

УДК 622.281(574.32)

## Напряженное состояние массива вокруг выработок в зависимости от действующих главных горизонтальных напряжений

**В.Ф. ДЕМИН**, д.т.н., профессор кафедры РМПИ,  
**А.С. СМАГУЛОВА**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры ИС,  
**Т.В. ДЕМИНА**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры РМПИ,  
**Ю.Ю. СТЕФЛЮК**, магистрант специальности «Горное дело»,  
 Карагандинский государственный технический университет

**Ключевые слова:** анкерное крепление, напряженное состояние массива, пласт, дефектность эксплуатационных выработок, технологические условия, боковые породы, эмпирические зависимости, главные максимальные горизонтальные напряжения.

Для исследования влияния горно-технологических факторов на шахтах УД АО «АрселорМиттал Териштау» проведены наблюдения за 55 горными выработками на предмет их дефектности. Целью явилось установление влияния горно-технических факторов на устойчивость эксплуатационных выработок. В качестве влияющих факторов выбраны: мощность ( $m$ ) [м] и угол падения пласта ( $\alpha$ ) [°]; глубина разработки ( $H$ ) [м]; размер площади поперечного сечения в свету ( $S$ ) [м<sup>2</sup>]; угол проведения ( $\psi$ ) [°], форма сечения и вид крепления выработки. Результативными факторами являются главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  [МПа].

Обозначая главное напряжение  $\sigma$  и проектируя его на оси  $x, y, z$ , имеем

$$\begin{aligned} \sigma l &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n, \\ \sigma m &= \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \\ \sigma n &= \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n. \end{aligned} \quad (1)$$

Приравнивая к нулю определитель полученной системы уравнений

$$\begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - \sigma) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - \sigma) \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

получим кубическое уравнение

$$\sigma \times l - \sigma_x \times l - \tau_{yx} \times m - \tau_{zx} \times n = 0, \quad (3)$$

три корня которого и будут значениями трех главных напряжений в рассматриваемой точке. Одно из них будет алгебраически наибольшим для точки – обозначим его через  $\sigma_1$ , наименьшее напряжение – через  $\sigma_3$ , а промежуточное –  $\sigma_2$ , то есть  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

При переходе к главным напряжениям тензор напряжений получает вид

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \sigma_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Коэффициенты уравнения (3) определяются по формуле (5), а промежуточные значения в формуле (5) – с помощью формулы (6)

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{yx}^2 - \tau_{zx}^2 - \tau_{zy}^2; \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{zy}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{yx}^2 + 2\tau_{yx} \tau_{zx} \tau_{zy}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I_1, I_2, I_3$  – инвариантные соотношения – первое, второе и третье инварианты тензора.

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = const, \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 = const, \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = const. \end{aligned} \quad (6)$$

Первый (линейный) инвариант представляет собой сумму элементов, расположенных на главной диагонали в тензоре напряжений, которая пропорциональна относительной объемной деформации у рассматриваемой точки, т.е.

$$I_1 = E_0 \theta. \quad (7)$$

Объемная деформация  $\theta$ , т.е. относительное изменение объема вокруг данной точки как явление физического порядка, конечно, не зависит от способа ее вычисления. Контролем правильности решения кубического уравнения (5) служит равенство

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \quad (8)$$

Второй (квадратичный) инвариант представляет сумму миноров определителя, составленного из компонентов тензора напряжений, если произвести разложение его по главной диагонали, т.е.

$$\begin{aligned} I_2 &= \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_z & \tau_{zx} \\ \tau_{xz} & \sigma_x \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_2 & 0 \\ 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_3 & 0 \\ 0 & \sigma_1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Контролем правильности решения уравнения может, очевидно, служить равенство

$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1. \quad (10)$$

Третий (кубический) инвариант представляет собой развернутый в строку определитель, составленный из компонентов тензора напряжений

$$I_3 = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В настоящее время на шахтах УД АО «Арселор-Миттал Темиртау» эксплуатируются всего 4 выработки, пройденные в присечку.

