

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНО-ЖЕСТКОЙ КРЕПИ
УСИЛЕНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК ГЛУБОКИХ ШАХТ**

Розроблено алгоритм визначення параметрів повздовж-жорсткого кріплення підсилення виймальних виробок глибоких шахт

**DEFINITION OF ARGUMENTS OF A LONGITUDINAL-RIGID SUPPORT
BEEFING-UP AN EXTRACTION DEVELOPMENTS
OF DEEP MINES**

The issue achieved in the algorithm for the parameters of strengthening timbering determination for the preparation working for the deep mine

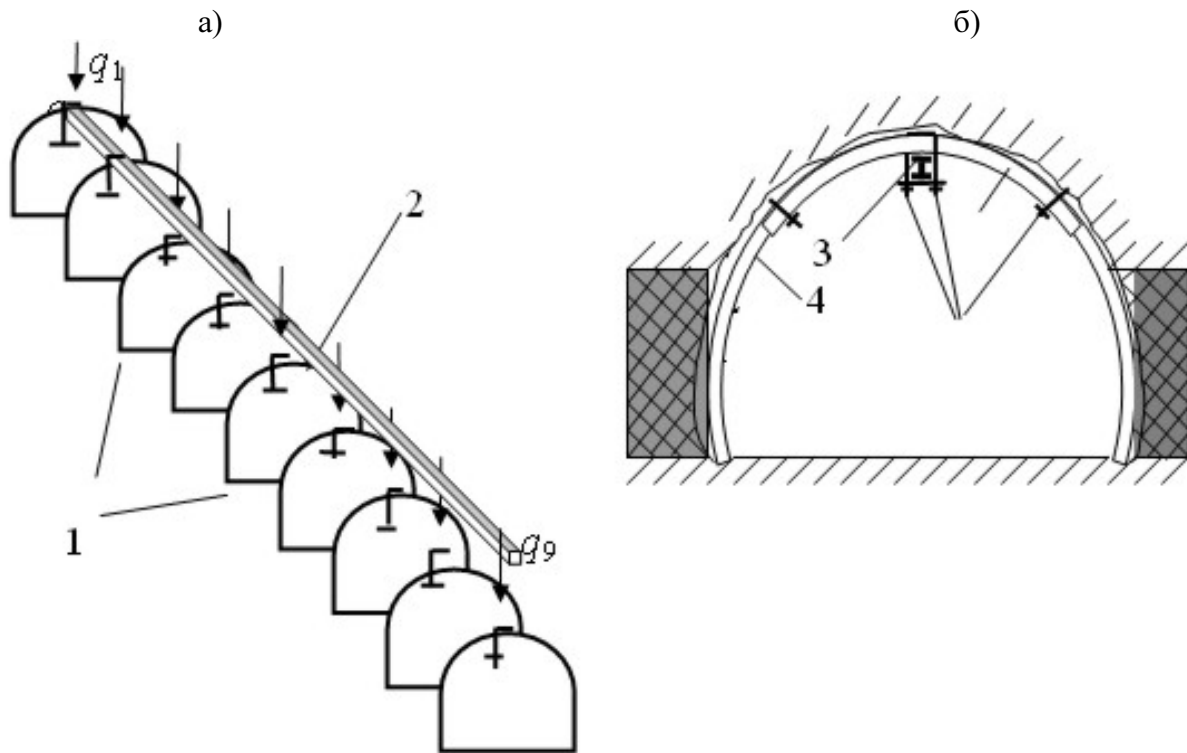
Анализ результатов поддержания выемочных выработок глубоких шахт в зоне временного опорного давления, на сопряжении с лавой и в выработанном пространстве, показывает [1-3], что применяемая арочная податливая крепь используется с низким коэффициентом полезного действия из-за нерационального режима ее нагружения как по периметру крепи, так и по длине выработки. Вследствие концентрации повышенных нагрузок на отдельных участках профиля крепи, а также наличия перегруженных и недогруженных комплектов крепи по длине выемочной выработки, происходит образование локальных зон давления на элементы крепи с последующим формированием складчатых структур в боковых породах на контуре выработки. Все это сопровождается интенсивным трещинообразованием и расслоением породных отдельностей контура выработки и дальнейшим ростом концентрированных нагрузок в виде изгибных и крутильных моментов, а также продольных и поперечных сил. Из-за несоответствия как технологических параметров применяемой арочной крепи, так и прочностных и конструктивных параметров специального металлического профиля (СВП) особенностям механизма проявлений горного давления в зоне влияния очистных работ, смещения контура боковых пород значительно превышают проектную податливость крепи.

Сотрудниками горного института ДонНТУ был предложен новый способ продольно-жесткого усиления арочной крепи (рис. 1), который прошел успешную проверку в выемочных выработках таких глубоких шахт, как «Южnodонбасская № 3», им. М.И. Калинина и им. А.А. Скочинского, и показал достаточно высокую эффективность в плане обеспечения устойчивости выработок в зоне влияния очистных работ [4-6].

Наряду с натурными наблюдениями продолжают аналитические исследования совместной работы основной и усиливающей крепей в различных условиях поддержания выемочных выработок.

В процессе эксплуатации подготовительной выработки, вследствие воздействия на каждый комплект арочной крепи различных по величине нагрузок q_i , соединяющая отдельные арки балка может неравномерно изгибаться по длине выработки при перераспределении этих нагрузок между перегру-

женными и недогруженными комплектами крепи. Для определения сил взаимодействия между арочной и усиливающей крепями рассмотрим 6 арок, соединенных балкой из СВП (рис. 2 и 3).



1 – комплекты крепи, 2 – двутавровая продольная балка, 3 – сегмент жесткости
4 – элементы крепления балки и сегмента жесткости

Рис. 1 – Схема расположения продольно-жесткой крепи усиления по длине выработки (а) и в ее поперечном сечении (б):

