

РАЦИОНАЛЬНАЯ ФОРМА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

В.В.Смирняков

Устойчивость горных выработок в большой степени зависит от формы их поперечного сечения и соответствующего очертания крепи. Однако это общеизвестное положение часто не учитывается, в результате чего несущая способность крепи используется не полностью.

Металлическая крепь обычно применяется в виде двух-, трех- и четырехшарнирных арок. Ее несущую способность в основном определяют величины изгибающих моментов от действия внешних нагрузок (горного давления), которые в свою очередь зависят от распределения нагрузки по контуру крепи и от ее формы. Распределение нагрузки на крепь обычно характеризуется соотношением вертикальных и горизонтальных нагрузок ( $N = \frac{q_v}{q_r}$ ), которое в каждом конкретном случае может определяться экспериментально по данным натурных инструментальных замеров, т.е. отношение  $N$  при определенных горногеологических условиях поддержания выработки является постоянной величиной. Таким образом, за счет выбора соответствующей формы крепи можно устранить изгибающие моменты в ее сечении. В этом случае материал крепи будет испытывать главным образом сжимающие напряжения и ее несущая способность резко повысится.

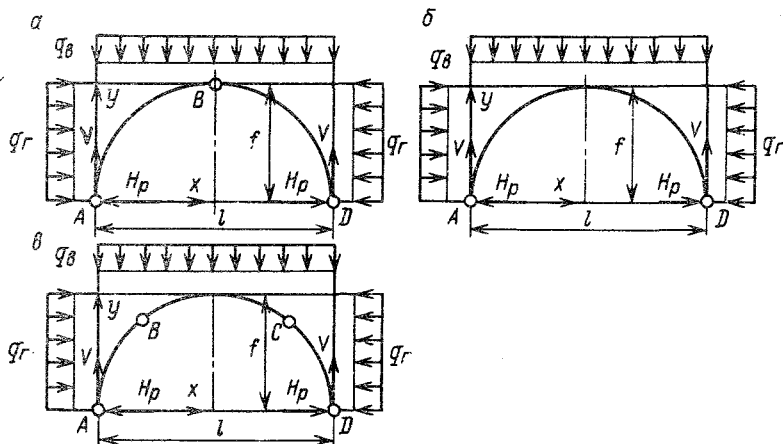


Рис.1. Расчетные схемы трех- (а), двух- (б) и четырехшарнирных (в) конструкций крепи

Для вывода уравнения линии очертания трехшарнирной арочной крепи, при котором в ее сечении отсутствуют изгибающие моменты, принимаем расчетную схему (рис. 1, а). Пролет  $l$  и высота  $f$  арки задаются и равны, соот-

ветственно, ширине и высоте выработки.

Изгибающий момент в произвольном сечении с координатами  $x$ ,  $y$  (начало координат в точке  $A$ ) равен

$$M_x = Vx - \frac{q_B x^2}{2} - \frac{q_T y^2}{2} + H_p y, \quad (1)$$

где  $V$  — вертикальная реакция при симметричной нагрузке  $V = \frac{q_B l}{2}$ ,  $H_p$  — горизонтальный распор.

Горизонтальный распор  $H_p$  определим из условия равенства нулю суммы моментов сил относительно шарнира  $B$

$$H_p = \frac{4q_T f^2 - q_B l^2}{8f} = \left( \frac{4f^2 - Nl^2}{8f} \right) q_T = K q_T. \quad (2)$$

Полагая  $M_x = 0$  по всему периметру арки, подставим равенство (2) в формулу (1). Сделав соответствующие преобразования, получим выражение (3), представляющее собой уравнение эллипса со смещенным центром

$$\frac{N \left( x - \frac{l}{2} \right)^2}{\frac{Nl^2}{4} + K^2} + \frac{(y - K)^2}{\frac{Nl^2}{4} + K^2} = 1. \quad (3)$$

Изгибающий момент в произвольном сечении двухшарнирной (рис. 1,б) и четырехшарнирной (рис. 1,в) арок также определяется выражением (1). Горизонтальный распор в обеих конструкциях крещи определим из условия  $M_x = 0$  при значении  $x = \frac{l}{2}$ ,  $y = f$ . При этом получается то же выражение (2), что и для трехшарнирной арки.<sup>1</sup> Следовательно, при геометрическом очертании контура трех рассматриваемых конструкций крещи, удовлетворяющем уравнению (3), изгибающие моменты по всему ее периметру равны нулю.