Для анализа формы сечения и вида крепления взяты данные по металлоарочному креплению и анкерному креплению при прямоугольном сечении, так как на шахтах УД преобладают данные формы сечения и виды крепления.

Для установления зависимостей использовался метод наименьших квадратов с программным средством для корреляционного анализа Mathcad 2001 Professional.

Исследованы зависимости напряжений от мощности пласта. При металлоарочном креплении зависимости напряжений от мощности пласта характеризуются формулами (12), (13), а при анкерном креплении – (14) и (15). Зависимости приведены для Саранского участка. Коэффициенты корреляции обозначены как  $r$ :

$$\sigma_1^M(m) = 0.1 \times e^{0.76 \cdot m} + 81, \quad r=0.86 \quad (12)$$

$$\sigma_3^M(m) = -0.4 \times m^3 + 5.2 \times m^2 - 19.3 \times m + 41.1, \quad r=0.92 \quad (13)$$

$$\sigma_1^A(m) = 0.208 \times e^{0.69 \cdot m} + 65, \quad r=0.9 \quad (14)$$

$$\sigma_3^A(m) = 1.8 \times e^{0.162 \cdot m} + 7.4, \quad r=0.87 \quad (15)$$

где  $\sigma_1^M$  и  $\sigma_3^M$  – напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  для металлоарочного крепления;

$\sigma_1^A$  и  $\sigma_3^A$  – напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  для анкерного крепления.

Значения мощности варьировались для металлоарочного – в пределах от 2,0 до 5,5 м, а для анкерного – 1,5 до 5,5 м. Выходные значения  $\sigma_1^M$  изменяются в промежутке от 81,6 до 87,1 МПа,  $\sigma_3^M$  – от 19,5 до 25,5 МПа. А значения  $\sigma_1^A$  изменяются в диапазоне от 65,6 до 74,2 МПа,  $\sigma_3^A$  – от 9,7 до 11,8 МПа (рисунок 1). Таким образом, значение напряжения  $\sigma_1^M$  больше, чем

$\sigma_3^M$ , в 3.86 раза. Значения напряжения  $\sigma_3^A$  при анкерном креплении почти не меняются.

Исследованы зависимости напряжений от угла падения пласта. При металлоарочном креплении зависимость напряжений от угла падения пласта характеризуется формулами (16), (17), а при анкерном креплении – (18) и (19) – (рисунок 2) ( $r=0,98$ )

$$\sigma_1^M(\alpha) = 0.65 \times \alpha^3 - 26.5 \times \alpha^2 + 360.5 \times \alpha - 1518, \quad (16)$$

$$\sigma_3^M(\alpha) = 0.028 \times \alpha^3 - 1.2 \times \alpha^2 + 16.5 \times \alpha - 69.8, \quad (17)$$

$$\sigma_1^A(\alpha) = 1.169 \times e^{0.253 \cdot \alpha} + 51.638, \quad (18)$$

$$\sigma_3^A(\alpha) = 0.191 \times \alpha^3 - 5.392 \times \alpha^2 + 47.401 \times \alpha - 137.489. \quad (19)$$

Функции  $\sigma_1^{mem}(\alpha)$ ,  $\sigma_2^{mem}(\alpha)$ ,  $\sigma_2^{анк}(\alpha)$  характеризуются кубическими полиномами, а функция  $\sigma_1^{анк}(\alpha)$  описывается экспоненциальной функцией.

Значения угла падения пласта для металлоарочного крепления варьировались в пределах  $\alpha = 9 \dots 19.1^\circ$ , а для выработок с анкерным креплением –  $\alpha = 7 \dots 14^\circ$ . Функция  $\sigma_1^{mem}(\alpha)$  – возрастающая.