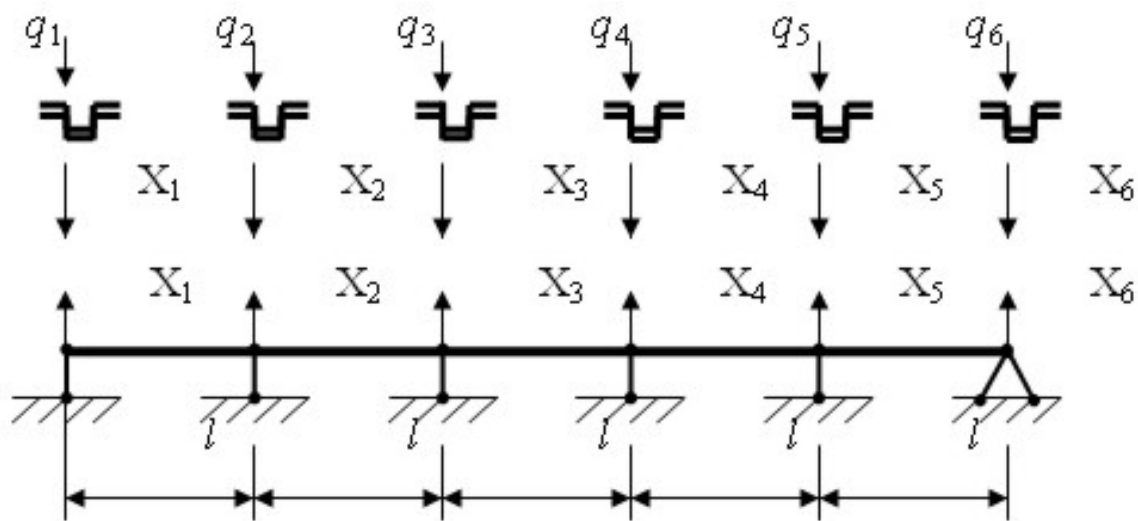


Рис. 2 – Схема силового взаимодействия комплектов арочной крепи и продольной балки крепи усиления по длине выработки

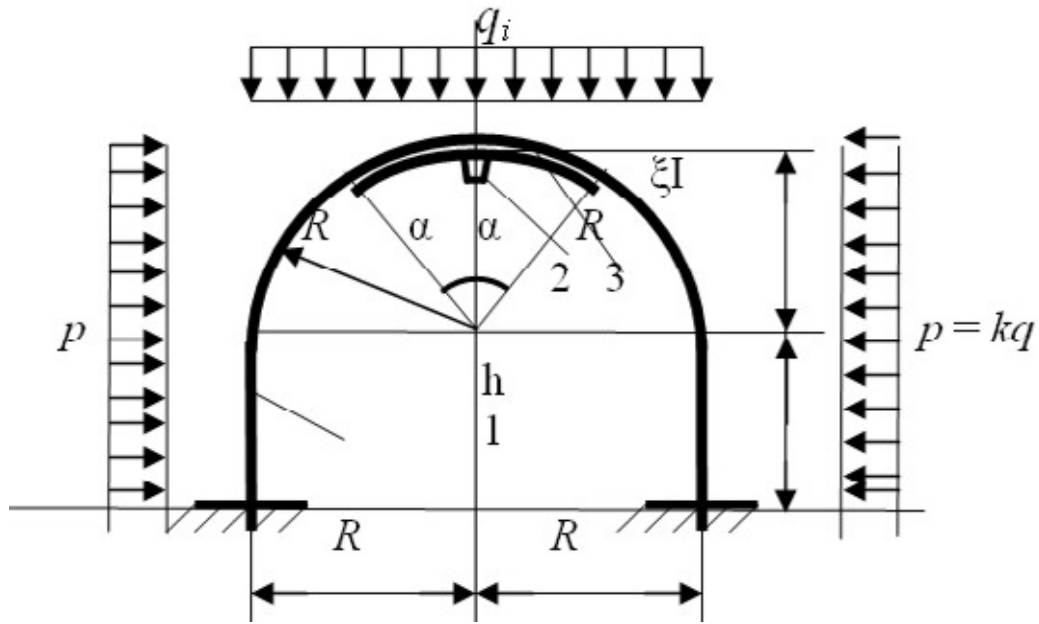


Рис. 3 – Схема нагружения комплекта арочной крепи (1) при наличии крепи усиления (продольной балки – 2 и сегмента жесткости – 3)

Уравнения метода сил для условий рис.1 и 2 можно записать в виде [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\delta_{11} + y_{11}) X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_2 + \delta_{14} X_2 + y_{1q} = 0, \\ \delta_{21} X_2 + (\delta_{22} + y_{22}) X_2 + \delta_{23} X_3 + \delta_{24} X_4 + y_{2q} = 0, \\ \delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + (\delta_{33} + y_{33}) X_3 + \delta_{34} X_4 + y_{3q} = 0, \\ \delta_{41} X_1 + \delta_{42} X_2 + \delta_{43} X_3 + (\delta_{44} + y_{44}) X_4 + y_{4q} = 0, \\ \dots\dots\dots \\ \delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \delta_{i3} X_3 + \dots + (\delta_{ii} + y_{ii}) X_i + y_{iq} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где δ_{ik} – перемещения балки от воздействия силы $X_k = 1$ по направлению действия силы $X_i = 1$; y_{ii} – перемещения в верхнем сечении i -й арки от единичной силы $X_i = 1$; y_{iq} – перемещения в верхнем сегменте i -й арки от нагрузки q_i по направлению действия силы $X_i = 1$.

Перемещения балки δ_{ik} можно найти с помощью метода начальных параметров.

Рассмотрим первое единичное сечение (рис. 4). Для него можно записать уравнение метода сил в виде:

$$EI_B y(x) = EI_B y_{01} + EI \alpha_{01} x + \frac{1 \times x^3}{6} - \frac{5(x-4l)^3}{6}, \quad (2)$$

При $x = 4l$ $y(4l) = 0$ и при $x = 5l$ $y(5l) = 0$, тогда: $EI_B y_{01} = \frac{80l^3}{3}$.

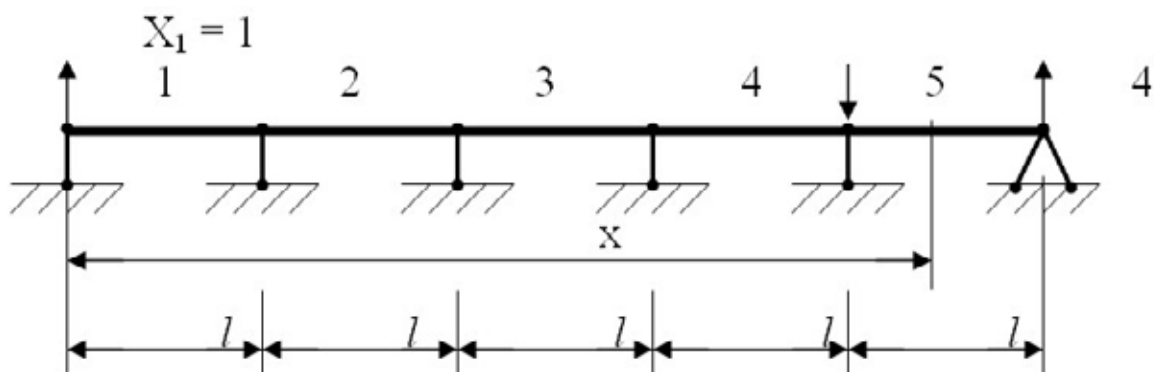


Рис. 4 – Схема силового взаимодействия комплектов арочной крепи и балки для первого единичного состояния

Отсюда находим начальные параметры:

$$\delta_{11} = \frac{80l^3}{3EI_B}; \quad \alpha_{01} = -\frac{28l^2}{3EI_B}; \quad (3)$$

При $x = l, x = 2l, x = 3l$ находим перемещения в точках 2, 3 и 4 от действия силы $X_1 = 1$, т.е.