При существующей технологии изготовления металлической крещи практически трудно достигнуть того, чтобы фактическое геометрическое очертание ее контура точно соответствовало теоретическому. Сейчас можно лишь поставить задачу возможно большего приближения очертания крещи к кривой, определяющейся выражением (3), что позволит уменьшить изгибающие моменты в сечении крещи, а следовательно, увеличить ее несущую способность.

Металлическая крещь может иметь различную форму. Наиболее часто применяется двухшарнирная трехзвеневая арочная крещь, каждая рама которой состоит из двух стоек и криволинейного верхняка, изготавливаемых из спещирофиля. Стойки в нижней части имеют прямолинейный участок, который при установке крещи может занимать вертикальное положение или отклоняться внутрь выработки на  $5-10^\circ$ . Первая схема установки арочной крещи принята в Донбассе, вторая в Карагандинском бассейне. Технология изготовления этой крещи освоена заводами достаточно хорошо.

<sup>1</sup> Уравнение для двухшарнирной арки выведено автором совместно с к.т.н. А.М.Луценко.

Обе формы крепи рационально применять при больших вертикальных и малых боковых нагрузках. В случае высоких боковых нагрузок большую несущую способность имеет крепь с криволинейными стойками. С точки зрения технологии изготовления наиболее простой является крепь кругового очертания, каждая рама которой состоит из двух взаимозаменяемых стоек и верхняка, имеющих одинаковый радиус кривизны. Элементы крепи кругового очертания могут изготавливаться на станках, которые используются на заводах для изготовления широко применяемой на шахтах арочной трехзвеневой крепи.

Сравним объемы работ и расход материалов для указанных трех конструкций двухшарнирной арочной крепи. В качестве эталона примем выработку сечением в свету  $8,8 \text{ м}^2$  по типовым сечениям Южгипрошахта (рис. 2, а), закрепленную крепью с вертикальными стойками. Размеры поперечного сечения выработок, закрепленных крепью других форм, определим графически с таким расчетом, чтобы зазоры между крепью и подвижным составом были одинаковы для всех рассматриваемых вариантов (рис. 2, б, в).

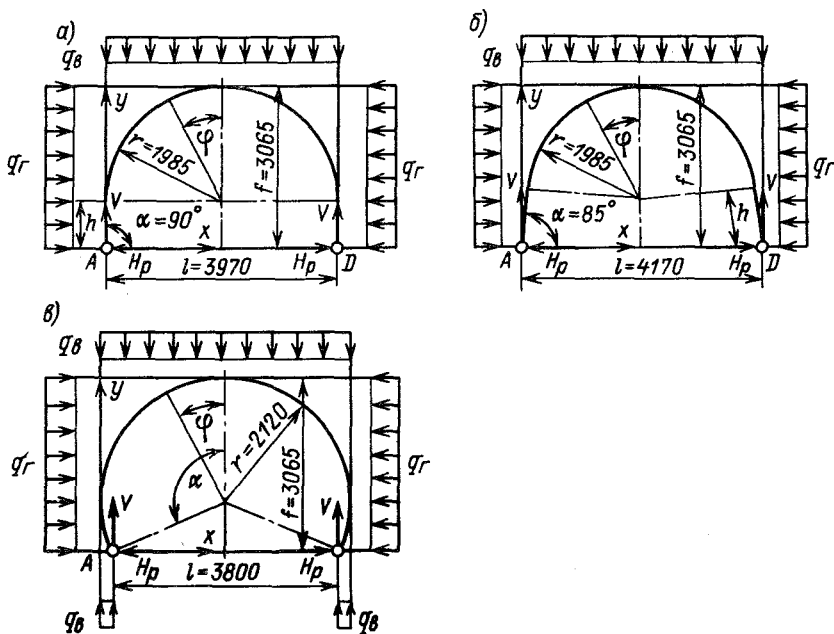


Рис.2. Расчетные схемы двухшарнирной крепи различных форм поперечного сечения

Относительные размеры сечений выработок, закрепленных различными конструкциями двухшарнирной металлической крепи, а также расход материала на ее изготовление следующие:

Форма крепи	С вертикальными стойками (рис. 2,а)	Со стойками под углом $35^\circ$ к горизонтали (рис. 2.б)	Кругового очертания (рис. 2,в)
Сечение выработки, %	100,0	101,4	102,6
Расход металла, %	100,0	100,4	102,5

Из приведенных данных видно, что сравниваемые варианты по объемам работ и расходу крепежных материалов отличаются весьма незначительно. Следовательно, первоначальные затраты на проведение выработок при условии одинакового расстояния между рамами крепи для всех трех вариантов будут примерно одинаковыми.