Исследование зависимости напряжений от глубины разработки. При металлоарочном креплении зависимость напряжений от глубины разработки пласта характеризуется формулами (20), (21), а при анкерном креплении – (22) и (23) – (рисунок 3) ( $r=0.8$ ):

$$\sigma_1^M(H) = 9.9 + 0.2 \times H, \quad (20)$$

$$\sigma_3^M(H) = 1.2 + 0.04 \times H, \quad (21)$$

$$\sigma_1^A(H) = 19.886 + 0.104 \times H, \quad (22)$$

$$\sigma_3^A(H) = -30.349 + 0.038 \times H. \quad (23)$$

Значения глубины разработки  $H$  варьировались для металлоарочного крепления от 270 до 620 м; для анкерного крепления – от 290 до 730 м.

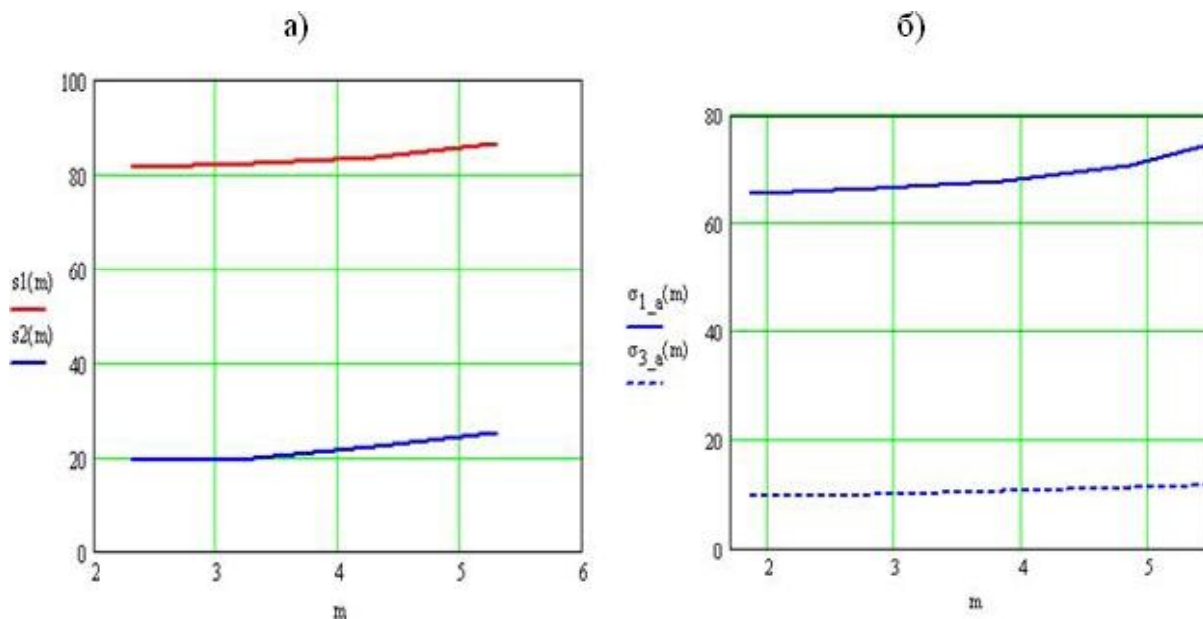


Рисунок 1 – Влияние мощности пласта на величину напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (а) и анкерной (б) крепью

Напряжение  $\sigma_1$  при металлоарочном креплении возрастает от 64 МПа до 134 МПа или в 2 раза, а при анкерном креплении – от 48 МПа до 84,5 МПа или в 1,8 раза. Как видно из графика,  $\sigma_3$  при металлоарочном креплении возрастает от 12 МПа до 26 МПа, или в 2,2 раза.

Анализ результатов наблюдений в диапазоне от 300 до 600 м показывает, что значение напряжения  $\sigma_1$  при металлоарочном креплении в 1,5 раза больше, чем при анкерном креплении, что свидетельствует об устойчивости выработок [1] при анкерном креплении, чем при металлоарочном, с ростом глубины.