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{17,5l^3}{EI_B}; \quad \delta_{13} = \delta_{31} = \frac{28l^3}{3EI_B}; \quad \delta_{14} = \delta_{41} = \frac{19l^3}{6EI_B}; \quad (4)$$

Рассмотрим второе единичное состояние (рис. 5).

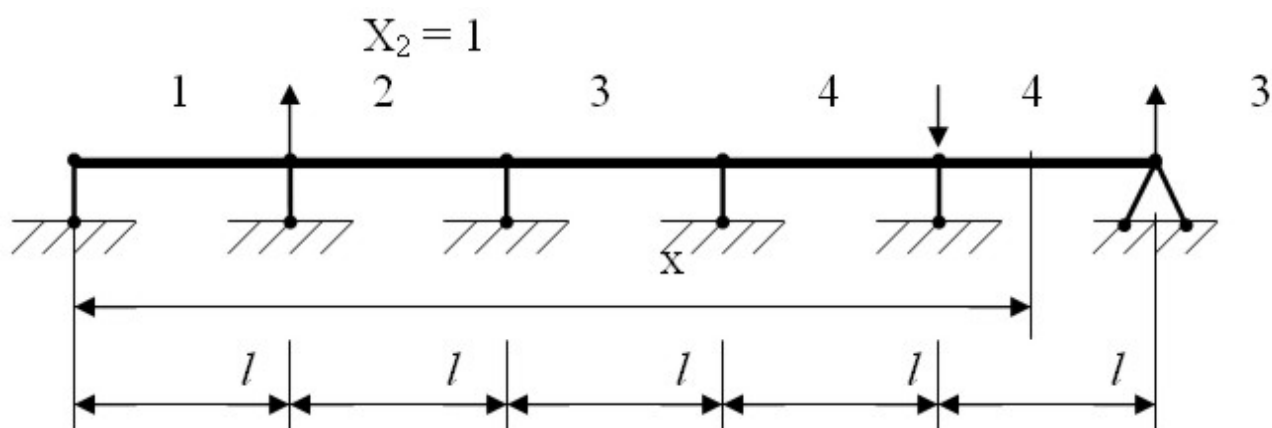


Рис. 5 – Схема силового взаимодействия комплектов арочной крепи и балки для второго единичного состояния

Принимая за начало координат точку 2 из уравнения начальных параметров аналогично определяем:

$$\alpha_{02} = -\frac{5,5 l^2}{EI_B}; \quad y_{02} = \frac{12 l^3}{EI_B}; \quad (5)$$

$$\delta_{22} = \frac{12 l^3}{EI_B}; \quad \delta_{23} = \delta_{32} = \frac{20 l^3}{3EI_B}; \quad \delta_{24} = \delta_{42} = \frac{5 l^3}{3EI_B};$$

Третье единичное состояние представлено на рис. 6.

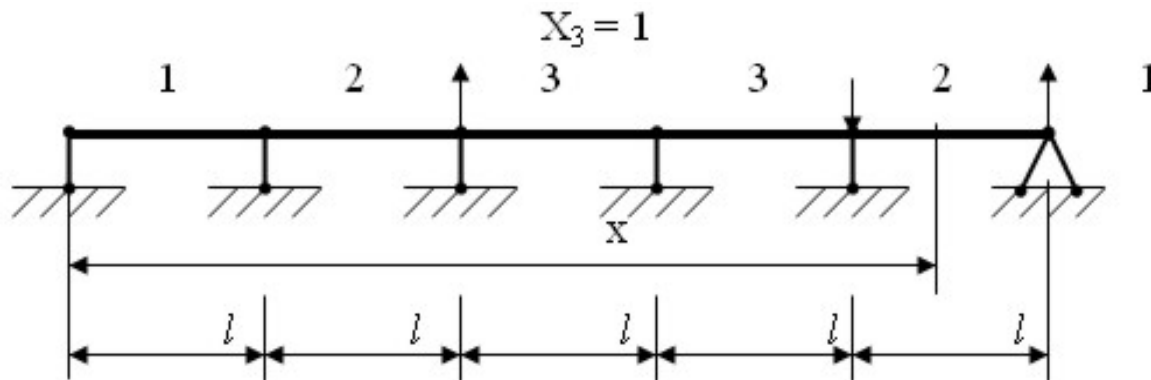


Рис. 6 – Схема силового взаимодействия комплектов арочной крепи и балки для третьего единичного состояния

Как и в предыдущем случае находим:

$$\alpha_{03} = -\frac{8 l^2}{3EI_B}; \quad y_{03} = \frac{4 l^3}{EI_B}; \quad \delta_{33} = \frac{4 l^3}{EI_B}; \quad \delta_{34} = \delta_{43} = \frac{1,5 l^3}{EI_B}; \quad (6)$$

Для четвертого единичного состояния (рис. 7), как и в предыдущих случаях, получим:

$$\alpha_{04} = -\frac{5 l^2}{6EI_B}; \quad y_{04} = \frac{2 l^3}{3EI_B}; \quad \delta_{44} = \frac{2 l^3}{3EI_B} \quad (7)$$

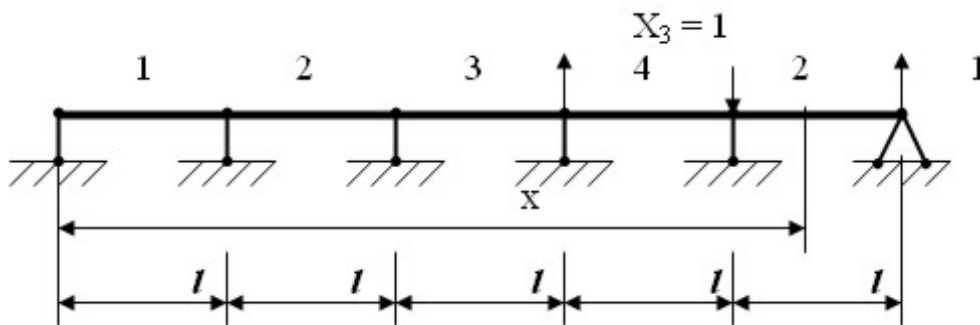


Рис. 7 – Схема силового взаимодействия комплектов арочной крепи и балки для четвертого единичного состояния

Для определения смещений в верхнем сечении i -й арки от действия единичной силы арочную крепь необходимо загрузить единичной силой (рис. 7) и раскрыть статическую неопределенность при нагрузке $P = 1$. При этом единичные коэффициенты системы (1) будут такими же, как и при расчете параметров арочной крепи с сегментом жесткости (см. табл. 1 или 3 [1]). Уравнения изгибающих моментов от сил $X_1 = 1$, $X_2 = 1$ и от половины единичной нагрузки (для сохранения симметрии) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} M_1 &= 1; & M_2^{I,II} &= R(1 - \cos \varphi); \\ M_2^{III} &= R \bar{y}; & M_p^{I,II} &= -(R \sin \varphi)/2; \\ M_p^{III} &= -R/2; & ds^{I,II} &= R d\varphi; \\ ds^{III} &= d\bar{y} = R dy. \end{aligned} \quad (8)$$

