

# РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛЕННОЙ КРЕПИ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ «БОГДАНОВСКОГО СБРОСА»

А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, А.Е. Нечитайло, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина

В статье приведен анализ напряженно-деформированного состояния крепи, предназначенной для поддержания откаточного квершлага пл. С<sub>10</sub><sup>В</sup> шахты «Самарская» в опасной зоне тектонического нарушения «Богдановский сброс». Рассмотрены различные варианты крепи, в том числе комбинированная двуслойная крепь и крепь с обратным сводом. Определены изгибающие моменты в элементах крепи при различных значениях внешней нагрузки, а также получена оптимальная стрела прогиба обратного свода из специального профиля СВП 27. Определены параметры комбинированной двуслойной крепи.

Низкая прочность вмещающих пород и значительная нарушенность породного массива, в котором проводится откаточный квершлаг пл. С<sub>10</sub><sup>В</sup> шахты «Самарская» при пересечении опасной зоны тектонического нарушения «Богдановский сброс», приводит к формированию большой нагрузки на крепь указанной выработки. Кроме того, по всей трассе проведения квершлага ожидается пучение пород со стороны почвы. В связи с этим возникла необходимость разработки варианта усиленной крепи, создающей достаточный отпор в зоне повышенного горного давления.

В соответствии с паспортом, разработанным техническим отделом ШУ «Терновское», предполагается до подхода к границе опасной зоны сброса крепить квершлаг стандартной крепью КШПУ-М 11,7. Непосредственно в опасной зоне планируется установка двуслойной крепи с обратным сводом (КШПУ-М 14,4 + КШПУ-М 11,7) с заполнением бетоном приконтурного пространства.

**Целью исследования** является анализ напряженно-деформированного состояния крепи КШПУ-М 14,4, составной крепи из КШПУ-М 14,4 + КШПУ-М 11,7, а так же обратного свода крепи из профиля СВП 27.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследования**:

- определение зависимости максимальных изгибающих моментов в элементах крепи КШПУ-М 14,4 от величины нагрузки на крепь;
- определение зависимости максимальных изгибающих моментов в элементах составной крепи КШПУ-М 14,4 + КШПУ-М 11,7 от величины нагрузки на крепь;
- определение зависимости максимальных изгибающих моментов в элементах крепи обратного свода из специального профиля СВП 27 от стрелы прогиба;

**Объектом исследования** является напряженно-деформированное состояние крепи КШПУ из спецпрофиля СВП 27 с шагом 0,75м на основных участках (см. рис. 1а) и двуслойной крепи в пределах сброса (см. рис. 1б). Составная крепь имеет внешнюю металлическую арку КШПУ сечением в свету 15,1м<sup>2</sup> и внутреннюю – 13,7м<sup>2</sup> [1]. Обе арки связаны в единую систему многошарнирными связями с последующим заполнением пространства между ними бетоном.

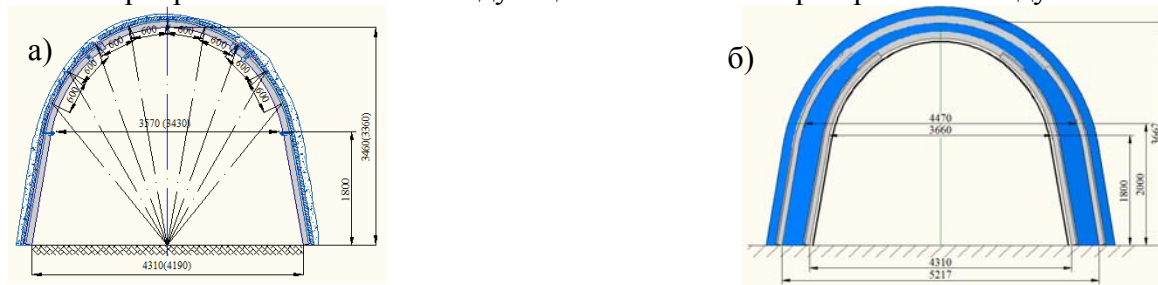


Рис. 1. Геометрические характеристики сечения выработки: а) КШПУ-М 11,7; б) КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4.

