностью 1 м;
- средняя глубина горных работ 200 м, что вызвано необходимостью получить при реальных размерах очистной выработки, величины деформаций, обеспечивающие наглядность;
- размеры очистной выработки в плане 200×400 м;
- наносы мощностью 40 м;

Анализ данных (рис. 4) позволяет выделить следующие общие закономерности:

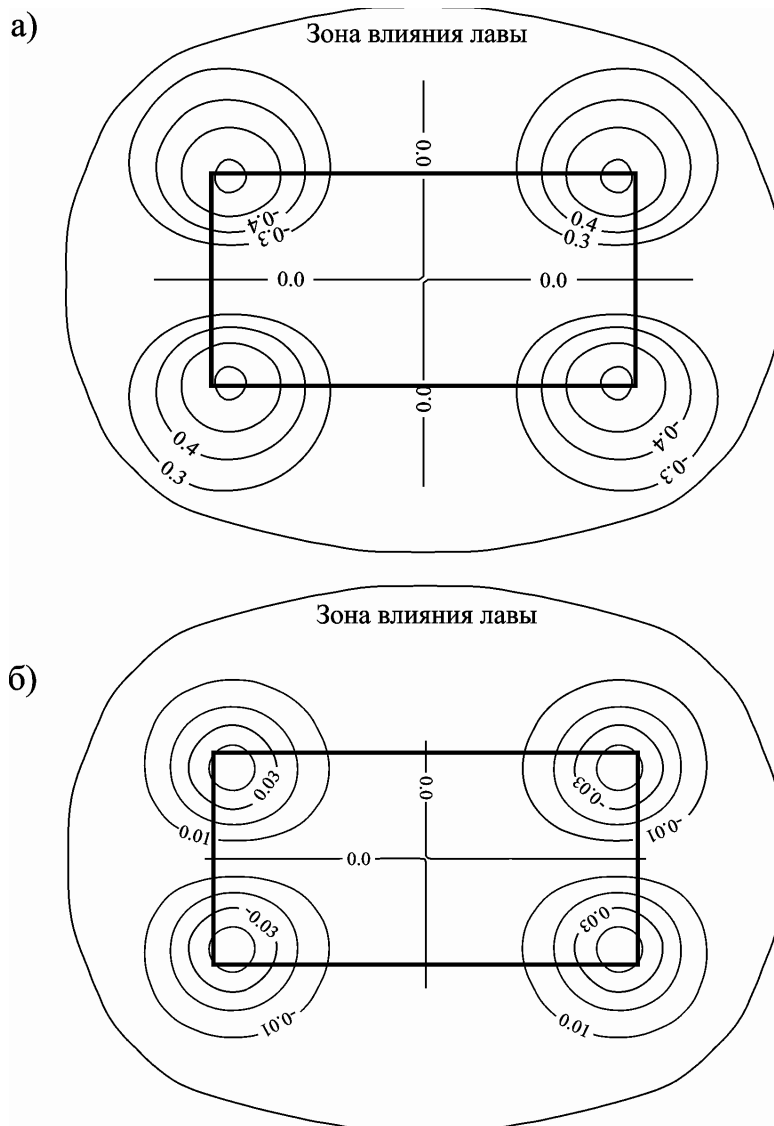
- характер распределения скашивания и скручивания аналогичен;
- наблюдается четыре экстремума деформаций: два отрицательных и два положительных, расположенные над углами проекции выработанного пространства на земную поверхность;
- изолинии деформаций вокруг экстремумов имеют форму близкую к окружности;
- абсолютные значения экстремумов равны, а знаки совпадают для диагонально противоположных вершин;
- по главным сечениям мульды сдвижения проходят изолинии с нулевыми значениями деформаций;
- максимальные значения скашивания примерно равны максимуму горизонтальных деформаций, а скручивания – половине максимальной кривизны, что соответствует положениям; изложенным в работе [5].