Грузовые коэффициенты определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \Delta_{1P}^1 &= \frac{1}{EI} \left[\frac{1}{\xi} \int_S M_P^I M_I ds + \int_S M_P^{II} M_I^{II} ds + \int_y M_P^{III} M_I^{III} dy \right] = -\frac{R^2}{2EI} \left[\frac{1}{\xi} \int_0^a \sin \varphi d\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \int_a^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi + \int_1^{1+n} d\bar{y} \right] = -\frac{R^2}{2EI} \left[\left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{\xi} + n\right) \right]; \\ \Delta_{2P}^1 &= \frac{R^3}{EI} \left[\frac{1}{\xi} \int_0^a \sin \varphi d\varphi + \int_a^{\pi/2} (1 - \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi + \int_1^{1+n} \bar{y} d\bar{y} \right] = -\frac{R^3}{2EI} \left\{ \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \left(\cos \alpha - \frac{1}{4} \cos 2\alpha \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} \left(\frac{3}{\xi} - 1 \right) + \frac{1}{2} [(1+n)^2 - 1] \right\} \end{aligned}$$

В таблице 1 приведены значения грузовых коэффициентов (Δ_{1P}^1 и Δ_{2P}^1), неизвестных моментов X_1^1 и продольной силы X_2^1 , полученных из решения уравнений (1), (9) и (10).

Таблица 1 – Значения грузовых коэффициентов

№/№	α , град	$EI \Delta_{1P}^1$	$EI \Delta_{2P}^1$	X_1^1 / R	X_2^1	$y_{11} EI / R^3$
1	0	- 0,875	- 0,766	0,218	0,230	0,034
2	10	- 0,871	- 0,766	0,240	0,211	0,027
3	20	- 0,858	- 0,765	0,255	0,197	0,024
4	30	- 0,838	- 0,763	0,264	0,190	0,023
5	45	- 0,793	- 0,754	0,265	0,190	0,023
6	60	- 0,735	- 0,731	0,253	0,197	0,021
7	90	- 0,596	- 0,626	0,230	0,205	0,017

Уравнения изгибающих моментов в заданном сечении от единичной нагрузки (рис. 8,б) запишется в виде:

$$M^{I,II} = R \left[\bar{X}_1 + \bar{X}_2 (1 - \cos \varphi) - \frac{1}{2} \sin \varphi \right], \quad M^{III} = R \left(\bar{X}_1 + \bar{X}_2 \bar{y} - \frac{1}{2} \right) \quad (11)$$

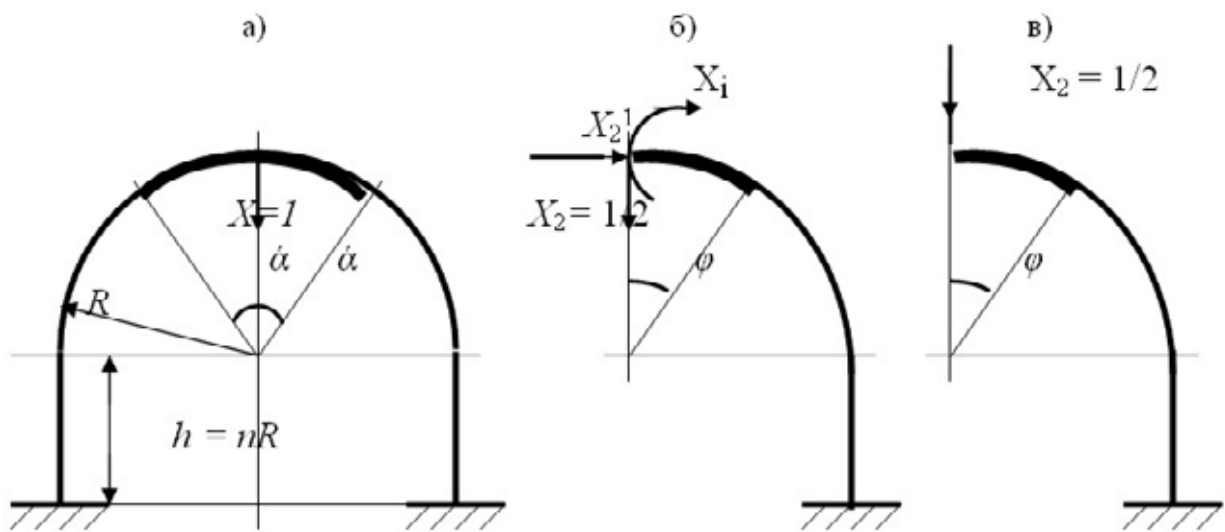


Рис. 8 – Схема нагружения комплекта крепи: а) всей арки с сегментом жесткости, б) половины арки при действии вертикальной и продольной сил и изгибающего момента, в) половины арки под действием внешней силы

Уравнения моментов от единичной силы для определения смещений y_{ii} (рис. 9) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} M_1^{I,II} &= -R \sin \varphi, & M^{III} &= -R, \\ ds &= R d\varphi; & ds &= R d\bar{y}. \end{aligned} \quad (12)$$

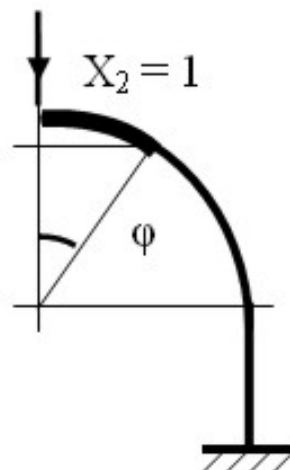


Рис. 9 – Схема приложения единичной силы для определения смещений y_{ii}

Смещения y_{ii} определяются по формуле Мора [1] :

$$y_{ii} = \frac{1}{EI} \sum_s \int M M_1 ds \quad (13)$$

$$y_{ii} = \frac{R^3}{EI} \left\{ \int_0^{\alpha_i} \left[\frac{1}{2} \sin \varphi - \bar{X}_1 - \bar{X}_2 (1 - \cos \varphi) \right] \frac{\sin \varphi}{\xi} d\varphi + \int_{\alpha_i}^{\pi/2} \left[\frac{\sin \varphi}{2} - \bar{X}_1 - \bar{X}_2 (1 - \cos \varphi) \right] \sin \varphi d\varphi - \int_1^{1+n} \left(\bar{X}_1 + \bar{X}_2 \bar{y} - \frac{1}{2} \right) d\bar{y} \right\}. \quad (14)$$