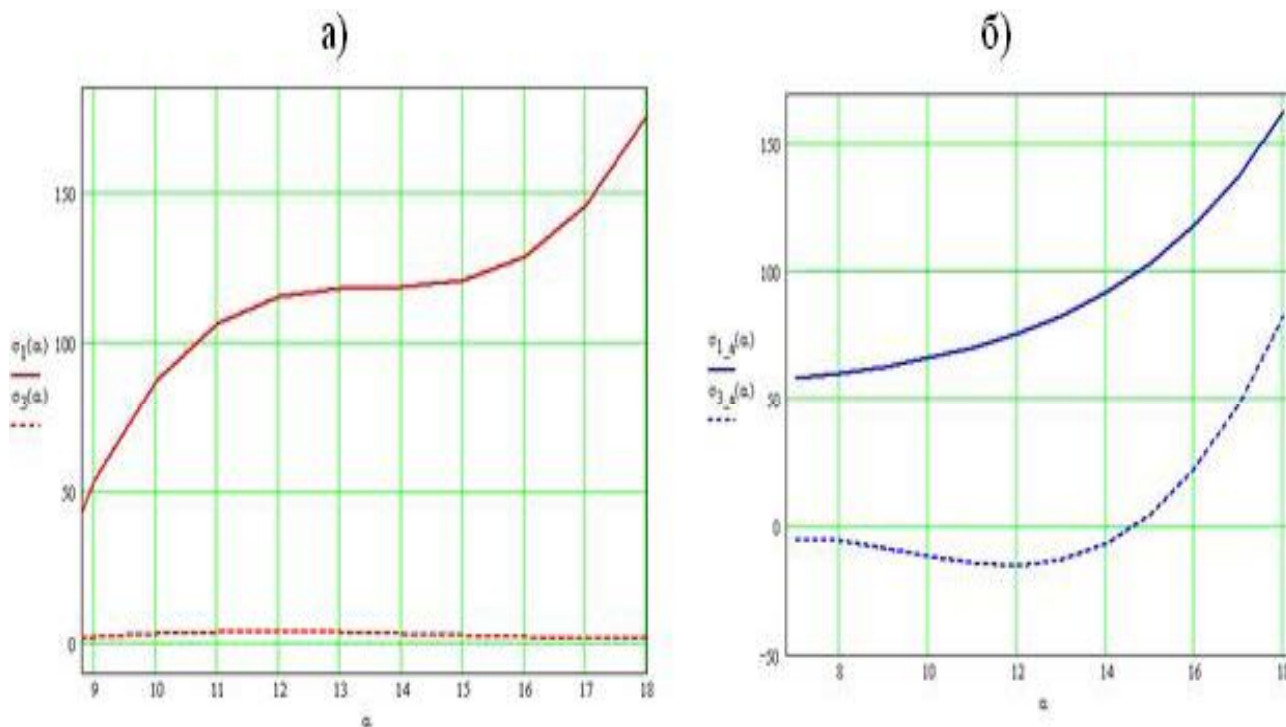


Рисунок 2 – Влияние угла падения пласта на величину напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (а) и анкерной (б) крепью

