

## МЕТОДИКА И БЛОК-СХЕМА РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АРОЧНЫХ РАМНЫХ КРЕПЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

**З. С. Назаров**

Доцент кафедры «Горное дело» НГГИ **Чорикулов А.О.**, ассистент кафедры  
«Горное дело» НГГИ

### АННОТАЦИЯ

В статье предложена усовершенствованная программа, в которой подробно представлена модель расчета металлической рамной крепи для горизонтальных подготовительных горных выработок с расклинивающими элементами: разработан алгоритм для определения деформации рамы в месте расположения расклинивающего элемента при воздействии на раму крепи внешних нагрузок в зависимости от используемого типа специального взаимозаменяемого профиля.

**Ключевые слова:** горное давление, выработка, арочная крепь, расклейка, деформация, арка, динамика, динамика, напряжение, работе представлены пути эффективного управления развалом пород с учетом энергии зарядов эмульсионных взрывчатых веществ. Определение параметров разлета и развала отбитой взрывом горной массы позволяют создать оптимальные размеры подпорной стенки с целью сохранения геологической структуры горного массива, сокращения подготовительно-восстановительных операций при взрыве на уступе, повышения безопасности и увеличения производительности работы погрузочно-транспортного оборудования.

### ВВЕДЕНИЕ

Подземный способ освоения месторождений полезных ископаемых в трудных горно-геологических условиях сопряжено увеличением глубины ведения горных работ. Которая в свою очередь приводит к повышению горного давления, что сопровождается кратным нарастанием случаев различных проявлений горного давления, которое протекает как в статической, так и в динамической формах.

Для расчета арочных крепей, в том числе с расклинивающими элементами, широко применяется метод сил, являющийся наиболее универсальным методом [1, 2, 3].

Для нахождения усилий в статически неопределимых системах дополнительно с уравнениями статики составляются уравнения совместности деформаций, т. е. уравнения, выражающие взаимодействие между деформациями отдельных элементов системы. При этом количество дополнительных уравнений соответствует степени статической неопределимости системы.

## ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

Металлические арочные крепи традиционно рассчитываются методом сил как двух шарнирные арки, степень статической неопределимости которых равна  $n=1$ . Степень статической неопределимости арочных крепей с управляющими силовыми воздействиями определяется следующим выражением [4.5]:

$$n = 1 + k + l + m \quad (1)$$

где  $k$  - количество односторонних связей, установленных на прямолинейном участке АВ (левая стойка);  $l$  - количество односторонних связей, установленных на криволинейном участке ВСД (свод арочной крепи);  $m$  - количество односторонних связей, установленных на прямолинейном участке ДЕ (правая стойка). Расчетная схема арочных крепей с управляющими силовыми воздействиями приведена на рисунке 1.

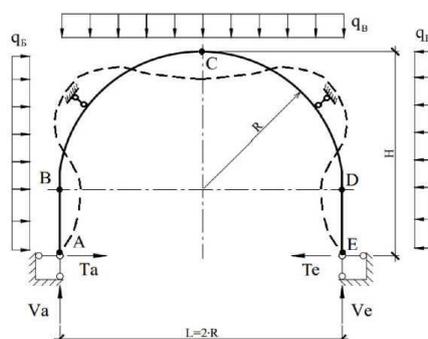


Рис. 1. Расчетная схема арочной крепи с управляющими силовыми воздействиями

Для статически неопределимых систем, имеющих плишних связей, система канонических уравнений метода сил имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \cdot \delta_{11} + X_2 \cdot \delta_{12} + \dots + X_i \cdot \delta_{1i} + \dots + X_{1+k+l+m} \cdot \delta_{1,1+k+l+m} + \Delta_{1P} &= 0 \\ X_1 \cdot \delta_{21} + X_2 \cdot \delta_{22} + \dots + X_i \cdot \delta_{2i} + \dots + X_{1+k+l+m} \cdot \delta_{2,1+k+l+m} + \Delta_{2P} &= 0 \\ X_1 \cdot \delta_{j1} + X_2 \cdot \delta_{j2} + \dots + X_i \cdot \delta_{ji} + \dots + X_{1+k+l+m} \cdot \delta_{i,1+k+l+m} + \Delta_{jP} &= 0 \\ X_1 \cdot \delta_{n1} + X_2 \cdot \delta_{n2} + \dots + X_i \cdot \delta_{ni} + \dots + X_{1+k+l+m} \cdot \delta_{n,1+k+l+m} + \Delta_{nP} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $X_i$  - искомое  $i$ -е усилие;  $\delta_{ji}$  - перемещение по направлению  $i$ -связи от единичной силы, приложенной вместо силы  $X_i$  (единичное перемещение);  $\Delta_{jP}$  - перемещения основной системы от всей заданной нагрузки по направлению действия  $i$ -й неизвестной