После интегрирования получим:

$$y_{ii} = \frac{R^3}{EI} \left\{ [(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)(\cos \alpha_i - 1) + \bar{X}_2 \frac{(1 - \cos 2\alpha_i)}{4} + \frac{\alpha_i}{4} - \frac{\sin 2\alpha_i}{8}] \frac{1}{\xi} + [-(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) \cos \alpha_i + \bar{X}_2 \frac{(1 + \cos 2\alpha_i)}{4} - \frac{\alpha_i}{4} + \frac{1}{8}(\sin 2\alpha_i + \pi)] - n [\bar{X}_1 + \bar{X}_2 (1 + \frac{n}{2}) - \frac{1}{2}] \right\} \quad (15)$$

Коэффициенты y_{iq} системы уравнений (1) также определяются по формуле Мора:

$$y_{iq} = \frac{1}{EI} \sum_s \int M_P M_1 ds \quad (16)$$

$$M_P^{I,II} = qR^2 \left[\bar{X}_1 + \bar{X}_2 (1 - \cos \varphi_i) - \frac{1}{2} \sin^2 \varphi_i - \frac{k}{2} (1 - \cos \varphi_i)^2 \right];$$

$$M_P^{III} = qR^2 \left[\bar{X}_1 + \bar{X}_2 \bar{y}_i - \frac{1 + k\bar{y}_i^2}{2} \right] \quad (17)$$

Уравнения моментов от единичной силы (рис. 7) будут такими же, что и для определения y_{ii} (см формулы 12).

В результате интегрирования выражений (16), (17) получим:

$$y_{iq} = \frac{qR^4}{EI} \left\{ [(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) - \frac{k+1}{2}] \left[\left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \cos \alpha_i - \frac{1}{\xi} \right] + \frac{k - \bar{X}_2}{4} \left[\left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \cos 2\alpha_i - \left(\frac{1}{\xi} + 1 \right) \right] + \frac{1-k}{6} \left[\left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \cos^3 \alpha_i - \frac{1}{\xi} \right] + \left(\frac{1}{2} - \bar{X}_1 \right) n - \frac{\bar{X}_2}{2} [(1+n)^2 - 1] + \frac{k}{6} [(1+n)^3 - 1] \right\} \quad (18)$$

Результаты определения по формуле (16) грузовых коэффициентов для различных углов сегмента жесткости сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения грузовых коэффициентов

α_i , град	0	10	20	30	45	60	90
y_{iq}	0,0106	0,0089	0,0078	0,0074	0,0073	0,0069	0,0049

Для определения параметров силового взаимодействия арочной крепи и жесткой продольной балки запишем уравнения метода сил (1) для условий рис. 1 при отсутствии сегмента жесткости ($\alpha = 0$) с учетом расчетных данных таблиц 1 и 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{80l^3}{3EI_B} + 0,03364 \frac{R^3}{EI} \right) X_1 + \frac{17,5l^3}{EI_B} X_2 + \frac{28l^3}{3EI_B} X_3 + \frac{19l^3}{6EI_B} X_4 = -0,01064 \frac{q_1 R^4}{EI} \\ \frac{17,5l^3}{EI_B} X_1 + \left(\frac{12l^3}{3EI_B} + 0,03364 \frac{R^3}{EI} \right) X_2 + \frac{20l^3}{3EI_B} X_3 + \frac{5l^3}{3EI_B} X_4 = -0,01064 \frac{q_2 R^4}{EI} \\ \frac{28l^3}{3EI_B} X_1 + \frac{20l^3}{3EI_B} X_2 + \left(\frac{4l^3}{EI_B} + 0,03364 \frac{R^3}{EI} \right) X_3 + \frac{1,5l^3}{EI_B} X_4 = -0,01064 \frac{q_3 R^4}{EI} \\ \frac{19l^3}{6EI_B} X_1 + \frac{5l^3}{3EI_B} X_2 + \frac{1,5l^3}{EI_B} X_3 + \left(\frac{2l^3}{3EI_B} + 0,03364 \frac{R^3}{EI} \right) X_4 = -0,01064 \frac{q_4 R^4}{EI} \end{array} \right. \quad (19)$$

Если балка состоит из 2-х швеллеров №14, то $I_x = I_0 = 491 \cdot 2 = 982 \text{ см}^4$, а момент инерции поперечного сечения арки из спецпрофиля СВП №22 равен $I_a = 428,6 \text{ см}^4$,

$$\text{то } \frac{R^3}{l^3} \frac{I_B}{I} = \frac{2^3}{1} \frac{982}{428,6} = 18,33$$

где R – радиус арочной крепи, $R = 2$ м; l – шаг установки арочной крепи, $l = 0,8$ м.

Тогда уравнения (19) можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} 27,283 X_1 + 17,5 X_2 + 9,3333 X_3 + 3,1667 X_4 = - 0,19502 q_1 R; \\ 17,5 X_1 + 12,617 X_2 + 6,667 X_3 + 1,667 X_4 = - 0,19502 q_2 R; \\ 9,3333 X_1 + 6,667 X_2 + 4,6167 X_3 + 1,5 X_4 = - 0,19502 q_3 R; \\ 3,1667 X_1 + 1,667 X_2 + 1,5 X_3 + 1,2833 X_4 = - 0,19502 q_4 R \end{array} \right. \quad (20)$$

В результате решения системы уравнений (20) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = - 0,09326 q_1 R + 0,1431 q_2 R - 0,05238 q_3 R + 0,1055 q_4 R; \\ X_2 = 0,14309 q_1 R - 0,29241 q_2 R + 0,20043 q_3 R - 0,2076 q_4 R; \\ X_3 = - 0,05237 q_1 R + 0,20043 q_2 R - 0,29539 q_3 R + 0,21419 q_4 R; \\ X_4 = 0,1055 q_1 R - 0,20758 q_2 R + 0,21419 q_3 R - 0,39304 q_4 R. \end{array} \right. \quad (21)$$

При $\alpha = 10^\circ$ система уравнений (1) с учетом единичных «балочных» коэффициентов y_{11} (2-я строка таблицы 1) и y_{iq} (таблица 2) примет вид:

$$\begin{cases} 27,1573 X_1 + 17,5 X_2 + 9,3333 X_3 + 3,1667 X_4 = - 0,16318 q_1 R; \\ 17,5 X_1 + 12,49 X_2 + 6,667 X_3 + 1,667 X_4 = - 0,16318 q_2 R; \\ 9,3333 X_1 + 6,667 X_2 + 4,4901 X_3 + 1,5 X_4 = - 0,16318 q_3 R; \\ 3,1667 X_1 + 1,667 X_2 + 1,5 X_3 + 1,1568 X_4 = - 0,16318 q_4 R \end{cases} \quad (22)$$