Рассмотрим теперь вопрос об изменении несущей способности крепи в зависимости от ее формы. Все три конструкции представляют собой двухшарнирные арки, являющиеся статически неопределимыми системами. Для расчета их несущей способности в строительной механике используется метод сил [1, 2, 3].

Обычно расчет производится в следующей последовательности. Ось арки разбивается на 6-8 участков и устанавливаются координаты сечений на их границах. Затем во всех сечениях определяются изгибающие моменты  $M_{p_x}$  от внешних нагрузок (горного давления) и (по формулам приближенного интегрирования) горизонтальный распор  $H_p$ . Зная  $M_{p_x}$  и  $H_p$ , можно определить истинные значения изгибающих моментов во всех сечениях. Далее из сравнения истинных величин изгибающих моментов находится его максимальное по абсолютной величине значение, по которому с учетом продольной силы определяется несущая способность крепи.

Такая методика достаточно трудоемка и приближенна.

Для упрощения и повышения точности предлагается другой способ расчета металлической двухшарнирной крепи, в основу которого положен метод сил. Однако горизонтальный распор определяется по формулам, выведенным для указанных на рис. 2 форм крепи, а ее несущая способность - по значениям максимального изгибающего момента и продольной силы в сечениях, координаты которых предварительно определяются аналитически.

Первоначально рассчитываем крепь на единичные внешние нагрузки. При этом вертикальная нагрузка  $q_B$  принимается за единицу, а горизонтальная

$$q_H = n q_B ,$$

где  $n$  - отношение горизонтальной нагрузки к вертикальной.

Основную систему получаем заменой в заданной арке одной из неподвижных опор подвижной. Отличие основной системы от заданной устраняем приложением горизонтального распора  $H_{p_1}$ , величина которого находится из канонического уравнения

$$\delta_{11} H_{p_1} + \Delta_{1p} = 0$$

по формуле

$$H_{p_1} = - \frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} . \quad (4)$$

При определении по формуле (4) горизонтального распора в металлической арочной крепи можно пренебречь влиянием продольных и поперечных сил. С учетом этого

$$\Delta_{1p} = \int_0^s \frac{M_p M_1}{EI} ds ,$$

$$\delta_{11} = \int_0^s \frac{M_1^2}{EI} ds ,$$

где  $M_p, M_1$  - изгибающие моменты, соответственно, от внешних нагрузок и от силы  $H_{p1} = 1$ ;  $E$  - модуль упругости материала крепи;  $I$  - момент инерции сечения спецпрофиля.

Момент  $M_1$  в сечении арки с координатами  $x, y$  равен

$$M_{1x} = 1y .$$

Учитывая вышеизложенное, выражение (4) можно представить в виде

$$H_{p1} = \frac{\int_0^s M_p y ds}{\int_0^s y^2 ds} . \quad (5)$$

Моменты от внешних сил в каждом сечении арки основной системы при  $q_B = 1$  находятся из выражения

$$M_{px} = \frac{lx}{2} - \frac{x^2}{2} - \frac{q_T y^2}{2} . \quad (6)$$

Определим  $H_{p1}$  для арочной крепи с наклонными стойками (рис. 2,б).

Для прямолинейной части стойки  $x = y \operatorname{ctg} \alpha$ , и выражение (6) может быть представлено в виде

$$M_{px} = \frac{l}{2} y \operatorname{ctg} \alpha - \frac{y^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{2} - \frac{q_T y^2}{2} , \quad (7)$$

$$\int_0^{h \sin \alpha} M_p y ds = \frac{lh^3 \sin 2\alpha}{12} - \frac{h^4 \sin 2\alpha \cos \alpha}{16} - \frac{q_T h^4 \sin^3 \alpha}{8} , \quad (8)$$

где

$$ds = \frac{dy}{\sin \alpha} .$$

Криволинейные части стоек и верхняя рассматриваемой крепи очерчены по дуге радиусом  $r$  с центральным углом  $2\alpha$ . Значения  $x$  и  $y$  выразим в полярной системе координат

$$x = \frac{l}{2} - r \sin \varphi ,$$

$$y = h \sin \alpha - r \cos \alpha + r \cos \varphi = \kappa + r \cos \varphi .$$