силы (грузовое перемещение).

Геометрический смысл каждого уравнения системы заключается в том, что перемещение точки приложения неизвестной силы, замещающей отброшенную лишнюю связь, по направлению этой силы равно нулю.

Чаще всего при определении перемещений при расчете крепей арочных конфигураций учитываются только изгибающие моменты, поскольку вклад продольных сил  $N$  и поперечных сил  $Q_B$  арочных конструкциях обычно не превышает 5-10 % [6]. В этом случае выражение для определения коэффициентов и грузовых членов канонических уравнений будет иметь вид:

$$\delta_{ii} = \sum \int \frac{M_i^2}{EI} dS; \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \sum \int \frac{M_i M_j}{EI} dS; \quad (4)$$

$$\Delta_{iP} = \sum \int \frac{M_i M_P}{EI} dS, \quad (5)$$

где  $M_i$ - момент от единичной силы  $X_i$ ;

$M_P$  - момент от действующей внешней нагрузки.

Учитывая, что для арочных крепей из специального взаимозаменяемого профиля (СВП) жесткость постоянна, т. е.  $E \cdot I = \text{const}$ , данный параметр может быть исключен из дальнейших расчетов.

Результатом расчета является построение эпюры изгибающих моментов.

$$M_x = M_P^0 + M_1 \cdot X_1 + M_2 \cdot X_2 + \dots + M_i \cdot X_i + \dots + M_n \cdot X_n, \quad (6)$$

где  $M_i$  - значение изгибающего момента, поперечной и продольной силы от единичных сил, приложенных в местах действия лишних неизвестных,

$M_P^0$  - значение изгибающего момента, поперечной и продольной силы в основной системе от заданной внешней нагрузки.

Нормальные напряжения в металле крепи определяются по следующему выражению:

$$\sigma = \pm \frac{M}{W}$$

где  $W$  - момент сопротивления площади поперечного сечения СВП.

В расчетной схеме арочной крепи, предложенной кафедрой шахтного строительства УГГУ [7] (см. рисунок 1.), при расчете предусматривалось равенство боковых нагрузок  $T_A = T_E$ , соответственно

$$q_B \cdot H = R \cdot (q_B + q_{БД}) + q_B \cdot (H - R) \quad (8)$$

Однако это условие выполняется только при обеспечении идеального взаимодействия рамы металлической крепи с породным массивом по всему периметру горной выработки. Такое взаимодействие не всегда возможно при применении забутовки с относительно высокой податливостью или при низком качестве работ по

возведению забутовки. При асимметричной нагрузке исключается влияние реакции опорных связей, что неточно учитывает работу арочной крепи. Поэтому более полным будет являться следующее равенство соотношения боковых нагрузок:

$$q_B * H + T_A = R * (q_B + q_{BD}) + q_B * (H - R) + T_E \quad (9)$$

Асимметричность нагружения рамы крепи задается вертикальными  $q_{ВД}$  и боковыми  $q_{БД}$  компонентами нагрузки:

$$q_{BD} = q_D * \cos(\alpha) \quad (10)$$

$$q_{BD} = q_D * \sin(\alpha)$$

где  $\alpha$  - угол падения вмещающих пород, град;  $q_D$  - дополнительная нагрузка, характеризующая влияние плитов пород;  $q_{ВД}$ ,  $q_{БД}$  - вертикальная и боковая составляющие дополнительной нагрузки.