Общий вид сечения профиля приведен на рис. 2.

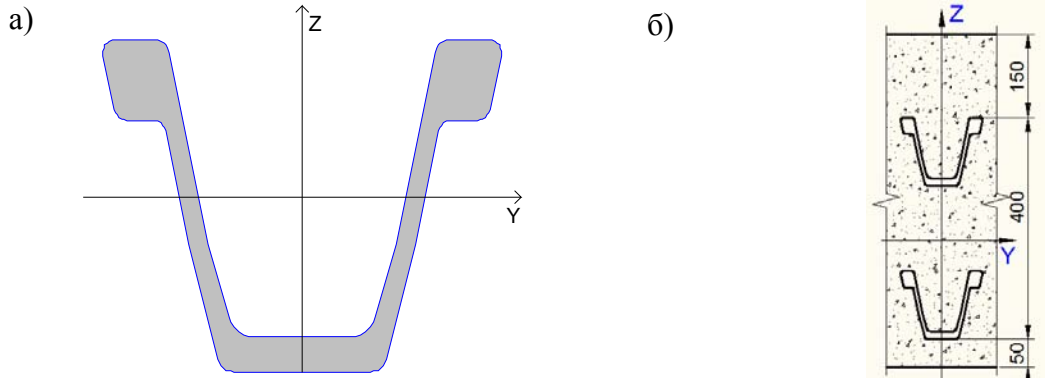


Рис. 2. Общий вид сечения профиля: а) КШПУ-М 11,7 – СВП 27 (габариты 0,147x0,123м); б) КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4 – 2xСВП 27 (габариты 0,147x0,4м)

Материал конструкции – Ст5сп/пс (по ГОСТ 18622-83;  $R_y=255-295$ МПа – предел текучести) [2]. Коэффициент условий работы  $\gamma_c = 0,7$  [3].

**Рабочее сопротивление** крепи КШПУ-М11,7 составляет  $P_{\text{рабоч}} = 270$ кН/арку (27,523т/арку); погонная нагрузка на конструкцию  $q_{\text{рабоч}} = \frac{P_{\text{рабоч}}}{L} = 28,8$ кН/м=2,94т/м [1].

**Предельная несущая способность** крепи КШПУ-М11,7 составляет  $P_{\text{предел}} = 589$ кН/арку=60,04т/арку (погонная нагрузка на конструкцию  $q_{\text{предел}} = \frac{P_{\text{предел}}}{L} = 62,82$ кН/м=6,41т/м) [1].

Расчетные схемы крепи приведены на рис. 3.