### **Распределение скашивания и скручивания земной поверхности от очистной выработки неправильной формы**

Для аналогичных горно-геологических условий было отработано более 30 моделей с различной формой выработанного пространства. Глубина горных работ изменялась от 200 до 400 м. Форма выработки принималась в виде клина, и с постепенно изменяющимся размером. На рис. 5 и рис. 6 приведены изолинии скашивания и скручивания для ряда выработок неправильной формы .

Анализ данных, представленных на этих рисунках, позволяет сделать вывод о том, что форма выработки изменяет только качественную картину распределения деформаций скашивания и скручивания, но мало влияет на величины экстремумов.





**Рис. 4** Изолинии распределения деформаций скашивания (а) и скручивания (б) земной поверхности при «стандартных» условиях подработки.

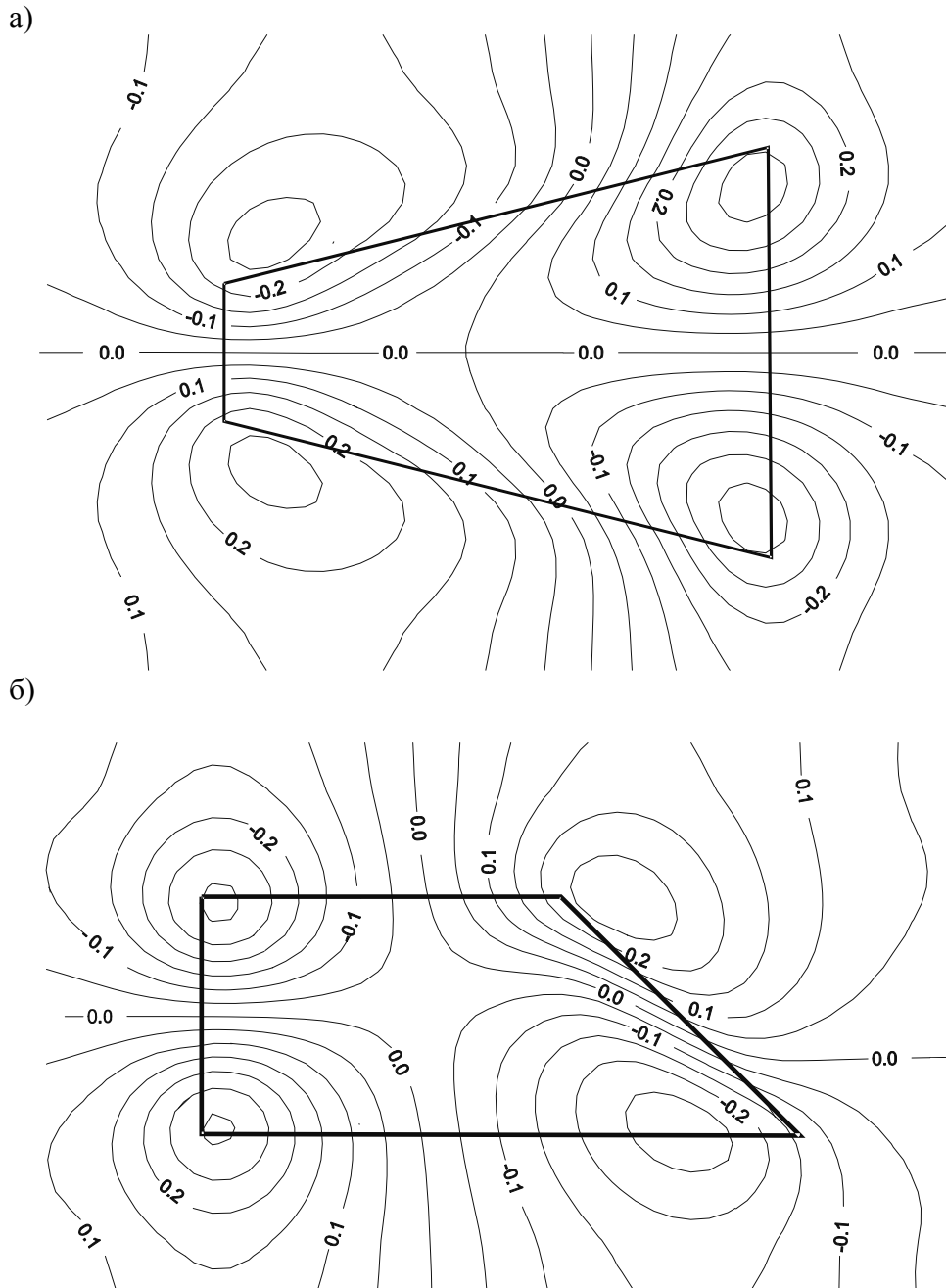
Наибольшему влиянию подвергаются деформации скручивания (рис. 5), что объясняется перемещением точки перегиба кривой оседания в сечениях, пересекающих скошенную сторону выработки. В прямых углах очистных выработок форма распределения деформаций скручивания практически не подвергается изменениям, по сравнению со «стандартным» вариантом, представленным, на рис. 4. Если же сторона выработки примыкает к углам выработки, которые отличаются от  $90^\circ$ , то форма изолиний деформаций вокруг экстремумов изменяется – они вытягиваются вдоль скошенных сторон очистной выработки и принимают эллиптическую форму.