Опорные реакции согласно уравнениям статики определяются следующими выражениями:

$$T_A = R * (q_B + q_{BD}) + q_B * (H - R) - q_B * H \quad (11)$$

$$V_A = \frac{3 * q * R^2 - q_B * H^2 + R * (q + q_{ВД})}{4 * R} - \frac{q_B * (H - R)^2}{4 * R} \quad (12)$$

$$V_E = \frac{q_B * H^2 + q * R^2 + 3 * R^2 * (q + q_{ВД})}{4 * R} + \frac{R * (q_B + q_{ВД}) * (2 * H - R) - q_B * (H - R)^2}{4 * R} \quad (13)$$

В связи со сложной конфигурацией арки расчет ведется по участкам. Изгибающие моменты от действия внешней нагрузки (см. рисунок 1) определяются следующими выражениями:

$$M_P^{AB} = T_A * y + \frac{q_B * y^2}{2} \quad \text{при} \quad 0 \leq y \leq (H - R) \quad (14)$$

$$M_P^{BC} = T_A * (H - R + R * \sin \varphi) - V_A * R * (1 - \cos \varphi) + \frac{q_B * (H - R + R * \sin \varphi)^2}{2} + \frac{q * (R - R * \cos \varphi)^2}{2}, \quad \text{при} \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

$$M_P^{CD} = T_A * (H - R + R * \sin \varphi) - V_A * R * (1 - \cos \varphi) + q_B * H * \left( \frac{H}{2} - R + R * \sin \varphi \right) + q * R^2 * \left( \frac{1}{2} - \sin \varphi \right) + \frac{q_{ВД} * R^2 * \cos^2 \varphi}{2} + \frac{q_{БД} * R^2 * (1 - \sin \varphi)^2}{2} \quad \text{при} \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \quad (16)$$

$$M_P^{DE} = T_A * (H - R - y) - 2 * R * V_A * q_B * H * \left( \frac{H}{2} - R - y \right) + \frac{3 * q * R^2}{2} + \frac{q_B * R^2}{2} + q_{BD} * R * \left( \frac{R}{2} + y \right) + \frac{q_{ВД} * y^2}{2} \quad \text{при} \quad 0 \leq y \leq (H - R) \quad (17)$$

Изгибающие моменты от действия единичной силы  $X_1$  определяются следующим образом:

$$M_1^{AB} = y \quad \text{при} \quad 0 \leq y \leq H - R \quad (18)$$

$$M_1^{BC} = H - R + R * \sin(\varphi), \quad \text{при} \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

$$M_1^{CD} = H - R + R * \sin(\varphi), \quad \text{при} \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \quad (20)$$

$$M_1^{DE} = H - R - y \quad \text{при} \quad 0 \leq y \leq H - R \quad (21)$$

Расчетная схема арочных крепей с расклинкой, приведенная на рисунке 1, позволяет составить систему

канонических управлений метода сил (1), размещая управляющие расклинивающие элементы в зонах, в которых изгибающие моменты деформируют элементы крепи на массив пород.

Момент от силы  $X_i$  расположенной на левой стойке (участок АВ) определяется в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 2.

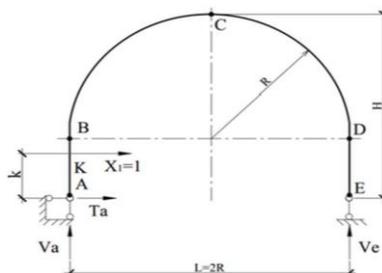


Рис. 2. Схема к определению изгибающего момента от действия силы  $X_i$ , расположенной в левой стойке.

$$M_k^{AK} = y, \text{ при } 0 \leq y \leq k; \quad (22)$$

$$M_k^{KB} = k, \text{ при } k \leq y \leq H - R; \quad (33)$$

$$M_k^{BC} = k - k \frac{[1 - \cos(\varphi)]}{2}, \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}; \quad (24)$$

$$M_k^{CD} = k - k \frac{[1 - \cos(\varphi)]}{2}, \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi; \quad (25)$$

$$M_k^{DE} = 0 \quad (26)$$

Изгибающий момент от силы  $X_i$ , расположенной в своде (участок BCD), определяется в соответствии со схемой, изображенной на рисунке.3.