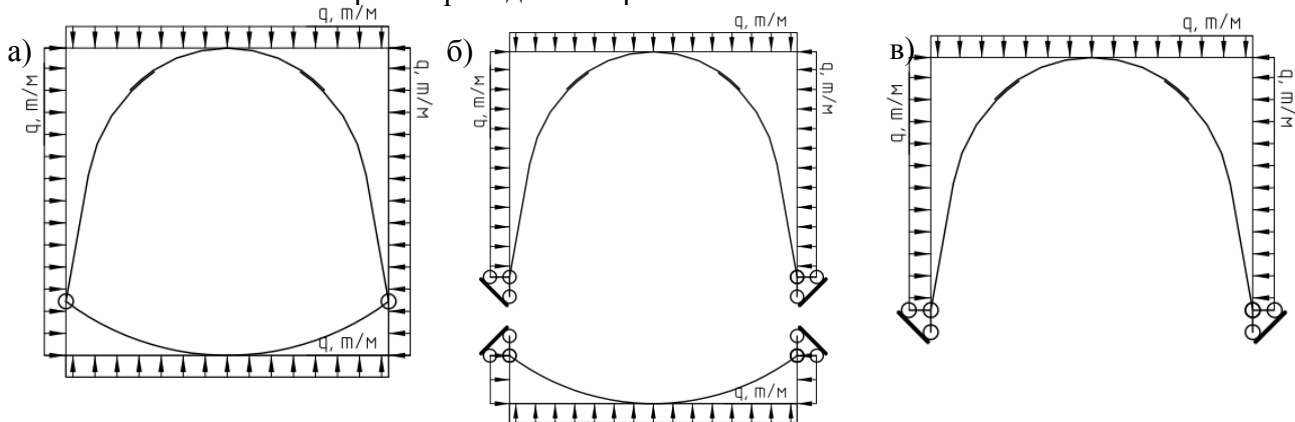


Рис. 3. Расчётная схема крепи: а) I этап – расчетная схема с обратным сводом совместно; б) II этап – расчетные схемы арочной крепи и обратного свода отдельно; в) III этап – расчетная схема арочной крепи.

Определение внутренних усилий в элементах крепи выполнялось методом конечных элементов в расчетном комплексе «SCAD-office» по расчетной схеме III-го этапа (см. рис. 3в). Нагрузка согласно расчетной схеме прикладывалась, как равномерно распределенная по всему контуру крепи (см. рис. 3в) [4, 5]. В опорах прикладывалась нагрузка вида «заданное перемещение» в диапазоне от 1см до 30см (см. рис. 4). Величина перемещений 0,3м продиктована наличием пучения в существующей части выработки.

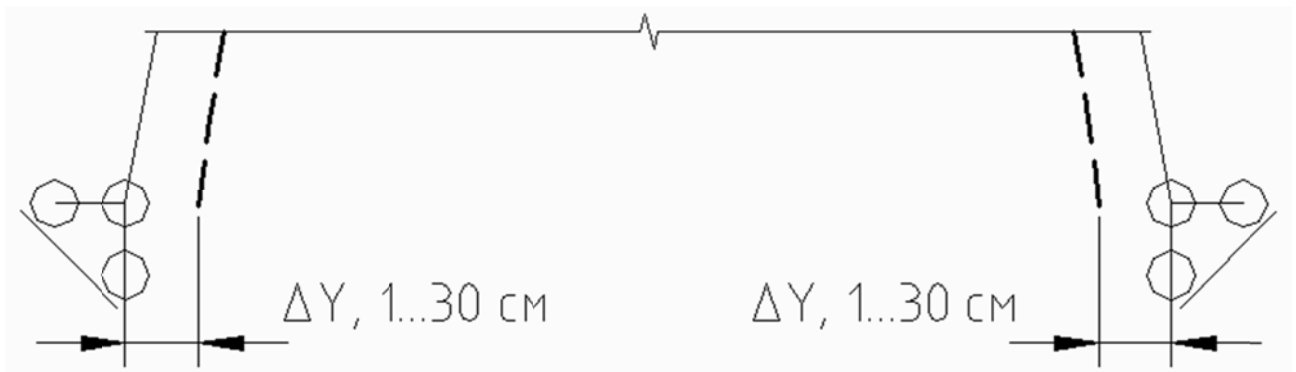


Рис. 4. Нагрузка вида «заданное перемещение».

Податливость замка соединения арочного элемента и элемента стойки крепи моделировалась путем введения так называемых «супер-элементов» конечной жесткости, которые допускали упругую податливость в замке при возрастании продольной силы до 200кН. Фрагмент расчетной схемы замка крепи приведен на рис. 5.

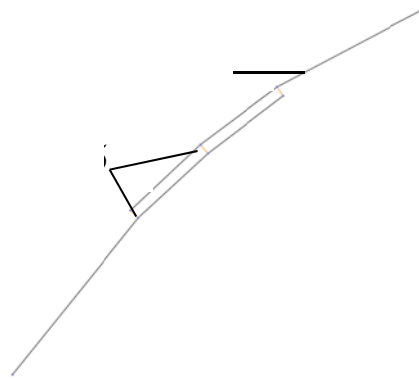


Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы замка крепи: а – конечный элемент, моделирующий профиль СВП-27; б – «супер-элемент» с упругой податливостью.

В результате расчета получены внутренние усилия: изгибающий момент –  $M$ , продольная сила –  $N$ , поперечная сила –  $Q$ . Так же получены перемещения узлов и элементов расчетной схемы.