Решение системы уравнений (22) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= - 0,12281 q_1 R + 0,21415 q_2 R - 0,12687 q_3 R + 0,19217 q_4 R; \\ X_2 &= 0,21415 q_1 R - 0,45065 q_2 R + 0,35796 q_3 R - 0,40111 q_4 R; \\ X_3 &= - 0,12687 q_1 R + 0,35796 q_2 R - 0,43723 q_3 R + 0,39854 q_4 R; \\ X_4 &= 0,19217 q_1 R - 0,40111 q_2 R + 0,39854 q_3 R - 0,60601 q_4 R \end{aligned} \quad (23)$$

При $\alpha = 20^\circ$ получим аналогично систему:

$$\begin{aligned} 27,1 X_1 + 17,5 X_2 + 9,3333 X_3 + 3,1667 X_4 &= - 0,14321 q_1 R; \\ 17,5 X_1 + 12,433 X_2 + 6,667 X_3 + 1,667 X_4 &= - 0,14321 q_2 R; \\ 9,3333 X_1 + 6,667 X_2 + 4,433 X_3 + 1,5 X_4 &= - 0,14321 q_3 R; \\ 3,1667 X_1 + 1,667 X_2 + 1,5 X_3 + 1,0995 X_4 &= - 0,14321 q_4 R \end{aligned} \quad (24)$$

В результате решения системы (24) получим:

$$\begin{aligned} X_1 &= - 0,17338 q_1 R + 0,33071 q_2 R - 0,24454 q_3 R + 0,33167 q_4 R; \\ X_2 &= 0,33071 q_1 R - 0,70949 q_2 R + 0,61129 q_3 R - 0,71096 q_4 R; \\ X_3 &= - 0,24454 q_1 R + 0,61129 q_2 R - 0,67154 q_3 R + 0,69385 q_4 R; \\ X_4 &= 0,33167 q_1 R - 0,71096 q_2 R + 0,69385 q_3 R - 0,95438 q_4 R. \end{aligned} \quad (25)$$

Примем следующие условия нагружения балки:

$$q_1 = q, \quad q_2 = 1,2 q, \quad q_3 = 1,1 q, \quad q_4 = 0,8 q,$$

тогда выражения (23) примут вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,21981 q R; \quad X_2 = - 0,25377 q R; \\ X_3 &= 0,14055 q R; \quad X_4 = - 0,33558 q R. \end{aligned} \quad (26)$$

На рис. 10 представлена эпюра изгибающих моментов для балки (рис. 2):

Момент сопротивления продольной балки из двух швеллеров №18 будет равен $W_x = 2 \cdot 70,2 = 140,4 \text{ см}^3$, предел прочности для металла швеллера $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$.

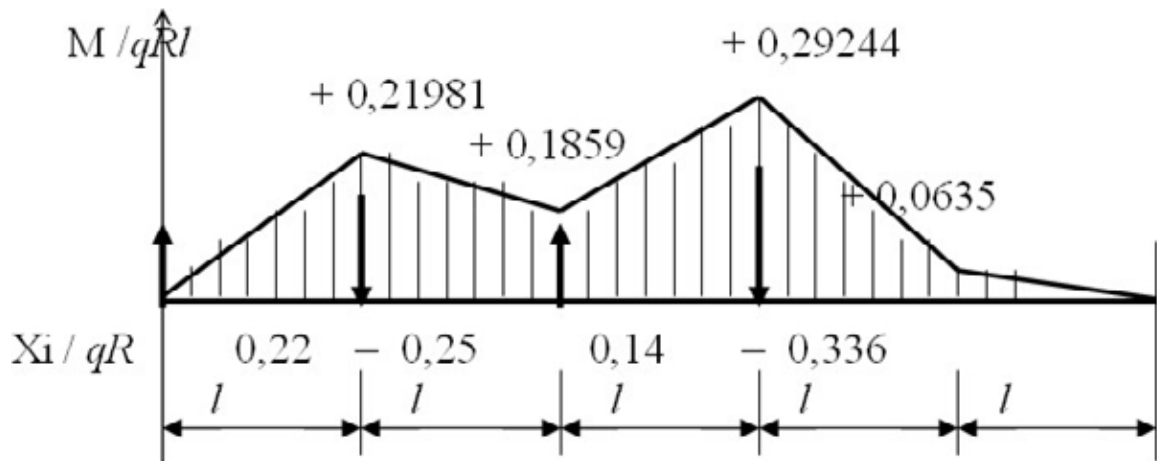


Рис. 10 – Распределение изгибающих моментов и продольных сил в пятипролетной балке

Из условия прочности

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\max}} \leq [\sigma] \quad (27)$$

можно определить максимальный изгибающий момент: $M_{\max} = 0,2924 qRl$; тогда при $R = 2$ м, $l = 1$ м получим допустимую нагрузку:

$$[q] = \frac{[\sigma] W_x}{0,2924 R l} = \frac{160 \times 10^6 \times 140,4 \times 10^{-6}}{0,2924 \times 2 \times 1} = 38,4 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Таким образом, допустимая нагрузка на балку составит 38,4 кН/м.

Суммарные изгибающие моменты и продольные силы от нагрузки с величиной $q_m = \beta q$, ($\beta > < 1$), $p_m = k q_m$ (m – номер арки) и сил взаимодействия между крепью и продольной жесткой балкой X_m на участке арочной крепи определяется из следующих зависимостей:

$$M_i = qR^2 \underline{M}_i = qR^2 \{ \beta [\bar{X}_1 + \bar{X}_2 (1 - \cos\varphi_i) - 1/2 \sin^2\varphi_i - k/2(1 - \cos\varphi_i)^2] + \bar{X}_m [\bar{X}_1^1 + \bar{X}_2^1 (1 - \cos\varphi_i) - 1/2 \sin\varphi_i] \}; \quad (28)$$

$$N_i = qR N_i = qR \{ \beta [(k(1 - \cos\varphi_i) - \bar{X}_2) \cos\varphi_i - \sin^2\varphi_i] - \bar{X}_m [\bar{X}_2^1 \cos\varphi_i + 1/2 \sin\varphi_i] \}. \quad (29)$$

Для первой арочной крепи ($m = 1$) $q_1 = q$, (т.е. $\beta = 1$), $k = 0,5$, тогда:

$$\bar{X}_1 = 0,05747; \bar{X}_2 = 0,68453; \text{ (табл. 3 [2] при } \alpha = 20^\circ \text{), } \bar{X}_1^1 = 0,21981.$$

Для второй арочной крепи: ($m = 2$) $q_1 = 1,2q$, ($\beta = 1,2$) в результате аналогичных расчетов получим $\bar{X}_2^1 = -0,25377$.

Для третьей арочной крепи: ($m = 3$) $q_1 = 1,1q$, ($\beta = 1,1$) получим $\bar{X}_3 = 0,14055$.