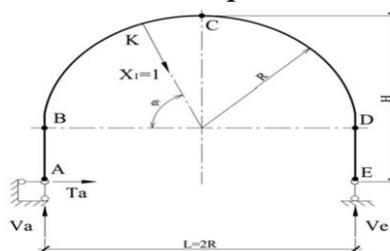


Рис. 3. Схема к определению изгибающего момента от действия силы  $X_i$ , расположенной в своде

$$M_i^{AB} = y \cdot \cos(\alpha), \text{ где } 0 \leq y \leq H - R; \quad (27)$$

$$M_i^{BK} = \cos(\alpha) \cdot [H - R + R \cdot \sin(\varphi)] + R \cdot [1 - \cos(\alpha)] \times \left\{ \sin(\alpha) - \frac{\cos(\alpha) \cdot [H - R + R \cdot \sin(\alpha) + R \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)]}{2 \cdot R} \right\}, \quad (28)$$

где  $0 \leq \varphi \leq \alpha$ ;

$$M_i^{KD} = R \cdot [1 - \cos(\alpha)] \times \left\{ \sin(\alpha) - \frac{\cos(\alpha) \cdot [H - R + R \cdot \sin(\alpha) + R \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)]}{2 \cdot R} \right\},$$

где  $\alpha \leq \varphi \leq \pi$ .

(29)

$$M_i^{DE} = 0. \quad (30)$$

Изгибающий момент от силы  $X_i$ , расположенной на правой стойке (участок DE), определяется в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 4.

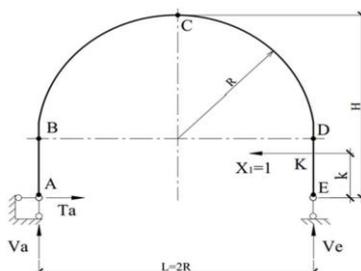


Рис. 4. Схема к определению изгибающего момента от действия силы  $X_i$ , расположенной в правой стойке

$$M_m^{AB} = y, \text{ при } 0 \leq y \leq H-R; \quad (31)$$

$$M_m^{BC} = H - R + R \sin(\varphi) - k \left[ \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \right], \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}; \quad (32)$$

$$M_m^{CD} = H - R + R \sin(\varphi) - k \left[ \frac{1 - \cos(\varphi)}{2} \right], \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi; \quad (33)$$

$$M_m^{DE} = H - R - k - y, \text{ при } 0 \leq y \leq H - R - k; \quad (34)$$

$$M_m^{KE} = 0 \quad (35)$$

Коэффициенты канонических уравнений определяются согласно выражениям (2)-(4). При этом  $ds = dy$  - на прямолинейных участках,  $ds = R d\varphi$  - на криволинейных участках.

Единичное перемещение  $\delta_{ik}$  от действия силы  $X_i = 1$  по направлению действия силы  $X_k$ :

$$\delta_{ik} = \delta_{ik}^{AB} + \delta_{ik}^{BC} + \delta_{ik}^{CD} + \delta_{ik}^{DE} \quad (36)$$

Грузовое перемещение  $\Delta_i$  от действия внешних сил по направлению силы  $X_i$ :

$$\Delta_m^{BC} = \Delta_{ip}^{AB} + \Delta_{ip}^{BC} + \Delta_{ip}^{CD} + \Delta_m^{BE} \quad (37)$$

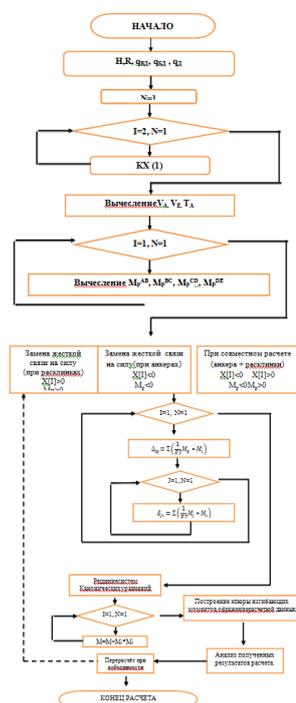
Величина неизвестных сил  $X_i$  определяются решением системы канонических уравнений (2.1).