Элементы крепи подвержены воздействию осевой сжимающей силы с изгибом. Расчет на прочность сжато-изгибаемого элемента, согласно требований ДБН В.2.6-163:2010 «Сталеві конструкції» п. 1.6.1.1 необходимо выполнять по следующей формуле:

$$\left( \frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, \min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где:

$N$ ,  $M_x$  и  $M_y$  – абсолютные значения соответственно продольной силы и изгибающих моментов при наиболее неблагоприятной комбинации расчетных нагрузок;

$n$ ,  $c_x$ ,  $c_y$  – коэффициенты, которые принимаются согласно приложения Н ДБН В.2.6-163:2010 в зависимости от формы поперечного сечения и отношения площадей полки и стенки;

$W_{xn, \min}$  – минимальное из двух значений моментов сопротивления поперечного сечения элемента «нетто» относительно оси  $x-x$ , вычисленных соответственно для растянутого и сжатого волокна;

$W_{yn, \min}$  – то же относительно оси  $y-y$ .

Поскольку конструкция крепи предполагает раскрепление рам шахтной затяжкой по всему контуру, изгибающие моменты из плоскости и потеря устойчивости из плоскости исключены.

В плоскости действия силы крепь имеет плотное прилегание к породному массиву по всему контуру, поэтому потеря устойчивости элементов крепи исключена.

Расчет на прочность крепи примет вид:

$$\frac{M_{\max}}{c_x W_{xn,\min}} \leq R_y \gamma_c, \quad (2)$$

где:

$R_y$  – расчетное сопротивление при упругой работе стали;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы крепи.

Предельный изгибающий момент, при котором произойдет исчерпание несущей способности [7] составит:

$$M_{cr} = R_y \gamma_c c_x W_{xn,\min} = 255 \times 10^2 \times 0,7 \times 1,6 \times 98,756 \times 10^{-6} = 2,82 \text{ м} \times \text{м} \quad (3)$$

Предельное взаимное смещение элементов в замке крепи составляет  $\Delta Z_{\max} = 0,3 \text{ м}$ .

Предельное перемещение опорных узлов крепи принято равным  $\Delta Y_{\max} = 0,3 \text{ м}$ .

Зависимости максимального изгибающего момента ( $M_{\max}$ ) в элементах крепи и взаимного смещения элементов в замке крепи ( $\Delta Z$ ) от величины смещения опорных узлов ( $\Delta Y$ ) приведена на рис. 6 для рабочего сопротивления крепи ( $q=2,94 \text{ т/м}$ ) и на рис. 7 для предельной несущей способности крепи ( $q=6,41 \text{ т/м}$ ).