Для четвертой арочной крепи: ($m = 4$) $q_1 = 0,8q$, ($\beta = 0,8$) получим

$$\bar{X}_4 = - 0,33576.$$

Результаты вычисленных по формулам (26), (27) значений изгибающих моментов (M_i) и продольных сил (N_i) сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Значения изгибающих моментов и продольных сил в арочной крепи

Номер арочной крепи, m_i	ϕ_i β_i		0^0	10^0	20^0	30^0	45^0	60^0	75^0	90^0
$m = 1$	1,0	M_m	0,114	0,090	0,061	0,027	-0,022	-0,055	-0,057	-0,018
		N_m	-0,728	-0,759	-0,810	-0,877	-0,989	-1,084	-1,132	-1,101
$m = 2$	1,2	M_m	0,004	0,020	0,023	0,016	-0,006	-0,025	-0,026	0,002
		N_m	-0,771	-0,765	-0,788	-0,835	-0,931	-1,026	-1,082	-1,073
$m = 3$	1,1	M_m	0,099	0,082	0,057	0,026	-0,021	-0,053	-0,054	-0,016
		N_m	0,781	-0,806	-0,855	-0,923	-1,038	-1,139	-1,191	-1,170
$m = 4$	0,8	M_m	-0,015	-0,015	-0,001	0,005	0,003	-0,004	-0,004	0,010
		N_m	-0,481	-0,463	-0,466	-0,487	-0,539	-0,595	-0,632	-0,632

Графики зависимостей изгибающих моментов и продольных сил от величины центрального угла сегмента жесткости, возникающие в комплектах арочной крепи при их неравномерном нагружении по длине выработки приведены на рис. 11 и 12.

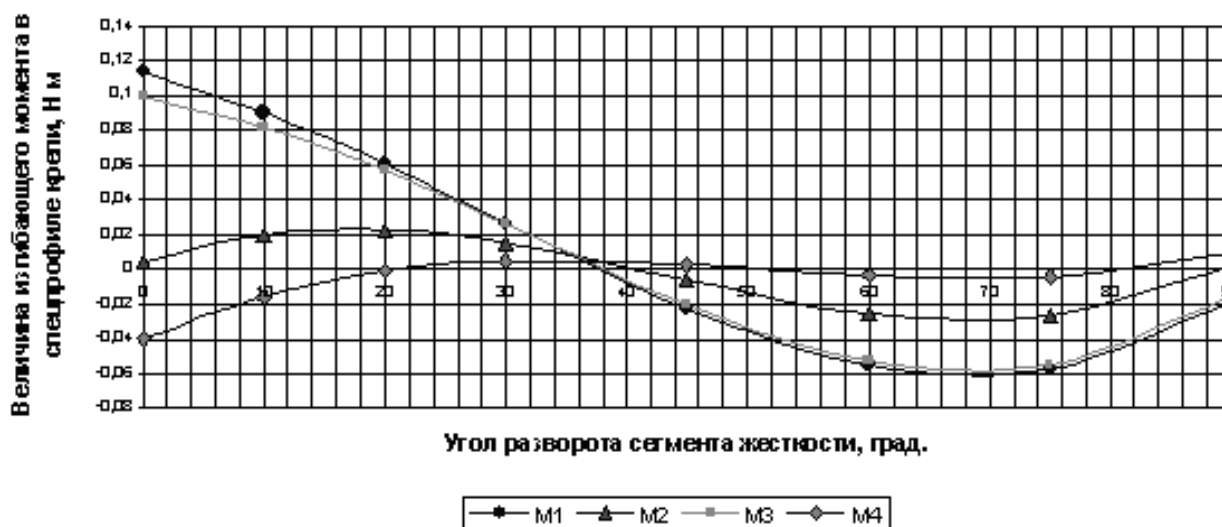


Рис. 11 – График зависимости изгибающих моментов от величины центрального угла сегмента жесткости в 4-х разнозагруженных комплектах арочной крепи

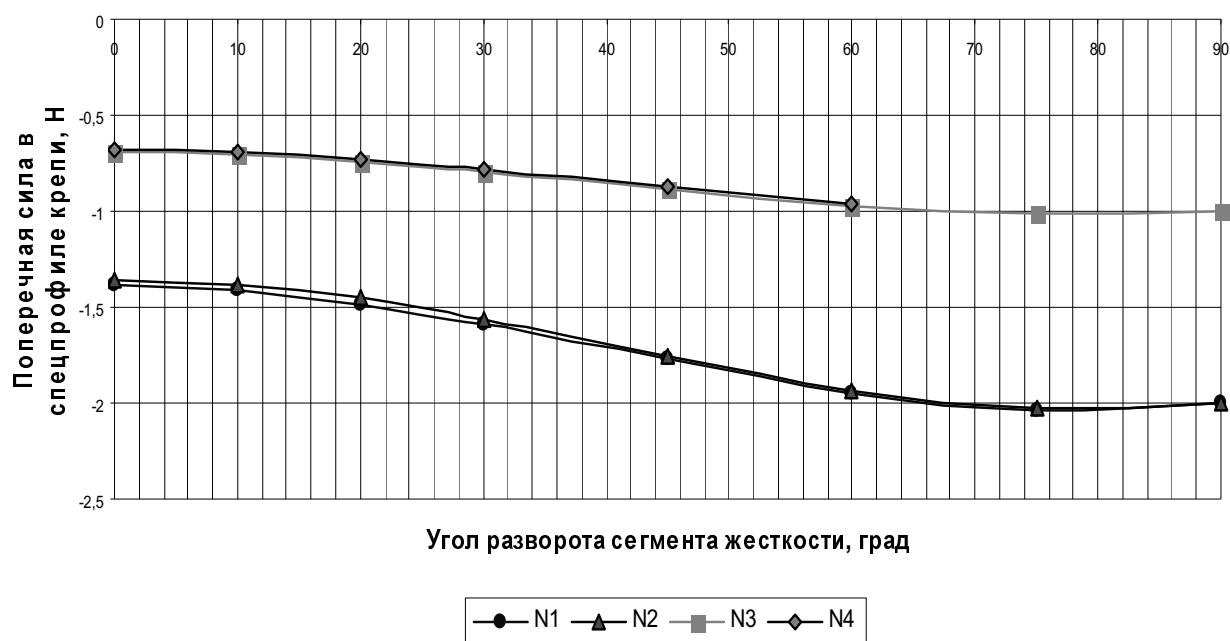


Рис. 12 – График зависимости продольных сил от величины центрального угла сегмента жесткости в 4-х разнозагруженных комплектах арочной крепи

Таким образом, из графиков рис. 11 видно, что в разнозагруженных по длине выемочной выработки комплектах арочной крепи при их продольно-жестком усилении минимальные изгибающие моменты возникают при центральном угле сегмента жесткости равном 38-50°. Согласно рис. 2, общий центральный угол разворота сегмента жесткости составит $2\alpha = 2 \cdot 44^\circ = 88^\circ$.