Для криволинейной части периметра крещи выражение (6) представим в виде

$$M_{p_x} = \frac{l^2}{8} - \frac{r^2 \sin^2 \varphi}{2} - \frac{q_r k^2}{2} - q_r k r \cos \varphi - \frac{q_r r^2 \cos^2 \varphi}{2}, \quad (9)$$

$$\int_0^\alpha M_p y ds = \alpha \frac{k r l^2}{8} - \alpha \frac{k r^3}{4} + \frac{k r^3 \sin 2\alpha}{8} - \alpha \frac{q_r k^3 r}{2} -$$

$$- \frac{3 q_r k^2 r^2 \sin \alpha}{2} - \alpha \frac{3 q_r k r^2}{4} - \frac{3 q_r k r^3 \sin 2\alpha}{8} + \frac{r^2 l^2 \sin \alpha}{8} -$$

$$- \frac{r^4 \sin^3 \alpha}{6} - \frac{q_r r^4 \sin \alpha}{2} + \frac{q_r r^4 \sin^3 \alpha}{6}, \quad (10)$$

где  $ds = r d\varphi$ .

Сложив выражения (8) и (10) и произведя соответствующие преобразования, получим значение числителя выражения (5)

$$\int_0^s M_p y ds = -\frac{1}{2} (A + q_r B),$$

где

$$A = \frac{\sin 2\alpha}{2} \left( \frac{h^4 \cos \alpha}{4} - \frac{l h^3}{3} - \frac{k r^3}{2} \right) - \alpha \frac{k r}{2} \left( \frac{l^2}{2} - r^2 \right) -$$

$$- r^2 \sin \alpha \left( \frac{l^2}{2} - \frac{r^2 \sin^2 \alpha}{3} \right);$$

$$B = \sin^3 \alpha \left( \frac{h^4}{4} - \frac{r^4}{3} \right) + r^2 \sin \alpha \left( 3k^2 + \frac{3k \cos \alpha}{2} + r^2 \right) + \alpha k r \left( k^2 + \frac{3r^2}{2} \right).$$

Знаменатель выражения (5) получим интегрируя  $y^2 ds$  в пределах прямолинейного и криволинейного частей периметра крещи

$$\int_0^s y^2 ds = \alpha k^2 r + 2kr^2 \sin \alpha + \frac{r^2}{2} \left( \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) + \frac{h^3 \sin^2 \alpha}{3} = c.$$

Таким образом, горизонтальный распор в рассматриваемой конструкции крещи (рис. 2,б) можно определить по формуле

$$H_{p_1} = \frac{A + q_r B}{2c}. \quad (11)$$

Для крещи, прямолинейные части стоек которой устанавливаются вертикально (рис. 2,а),  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $k = h$

$$A = -\frac{\pi}{4} h r^3 - \frac{2}{3} r^4 = -r^3 \left( \frac{\pi}{4} h + \frac{2}{3} r \right) ,$$

$$B = \frac{h^4}{4} + \frac{2}{3} r^4 + 3h^2 r^2 + \frac{\pi}{2} h r \left( h^2 + \frac{r^2}{2} \right) ,$$

$$C = \frac{\pi}{2} r \left( h^2 + \frac{r^2}{2} \right) + 2hr + \frac{h^3}{3} .$$

Для определения несущей способности крепи необходимо найти опасное сечение, в котором будут максимальные напряжения в металле. В сечениях арки имеет место сложное напряженное состояние — сжатие с изгибом. Напряжения в этом случае определяются по формуле

$$\sigma = \frac{M_x}{W} + \frac{N_x}{F} , \quad (12)$$

где  $M_x, N_x$  — соответственно, изгибающий момент и продольная сила в произвольном сечении;  $W, F$  — соответственно, момент сопротивления и площадь сечения спещпрофиля.