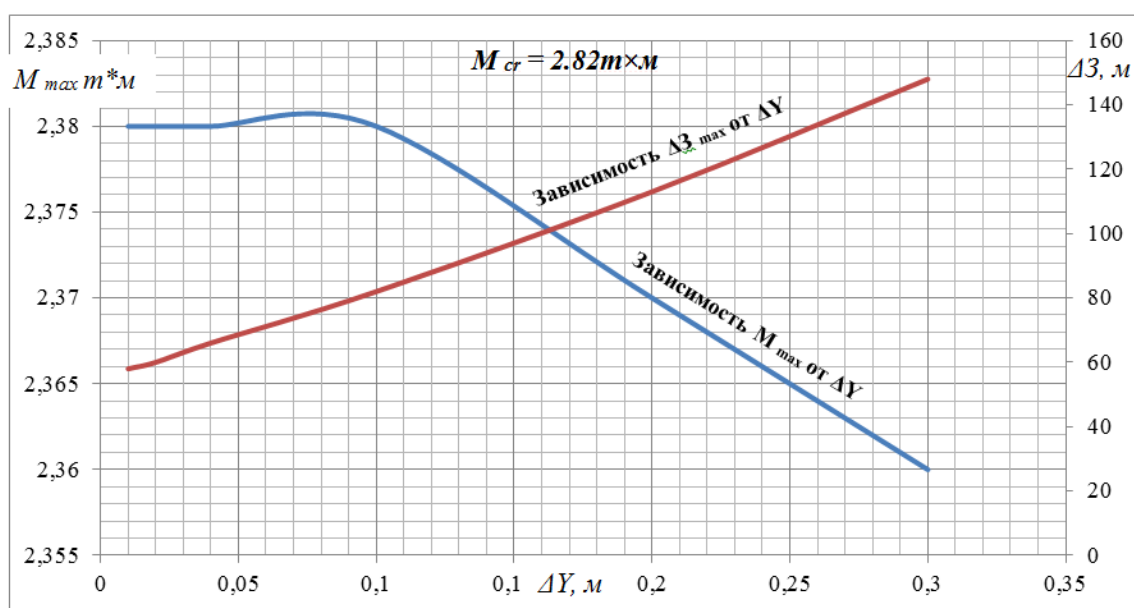


Рис. 6. Зависимости  $M_{\max}$  в элементах крепи от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  крепи и взаимного смещения элементов в замке крепи  $\Delta Z$  от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  для рабочего сопротивления крепи ( $q=2,94 \text{ т/м}$ ).

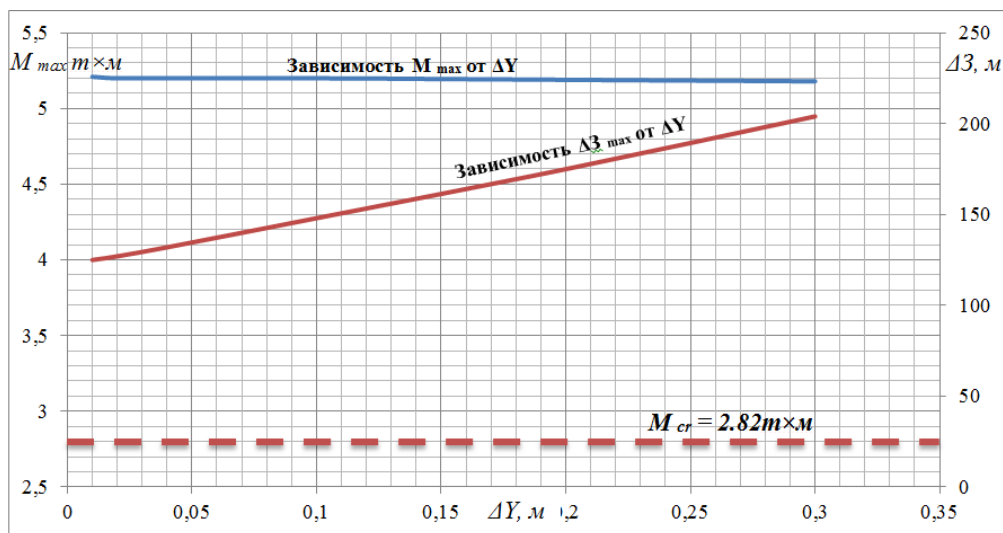


Рис. 7. Зависимости  $M_{\max}$  в элементах крепи от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  крепи и взаимного смещения элементов в замке крепи  $\Delta 3$  от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  для предельной несущей способности крепи ( $q=6,41\text{т/м}$ ).

Предельный изгибающий момент, при котором произойдет исчерпание несущей способности крепи КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4 составит:

$$M_{cr} = R_y \gamma_c c_x W_{xn, \min} = 255 \times 10^2 \times 0,7 \times 1,6 \times 737,737 \times 10^{-6} = 21,07 \text{ т} \times \text{м} \quad (4)$$

Предельное взаимное смещение элементов в замке крепи  $\Delta 3_{\max}$  и предельное перемещение опорных узлов крепи  $\Delta Y_{\max}$  аналогичны значениям для одной КШПУ-М 11,7 и составляют  $0,3\text{м}$ . Зависимости максимального изгибающего момента ( $M_{\max}$ ) в элементах крепи и взаимного смещения элементов в замке крепи ( $\Delta 3$ ) от величины смещения опорных узлов ( $\Delta Y$ ) приведены на рис. 8 для нагрузки  $q=2,94\text{т/м}$  и на рис. 9 для нагрузки  $q=6,41\text{т/м}$ .