Тогда длина сегмента жесткости, при котором в верхняке крепи будут возникать минимальные по величине изгибающие моменты, составит

$$l = \frac{\pi r \varphi}{180^\circ} = \frac{3,14 \times 2,0 \times 88}{180} = 3,07 \text{ м.}$$

Таким образом, применение продольно-жесткого усиления позволило на 0,45 м увеличить длину верхняка с минимальными изгибающими моментами.

Определим по формулам (28, 29) значения изгибающих моментов и продольных сил в сегменте жесткости первой арки ($m = l$) при:

$$\varphi = 0, q_l = 38,4 \text{ кН/м и } R = 2 \text{ м, } qR^2 = 153,6 \text{ кНм, } qR = 76,8 \text{ кН.}$$

$$M_{расч}^l = 0,1136 \cdot 153,6 = 17,446 \text{ кНм,}$$

$$N_{расч}^l = -0,72792 \cdot 76,8 = -55,904 \text{ кН.}$$

Расчетные напряжения можно определить по формуле:

$$\sigma_{расч} = \frac{\pm M_{расч}}{W} + \frac{N_{расч}}{F}$$

В наружных волокнах сегмента жесткости напряжения будут равны:

$$\sigma_{расч}^н = \frac{-M_{расч}}{W_{max}} + \frac{N_{расч}}{F_{II}} = \frac{-17,4464 \times 10^3}{144,97 \times 10^{-6}} + \frac{-55,904 \times 10^3}{55,82 \times 10^{-4}} =$$

$$= -120,34 - 10,02 = -130,36 \text{ МПа.}$$

Во внутренних (нижних) волокнах сегмента жесткости напряжения составят:

$$\sigma_{расч}^{вн} = \frac{M_{расч}}{W_{min}} + \frac{N_{расч}}{F_{II}} = \frac{17,4464 \times 10^3}{135,65 \times 10^{-6}} + \frac{-55,904 \times 10^3}{55,82 \times 10^{-4}} =$$

$$= 128,61 - 10,02 = -118,59 \text{ МПа.}$$

Таким образом и сжимающие и растягивающие напряжения в сегменте жесткости меньше допустимых для Ст. 5 ($[\sigma] = \pm 240 \text{ МПа}$).

Определим значения изгибающих моментов и продольных сил на границе сегмента жесткости первой арки ($m = 1$) при одном СВП №22, они равны:

$$\varphi = 20^\circ, W_{max} = 81,33 \text{ см}^3, W_{min} = 74,8 \text{ см}^3, F = 27,91 \text{ см}^2.$$

$$M_{расч} = 0,06049 \cdot 153,6 = 9,292 \text{ кНм,}$$

$$N_{расч} = -0,81026 \cdot 76,8 = -62,23 \text{ кН.}$$

Напряжения в наружных волокнах:

$$\sigma_{расч}^н = -\frac{M_{расч}}{W_{max}} + \frac{N_{расч}}{F_{II}} = -\frac{9,292 \times 10^3}{81,33 \times 10^{-6}} + \frac{-62,228 \times 10^3}{27,91 \times 10^{-4}} =$$

$$= -114,25 - 22,3 = -136,55 \text{ МПа.}$$

Напряжения во внутренних волокнах:

$$\sigma_{расч}^{вн} = \frac{M_{расч}}{W_{min}} + \frac{N_{расч}}{F_{II}} = \frac{9,292 \times 10^3}{76,8 \times 10^{-6}} + \frac{-62,228 \times 10^3}{27,91 \times 10^{-4}} =$$

$$= 120,99 - 22,3 = -98,69 \text{ МПа.}$$

Таким образом, возникающие в арочной крепи из СВП №22 напряжения меньше допустимых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В.Н., Клейменов В.Б., Нуждихин А.Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
2. Долгун А.И., Сдобников П.В. Исследование напряженного состояния металлической арочной крепи пространственной конструкции // Шахтное строительство. 1990. – №11. – С. 23-24
3. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев М.И. Стальные рамные крепи горных выработок. – К.: Техніка, 1999. – 216 с.
4. Соловьев Г.И., Захаров В.С. Особенности деформирования контура выработки при ее жестко-

каркасном усилении // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Перспективы развития горных технологий в начале третьего тысячелетия». Алчевск. – 1999. – С. 116-118.

5. Бондаренко Ю.В., Соловьев Г.И., Кублицкий Е.В., Мороз О.К. О влиянии жесткости каркасной крепи усиления на смещения пород кровли // Известия Донецкого горного института. 2001. № 1. С.59-61.

6. Соловьев Г.И., Малышева Н.Н., Нефедов В.Е., Панфилов Ю.Н. О возможности перераспределения повышенной нагрузки между комплектами крепи по длине подготовительной выработки / Вісті Донецького гірничого інституту, №1, – 2004 р. – С. 122-126

7. Шевченко Ф.Л. Изгиб стержневых систем. Донецк, ДПИ. – 1984.

УДК 622.45

Канд. техн. наук В.А. Трофимов
(Донецкий национальный
технический университет)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ НА ШАХТАХ УКРАИНЫ

У статті розглядаються особливості вимірів і вентиляційних розрахунків, пов'язаних з визначенням опорів окремих елементів вентиляційної мережі.

DEFINITION OF RESISTANCE OF VENTILATING NETWORK ELEMENTS ON MINES OF UKRAINE

In clause the features of measurements and ventilating accounts connected to definition of resistance of separate elements of a ventilating network are considered.

Анализ действующих нормативных документов и литературных источников [1-6] показал, что общие теоретические положения, изложенные в них, искажают или не в полной мере отражают специфику вентиляционных расчетов и измерений, связанных с определением режимов проветривания шахты и работы вентиляторов главного проветривания (ВГП). Это приводит к ошибкам при подготовке исходной информации для компьютерных моделей шахтных вентиляционных сетей (ШВС) и, как следствие, к погрешностям в расчетах распределения воздуха в шахте.

Пути внешних подсосов (утечек) воздуха формируются в надшахтных зданиях стволов и вентиляторных установках (рис. 1). При этом воздух поступает в канал вентилятора, минуя ШВС, через неплотности в элементах конструкции этих сооружений. В надшахтных зданиях такими элементами являются окна, двери, разгрузочные устройства и т.п. В вентиляторных установках – ляды в обводных каналах, атмосферные ляды, смотровые ходки, люки и т.п.

Рассмотрим особенности измерений и расчетов на примере шахты с одним осевым вентилятором (рис. 1). Следует отметить, что стационарная система контроля аэродинамических параметров вентилятора позволяет измерять только депрессию вентилятора и его подачу, а аналогичные параметры ШВС остаются неизвестными. Кроме того, в отдельных случаях подача и депрессия вентилятора определяется с большими погрешностями. Это объясняется отсутствием текущего контроля за состоянием приборов и оборудования или несовершенством самой измерительной системы. Так, например, в тех венти-