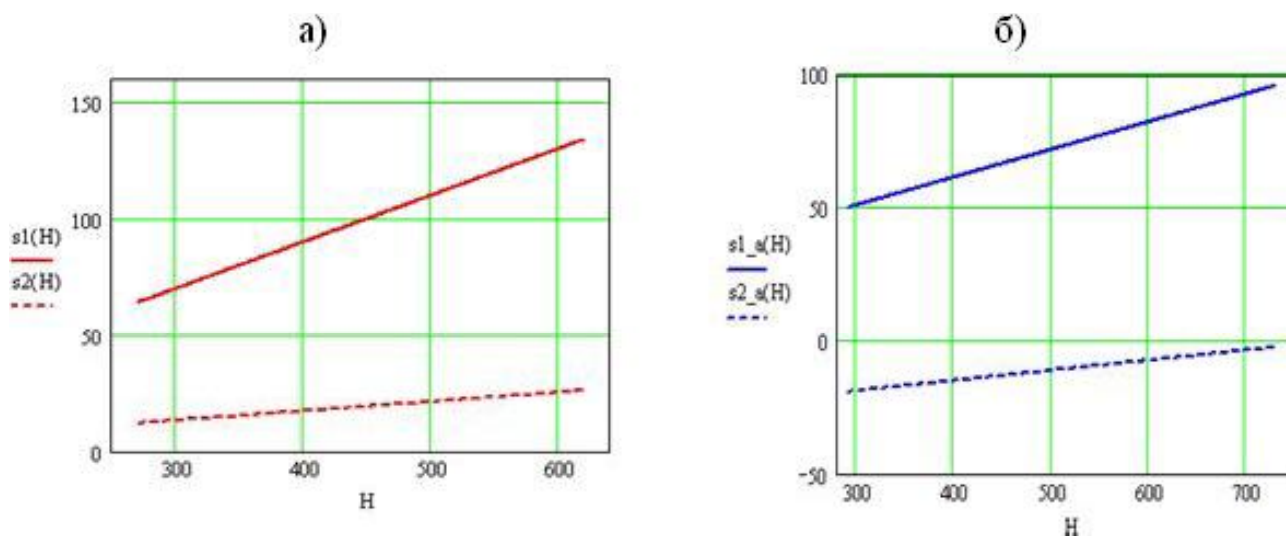


Рисунок 3 – Влияние глубины разработки на величину напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , возникающих вокруг контура выработки, закрепленной металлоарочной (а) и анкерной (б) крепью

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.Ф., Смагулова А.С. Исследование влияния главных максимальных горизонтальных напряжений на горные выработки // Междунар. науч. жур. «Актуальные проблемы современности». Сер. «Технические науки». Караганда: Болашак-Баспа, 2010. № 6(56). С. 43–46.

УДК 622.281(574.32)

## Устойчивость выработок различных направлений относительно главных максимальных горизонтальных напряжений

**В.Ф. ДЕМИН**, д.т.н., профессор кафедры РМПИ,  
**А.С. СМАГУЛОВА**, к.т.н., ст. преподаватель кафедры ИС,  
**В.В. ДЕМИН**, к.т.н., доцент кафедры РМПИ,  
**Ю.Ю. СТЕФЛЮК**, магистрант специальности «Горное дело»,  
 Карагандинский государственный технический университет

**Ключевые слова:** выработка, крепление, устойчивость выемочных выработок, главные горизонтальные напряжения, технология крепления и поддержания, геомеханические условия, напряженно-деформированное состояние, прочность вмещающих пород, конвергенция кровли и почвы.

Ряд исследований [1, 2], проведенных в последние годы на шахтах и рудниках различных стран, указывают на влияние взаимной ориентации главных горизонтальных напряжений и горных выработок, что часто является одним из главных факторов, определяющих устойчивость выработок.

Установлено, что выработки, расположенные параллельно оси север-юг более устойчивы, чем выработки расположенные перпендикулярно им. Значения максимальных главных напряжений в 2-3 раза больше при перпендикулярном расположении [3], чем при параллельном.

В Карагандинском угольном бассейне с целью изучения влияния направления заложения выработок относительно направления максимальных горизон-

тальных напряжений на шахтах УД АО «Арселор-Миттал Темиртау» были проведены наблюдения в 55 выработках на предмет их дефектности. Выработки были разбиты на проведенные параллельно направлению максимальных горизонтальных напряжений (север-юг) и перпендикулярно им.

Анализ результатов производился с учетом следующих факторов [4]:

- расположение выработки: в целике, в присечку, в зоне влияния очистных работ, вне ее;
- вид крепления: металлическое рамное, смешанное (металлоарочное-анкерное) и анкерное.

При расположении выработок вне зоны влияния очистных работ направление их заложения не играет существенной роли на их устойчивость. В зоне влия-