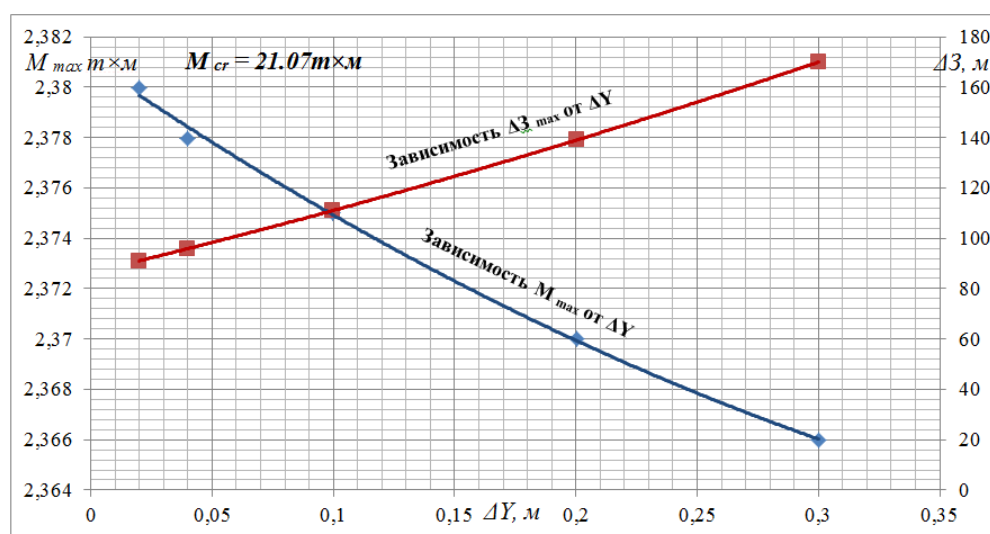


Рис. 8. Зависимости  $M_{\max}$  в элементах крепи КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4, а также взаимного смещения элементов в замке крепи  $\Delta 3$  от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  при нагрузке  $q=2,94\text{т/м}$ .

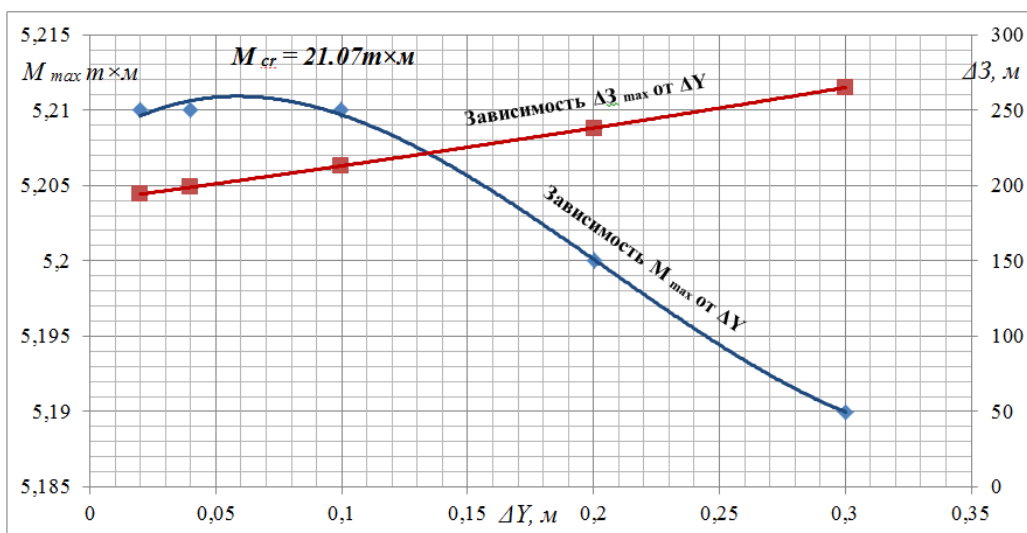


Рис. 9. Зависимости  $M_{\max}$  в элементах крепи КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4, а также взаимного смещения элементов в замке крепи  $\Delta 3$  от величины смещения опорных узлов  $\Delta Y$  при нагрузке  $q=6,41 \text{ т/м}$ .