Изгибающий момент от действия суммарной нагрузки (грузовых сил и дополнительных усиливающих воздействий) в каждой конкретной точке для построения эпюры определяется по формуле (5) следующим образом:

$$M = M_1 \cdot X_1 + M_2 \cdot X_2 + \dots + M_n \cdot X_n + M_p. \quad (38)$$

Блок-схемы вариантов расчетов металлических арочных рамных крепей

Разработанный ранее алгоритм расчета крепи с учетом дополнительных односторонних связей [5, 7] давал возможность рассчитывать или рамно-анкерную крепь, или крепь с расклинивающими элементами. Авторами предложена усовершенствованная блок-схема, дающая возможность комбинировать разные виды управляющих воздействий. Блок-схема расчета рамной крепи с учетом дополнительных односторонних связей (анкерных узлов, расклинивающих элементов, анкерных узлов и расклинивающих элементов) приведена на рисунке 5



**Рис. 5. Блок-схема расчета рамной крепи с учетом дополнительных односторонних связей (анкерных узлов, расклинивающих элементов, анкерных узлов и расклинивающих элементов)**

где  $k, l, m$  - количество связей на левой стойке, в своде и на правой стойке крепи;  $N$  - степень статической неопределенности системы;

$J$  - счетчик цикла;

$KX(I)$  - координаты установки  $I$ -й связи,  $m$  - на стойках крепи, град - в своде крепи;

$V_A, V_E, T_A$  - опорные реакции основной системы расчета, кН;

$\Delta_{1P}$  - перемещение от заданной внешней нагрузки по направлению действия  $I$ -й неизвестной силы;

$\delta_{ij}$  и  $\delta_i$  - перемещения по направлению  $I$ -й связи от единичной силы, приложенной вместо силы  $X_j$ ;

$H$  - высота выработки, м;

$R$  - радиус свода выработки, м;

$Q_{вд}$ ,  $Q_{бд}$ ,  $Q_{д}$  - вертикальная, боковая и дополнительная составляющая нагрузка на раму крепи, кН/м;

$\alpha$  - угол падения пород, град;

$M_I^{AB}$ ,  $M_I^{BC}$ ,  $M_I^{CD}$ ,  $M_I^{DE}$  - изгибающий момент от единичной силы  $X_i$ , приложенной в точке  $I$ -й связи на участках  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$  соответственно, кН.м;

$M_p^{AB}$ ,  $M_p^{BC}$ ,  $M_p^{CD}$ ,  $M_p^{DE}$  - изгибающий момент от действующей внешней нагрузки на участках  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$  соответственно, кН.м;

$M$  - изгибающий момент от действия суммарной нагрузки (грузовых сил и связей) в каждой конкретной точке, кН.м.

Для решения задач, связанных расчетом металлических арочных хвостовых крепей, при силовых воздействиях с целью определения величины напряжения, деформации и смещения крепи исследования проводятся с использованием современной компьютерной программы SolidWorksFlowSimulation.

## REFERENCES

1. Александров, А. В. Соппротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высш. шк., 2000. – 560 с.
2. Бурчаков, Ю. И. Строительная механика / Ю. И. Бурчаков, В. Е. Гнедин, В. М. Денисов. – М. : Высш. шк., 1983. – 255 с.
3. Регламент по креплению и поддержанию капитальных, подготовительных, очистных и разведочных выработок на Холбинском руднике ОАО «Бурятзолото» / ОАО «Бурятзолото». – Екатеринбург : ИГД УрОРАН, 2009. – 133 с.
4. Корнилков, М. В. Основные способы регулирования напряженно-деформированного состояния арочных крепей направленными силовыми воздействиями / М. В. Корнилков // Междунар. конф. «Геомеханика в горном деле – 96»: тезисы докл. – Екатеринбург, 1996. – С. 107–108.
5. Корнилков, М. В. Управление напряженно-деформированным состоянием арочных крепей / М. В. Корнилков // Изв. вузов. Горный журнал. – 1996. – № 12. – С. 52–56.
6. Зигель, Ф. С. Особенности расчета арочной крепи по предельным состояниям / Ф. С. Зигель // Устойчивость и крепление горных выработок : межвуз. сб. – Л., 1980. – Вып. 6. – С. 57–59.
7. Черев, Д. А. Выбор параметров рамно-анкерной крепи на основе исследования закономерностей изменения внутренних усилий: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Черев Дмитрий Алексеевич. – Екатеринбург, 2004. – 161 с.