При нестандартной форме очистной выработки изолинии скашивания также приобретают эллиптическую форму, вытягиваясь вдоль длинной диагонали выработки и сжимаясь в направлении короткой диагонали (рис. 6).

Характерно, что местоположение максимальных значений деформаций скашивания и скручивания смещается в сторону не прямых углов выработки. Величина перемещения зависит от величины отклонения угла выработки от  $90^\circ$ .

С точки зрения защиты подрабатываемых зданий и сооружений неправильная форма выработанного пространства менее благоприятна, так как увеличивается площадь земной

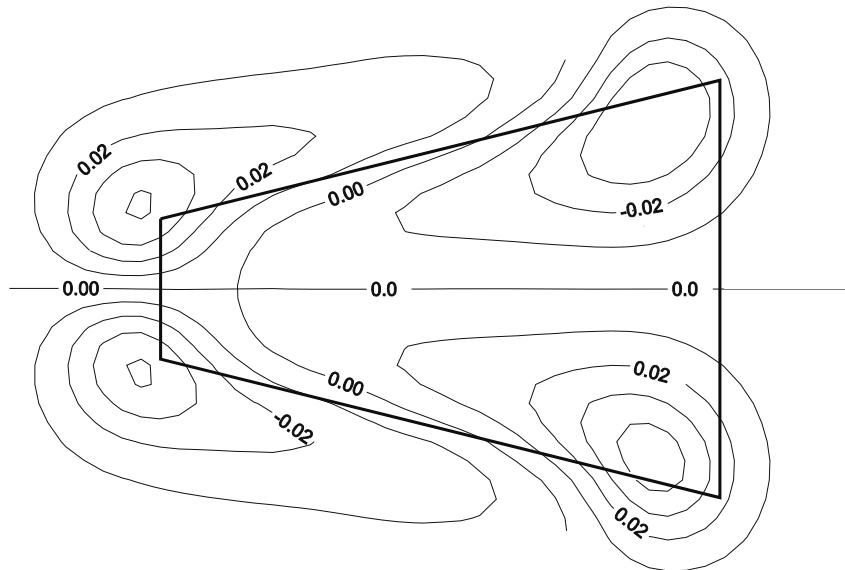
поверхности подверженной деформациям с относительно большими значениями скашивания и скручивания, по сравнению с прямоугольной конфигурацией, и смещаются линии нулевых деформаций.