Профиль конструкции крепи обратного свода из спецпрофиля СВП 27 и общий вид крепи КШПУ-М 11,7 с обратным сводом приведены на рис. 10. Расчетная схема обратного свода приведена на рис. 11.

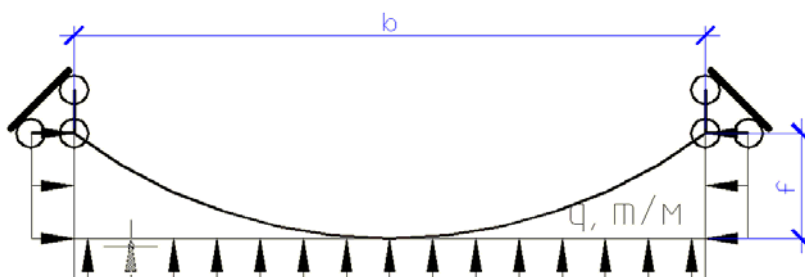
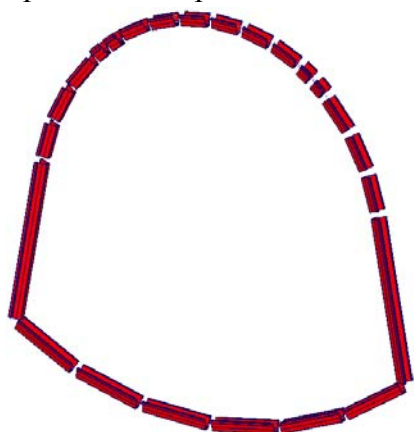


Рис. 10. Крепь КШПУ-М 11,7 с обратным сводом.

Рис. 11. Расчетная схема:  $f$  – стрела прогиба, м;  $b$  – ширина крепи, м.

Стрела прогиба  $f$  варьировалась в диапазоне:  $f=(1/4 \dots f=1/10)b$ , в расчете использованы значения:  $f=1/4b$ ;  $f=1/5b$ ;  $f=1/6b$ ;  $f=1/7b$ ;  $f=1/8b$ ;  $f=1/10b$ .

Нагрузка в расчетной схеме прикладывалась как и в предыдущих расчетах в виде равномерно распределенной по всему контуру, равной двум значениям  $q=2,94 \text{ т/м}$  и  $q=6,41 \text{ т/м}$  (аналогично рис. 3). В опорах также прикладывалась нагрузка вида «заданное перемещение» в диапазоне от 1 см до 30 см (см. рис. 4). Зависимости максимального изгибающего момента ( $M_{\max}$ ) в элементах обратного свода крепи от стрелы прогиба крепи ( $f$ ) представлены рис. 12 и 13. Предельный изгибающий момент, при котором произойдет исчерпание несущей способности профиля СВП 27 определен выше по формуле (3) и равен  $M_{cr} = 2,82 \text{ т}\cdot\text{м}$ .