В зависимости от соотношения внешних нагрузок и геометрических размеров крепи опасное сечение может быть как на прямолинейном, так и на криволинейном участке периметра крепи. В последнем случае изгибающий момент и продольная сила в произвольном сечении определяются по формулам

$$M_x = M_{p_x} + H_{p_1} y = \frac{l x}{2} - \frac{x^2}{2} - \frac{q_{\Gamma} y^2}{2} + H_{p_1} y , \quad (13)$$

$$N_x = x \sin \varphi - \frac{l}{2} \sin \varphi - q_{\Gamma} y \cos \varphi + H_{p_1} \cos \varphi . \quad (14)$$

Подставив выражения (13) и (14) в формулу (12), заменив декартовы координаты на полярные (возьмем  $\frac{d\sigma}{d\varphi}$ ) и приравняв выражение к нулю, найдем сечения с экстремальными напряжениями. В нашем случае на криволинейной части арки будут два таких сечения с координатами

$$\varphi_0 = \arccos \frac{(q_{\Gamma} k - H_{p_1}) \left( \frac{r}{W} + \frac{1}{F} \right)}{r(1 - q_{\Gamma}) \left( \frac{r}{W} + \frac{2}{F} \right)} , \quad (15)$$

$$\varphi_0 = 0 \quad (16)$$

Действительное сечение арки с максимальным напряжением можно найти по знаку  $\frac{d^2 \sigma}{d^2 \varphi}$  или вычислить напряжения в обоих сечениях, подставив в формулы (12), (13) и (14) координаты, определяющиеся выражениями (15) и (16).

В формуле (15) величины  $\frac{1}{F}$  и  $\frac{2}{F}$  весьма малы по сравнению с величиной  $\frac{r}{W}$ , и поэтому при расчетах ими можно пренебречь. В связи с этим формула (15) приобретает более простой вид

$$\varphi_0 = \arccos \frac{q_r k - H_{p_1}}{r(1 - q_r)} \quad (17)$$

Такой же вид будет иметь формула, если сечение с экстремальной величиной определить по производной от изгибающего момента  $\frac{dM_x}{d\varphi} = 0$ .

На прямолинейной части стойки изгибающий момент и продольная сила определяются по формулам

$$M_x = M_{p_x} - H_{p_1} y = \frac{l}{2} y \operatorname{ctg} \alpha - \frac{y^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{2} - \frac{q_r y^2}{2} + H_{p_1} y, \quad (18)$$

$$N_x = y \cos \alpha - \frac{l}{2} \sin \alpha - q_r y \cos \alpha + H_{p_1} \cos \alpha \quad (19)$$

Подставим формулы (18) и (19) в выражение (12) и определим координату опасного сечения по производной  $\frac{d\sigma}{dy} = 0$

$$y_0 = \frac{F \left( \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \alpha + H_{p_1} \right) + W \cos \alpha (1 - q_r)}{F (\operatorname{ctg}^2 \alpha + q_r)} \quad (20)$$

Для крепи при  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 2, а)

$$y_0 = \frac{H_{p_1}}{q_r} \quad (21)$$

Таким образом, для нахождения опасного сечения в металлических арках, формы которых показаны на рис. 2а, б, необходимо по формулам (16), (17), (20) и (21) определить координаты трех сечений, а затем вычислить в них напряжения. Сечение, в котором напряжение по абсолютной величине максимальное, является опасным.

Несущая способность одной арки определяется достижением в материале крепи напряжений, равных пределу текучести (для ст. 5  $\sigma_T = 2800 \text{ кг/см}^2$ ),

$$q_{\text{в. нес}} = \frac{\sigma_T}{\frac{|M|}{W} + \frac{|N|}{F}} \quad (22)$$

где  $M$  и  $N$  — абсолютные значения, соответственно, момента и продольно й силы в опасном сечении.

Для крепи кругового очертания (рис. 2, в)

$$x = r(\sin \alpha - \sin \varphi); \quad y = r(\cos \varphi - \cos \alpha).$$

Преобразованное выражение (6) для крепи этой формы можно представить в виде

$$M_{p_x} = \frac{r^2}{2} (\sin^2 \alpha - \sin^2 \varphi) - \frac{q_r r^2}{2} (\cos \varphi - \cos \alpha)^2.$$

Подставив в выражение (5) значения величин, проинтегрировав его и проведя соответствующие преобразования, получим формулу для определения горизонтального распора в крепи кругового очертания

$$H_{p_1} = \frac{r(A_1 + q_r B_1)}{C_1},$$

где

$$A_1 = \frac{2}{3} \sin^3 \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \left( \alpha \sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{2} \right) + \frac{\alpha}{2} \cos \alpha;$$

$$B_1 = \frac{\sin^3 \alpha}{3} - \frac{3}{4} \sin 2\alpha \cos \alpha - \sin \alpha + \alpha \cos^3 \alpha + \frac{3}{2} \alpha \cos \alpha;$$

$$C_1 = \frac{3}{2} \sin 2\alpha - \alpha - 2\alpha \cos^2 \alpha.$$

Точки, подозрительные на экстремум, будут в двух сечениях периметра крепи с координатами, соответственно,  $\varphi_0 = 0$  и

$$\varphi_0 = \arccos \frac{q_r r \cos(180 - \alpha) - H_{p_1}}{r(1 - q_r)}.$$

Несущая способность крепи рассчитывается аналогично по формуле (22).