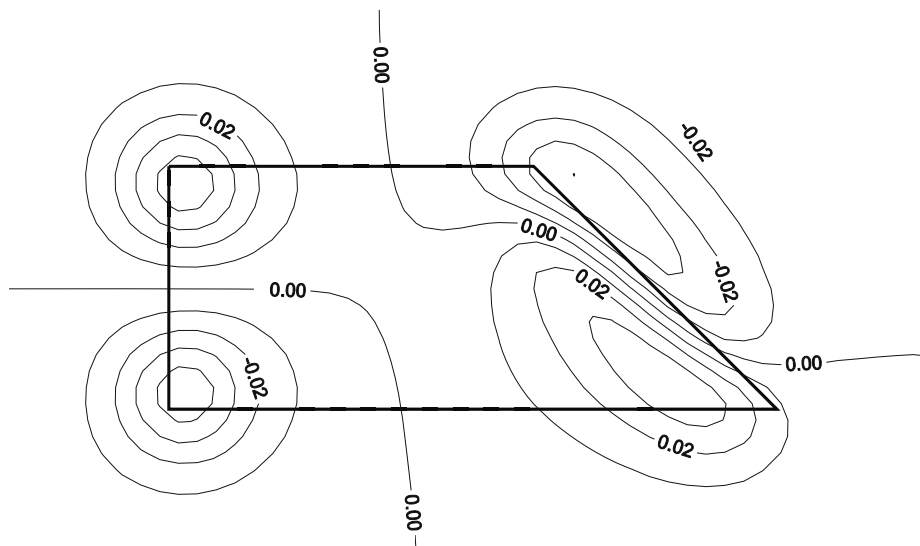
**Рис. 5** Распределение деформаций скашивания вызванных выработками равномерно расширяющейся (сужающейся) (а) и клинообразной (б) формы.

Анализ данных, представленных на рис. 5 и рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что форма выработки изменяет только качественную картину распределения деформаций скашивания и скручивания, но мало влияет на величины экстремумов. Наибольшему влиянию подвергаются деформации скручивания, что объясняется перемещением точки перегиба кривой оседания вдоль направления выработки с разными длинами сторон. В прямых углах очистных выработок форма распределения деформаций практически не подвергается изменениям, по сравнению со «стандартным» вариантом, представленным, на рис. 4.

а)



б)



**Рис. 6** Распределение деформаций скручивания вызванных выработками равномерно расширяющейся (сужающейся) (а) и клинообразной (б) формы.

С точки зрения защиты подрабатываемых зданий и сооружений неправильная форма выработанного пространства менее благоприятна, так как увеличивается площадь земной поверхности подверженной деформациям с относительно большими значениями скашивания и скручивания, по сравнению с прямоугольной конфигурацией выработки.

### **Скашивание и скручивание земной поверхности при подработке разрывных тектонических нарушений**

Для исследований деформаций скашивания и скручивания земной поверхности при подработке разрывных тектонических нарушений было отработано и проанализировано около 120 пространственных моделей. Углы падения нарушения изменялись в диапазоне от  $30^\circ$  до  $80^\circ$ , нормальная мощность нарушенной зоны от 10 до 50 м, угол разворота простираения дизъюнктива относительно направления горных работ в диапазоне от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (через  $5^\circ - 10^\circ$ ). Тектоническое нарушение представлялось как несогласно залегающий с углепородным массивом слой, направление осей анизотропии которого расположено вдоль и

поперек нарушения, а деформационные (прочностные) характеристики принимались на порядок ниже вмещающего массива.

Результаты моделирования показали, что распределение деформаций скашивания и скручивания существенным образом зависит от положения выхода нарушения в мульде сдвига, его ориентировки относительно направления ведения горных работ, мощности и угла падения нарушенной зоны. При этом изменяется как качественная, так и количественная картина. Подробный анализ распределения скашивания при подработке разрывов приведен в работах [9, 10]. В качестве примера на рис. 7 показаны изолинии деформаций при подработке слабодиагонального разрыва. Несмотря на широкое многообразие деформационных картин можно выделить общие закономерности.

Относительно скашивания следует отметить следующее:

- вдоль зоны нарушенных пород формируется область повышенных горизонтальных деформаций скашивания, изолинии экстремумов которой имеют форму вытянутого вдоль выхода нарушения эллипса;
- при подработке продольных (поперечных) и слабодиагональных нарушений зона повышенных деформаций имеет два экстремума, а при подработке диагонального нарушения – один;
- максимумы деформаций скашивания при подработке тектонического нарушения превышают ожидаемые для ненарушенного разрывом массива в 2÷6 раз.

Для скручивания можно выделить следующие особенности:

- вдоль зоны нарушенных пород формируется область концентрации вертикальных деформаций скручивания, изолинии экстремумов которой имеют кругообразную форму;
- максимумы деформаций скашивания при подработке тектонического нарушения могут превышать ожидаемые для ненарушенного разрывом массива в 1.3÷3 раза;
- продольные, поперечные и слабодиагональные нарушения незначительно изменяют качественную картину распределения, а диагональные формируют ряд экстремумов вдоль выхода нарушения под наносы.

## Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Дополнительные усилия в подрабатываемых зданиях и сооружениях прямо пропорциональны величинам скашивания и скручивания земной поверхности. В стандартных условиях при моноклиальном залегании пластов и очистных выработках прямоугольной формы максимумы деформаций скашивания равны максимумам горизонтальных деформаций, а скручивания – половине максимальной кривизны.
2. По результатам численного трехмерного моделирования процессов сдвига методом конечных элементов можно определить скашивания и скручивания земной поверхности и тем самым исследовать влияние разнообразных факторов, которые приводят к аномальному распределению деформаций в пределах зоны влияния выработки.
3. Разработан алгоритм вычисления скашивания и скручивания земной поверхности по трехмерным составляющим векторов сдвижений земной поверхности.
4. Впервые получены картины распределения площадных деформаций земной поверхности при стандартных условиях, при неправильной форме выработки и при подработке разрывов.