Используя вышеприведенную методику, рассчитаем все три варианта двухшарнирной крепи.

Основные геометрические размеры сравниваемых видов крепи и их расчетные схемы приведены на рис. 2. Несущая способность крепи определена при симметричной равномернораспределенной нагрузке с учетом изготовления из спецпрофиля СВП - 27.

На рис. 3 показана зависимость несущей способности крепи от соотношения  $\frac{q_r}{q_b}$ . Номера кривых на графиках рис. 3 соответствуют номерам расчетных схем рис. 2.

Как видно из расчета, при малых боковых нагрузках ( $\frac{q_r}{q_b} < 0,6$ ) наиболее высокую несущую способность имеет крепь с наклонными стойками и наименьшую — кругового сечения. При соотношении  $\frac{q_r}{q_b} = 0,6 \div 0,8$  наибольшей несущей способностью обладает крепь с вертикальными стойками, меньшей — крепь с наклонными стойками. При  $\frac{q_r}{q_b} > 0,8$  наиболее высокой несущей способностью обладает крепь кругового очертания. Особенно значительно увеличивается несущая способность крепи кругового очертания при боковых нагрузках, превосходящих вертикальные. Так, при соотношении горизонтальной и вертикальной

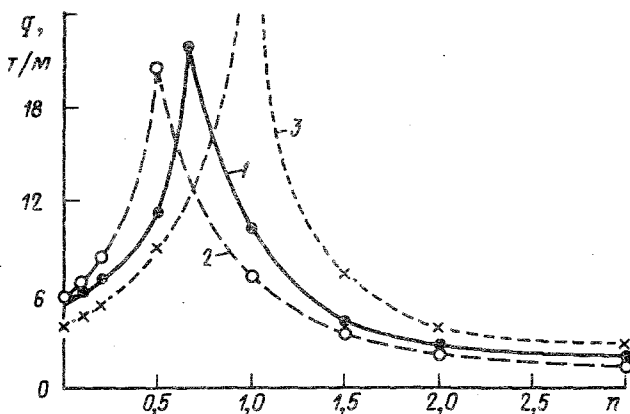


Рис.3. Зависимость несущей способности двухъярусной крепи от ее формы и соотношения горизонтальных и вертикальных нагрузок: 1 - с вертикальными стойками; 2 - с наклонными стойками; 3 - кругового очертания

нагрузок 1,5 и 2,0 ее несущая способность, соответственно, на 80 и 40% выше крепи с прямолинейными стойками, а при  $\frac{q_r}{q_v} = 1$  несущая способность крепи кругового очертания, определенная по нормальным силам, в десятки раз выше.

Примерно такая же количественная закономерность изменения несущей способности крепи в зависимости от соотношения нагрузок и ее геометрического очертания наблюдается и при других размерах поперечного сечения выработок.

#### Выводы

1. Применение в подготовительных выработках металлической крепи геометрического очертания, наиболее отвечающего конкретным условиям, дает большой экономический эффект за счет повышения несущей способности крепи и снижения расхода материалов на ее изготовление.
2. Трехъярусную металлическую арочную крепь, которая в настоящее время является основным видом крепи в горизонтальных выработках, целесообразно применять при небольших горизонтальных нагрузках, не превышающих 70-80% от вертикальных.
3. При боковых нагрузках, особенно преобладающих над вертикальными, следует применять крепь кругового очертания, имеющую значительно большую несущую способность по сравнению с арочной трехъярусной при почти равных объемах работ и расходах крепёжных материалов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Горное дело. Энциклопедический справочник. Т. 1. Углетехиздат, 1958.
2. К а ц а у р о в И.Н. Расчеты крепи горных выработок. Изд. МИРГЭМ, 1964.
3. К а ц а у р о в И.Н. Некоторые задачи по механике горных пород и расчетам крепи. Изд. МГИ, 1968.