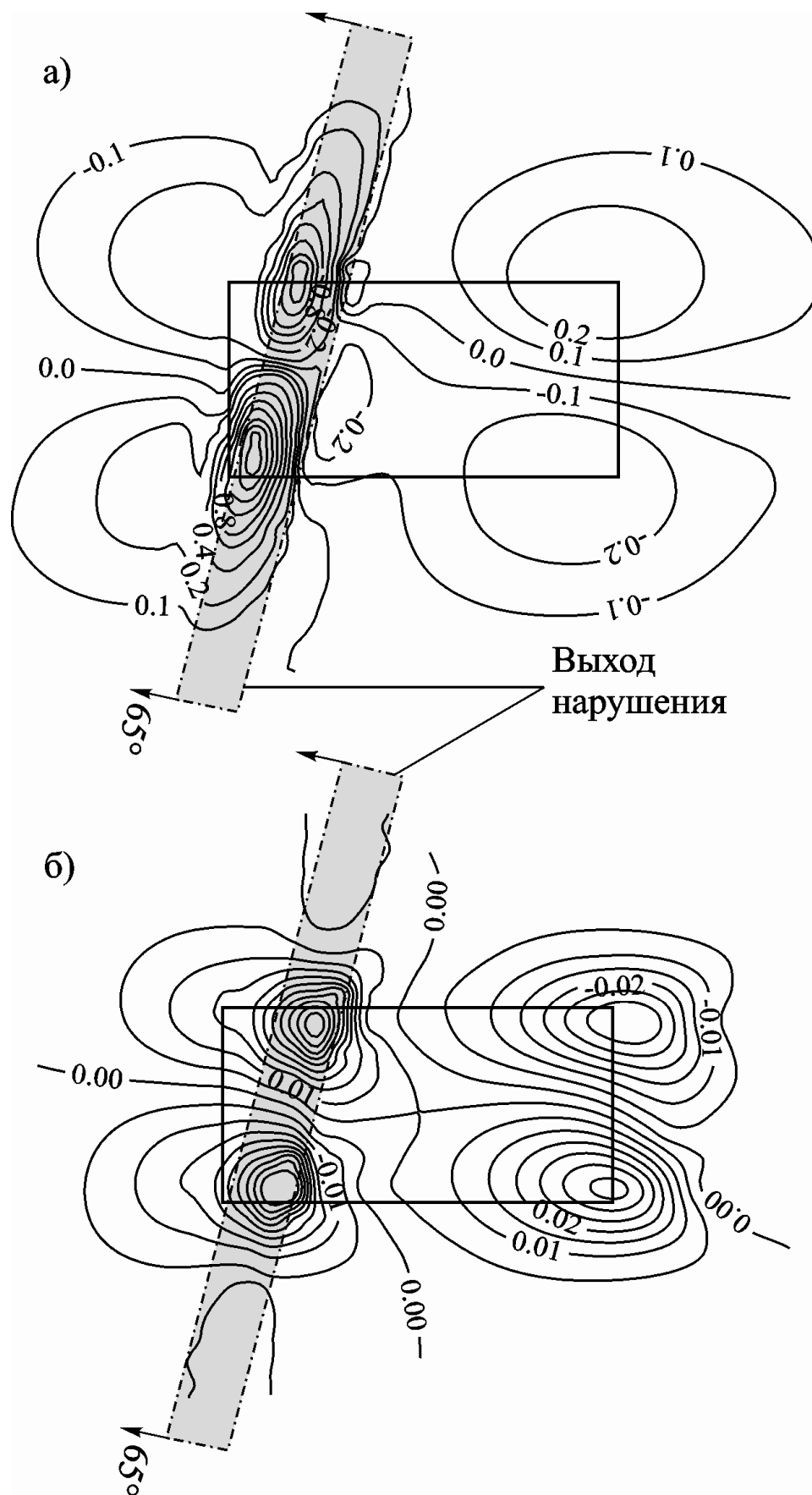


Рис. 7 Распределение деформаций скашивания (а) и скручивания (б) при подработке слабодиагонального разрыва (угол разворота от линии заборя 15°)

5. При стандартных условиях, характеризующихся горизонтальным залеганием пласта, правильной формой выработанного пространства, выделяется четыре зоны экстремальных значений скашивания и скручивания, которые расположены над углами проекции выработки на земную поверхность. Вдоль главных сечений деформации скашивания и скручивания равны нулю.
6. При подработке разрывов вдоль выхода зоны нарушенных пород под наносы формируется область повышенных деформаций скашивания и скручивания земной поверхности. При этом максимумы деформаций при подработке дизъюнктива могут превышать ожидаемые для ненарушенного массива в 2÷6 раз для скашивания и 1.3÷3 раза для скручивания.
7. Рассмотренная технология позволяет детально изучить влияние на деформации земной поверхности нестандартных условий ведения горных работ.

### Литература

1. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом/ Отраслевой стандарт Украины ГСТУ 101.00159226.001-2003 // К:Минтопэнерго, 2004. – 128 с.
2. **Амусин Б.З., Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра. – 1975. – С. 192.
3. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир. – 1975. – С. 539.
4. **Зенкевич О., Чанг И.** Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. – Москва: Недра. – 1974. – 239 с
5. Защита гражданских зданий от влияния подземных горных работ / **Муллер Р.А., Шаламут Л.Ш., Варлашкин В.М. и др.** . – М.: Недра, 1970. – 224 с.
6. Сдвигение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / **Акимов А.Г., Земисев В.Н., Канцельсон Н.Н. и др.** - М.: Недра, 1970.- 224с.
7. **Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г.** Численное моделирование процессов сдвигения массива горных пород и земной поверхности методом конечных элементов в объемной постановке // Физико-технические проблемы горного производства: Сб. науч. тр., выпуск 3. – Донецк: ООО “Лебедь”. – 2001. – С. 12 – 25.
8. **Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г.** Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-геологічна. Вип. 62. – Донецк: ДонНТУ. – 2003. – С. 100-114.
9. **Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г.** Скашивание земной поверхности при подработке разрывных тектонических нарушений пологими угольными пластами // Проблеми гірського тиску: Зб. наук. пр. №10. – Донецк: ДонНТУ. – 2003. – С. 5 – 21.
10. **Гавриленко Ю.Н., Петрушин А.Г.** Сдвигения и деформации земной поверхности при диагональной подработке разрывов пологими угольными пластами. // Сталій розвиток гірничо-металургійної промисловості. – Кривий Ріг, - 2004. – С. 18 – 23.

© Гавриленко Ю. Н., Петрушин А. Г., Маланчук Е. О. 2007