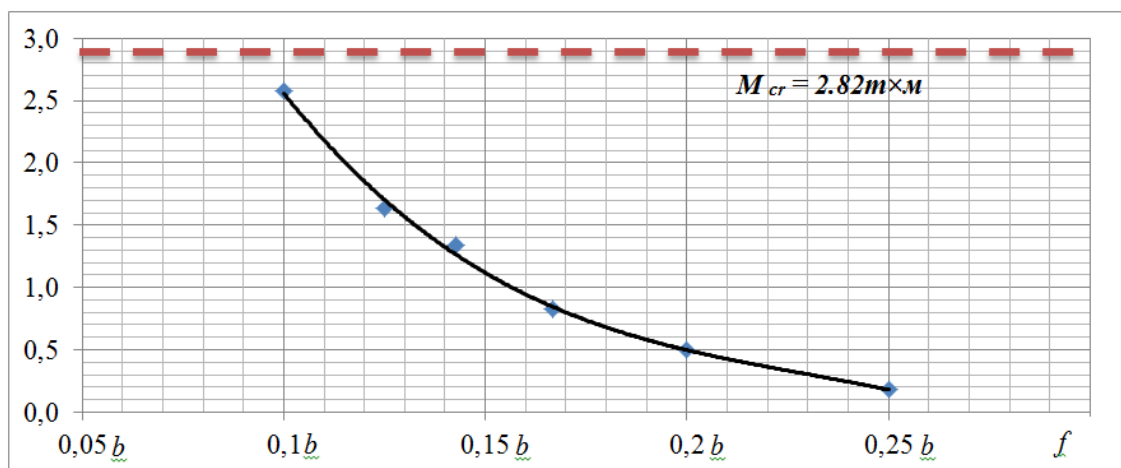


Рис. 12. Зависимость максимального изгибающего момента ( $M_{max}$ ) крепи от стрелы прогиба крепи ( $f$ ) при нагрузке  $q=2,94t/m$ .

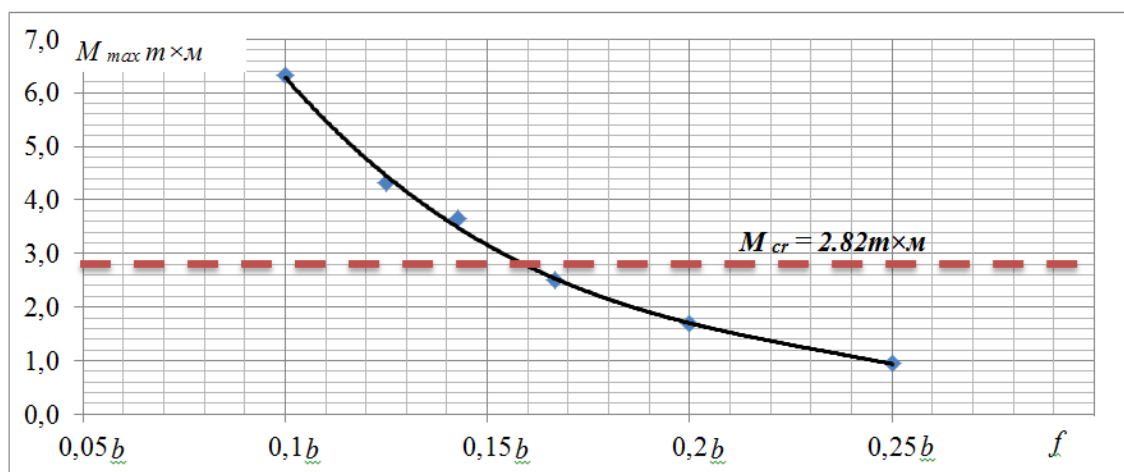


Рис. 13. Зависимость максимального изгибающего момента ( $M_{max}$ ) крепи от стрелы прогиба крепи ( $f$ ) при нагрузке  $q=6,41t/m$ .

Анализ изменения максимального изгибающего момента ( $M_{max}$ ) в элементах обратного свода крепи в зависимости от стрелы прогиба крепи ( $f$ ) показало, что с увеличением стрелы прогиба максимальный изгибающий момент уменьшается. Для стрел прогиба, больших  $f=1/6b$ , максимальные изгибающие моменты не достигают предельного значения ( $2,82t \times m$  для профиля СВП 27). Поэтому оптимальной можно полагать стрелу прогиба обратной арки близкой к значению  $f=1/6b$ .

Выводы:

1. Максимальный изгибающий момент в элементах крепи КШПУ-М 11,7 от нагрузки, равной паспортному **рабочему сопротивлению крепи** ( $P_{рабоч}=27,5t/арку$  или распределенная по периметру арки  $q=6,41t/m$ ), составляет  $2,38t \times m$ , что не превышает 80% предельного изгибающего момента ( $2,82t \times m$ ).

2. При нагрузке, которая в паспорте крепи КШПУ-М 11,7 указывается как **предельная** ( $P_{пред}=60,04t/арку$  или распределенная по периметру арки  $q=6,41t/m$ ) максимальный изгибающий момент в элементах крепи составляет  $5,1t \times m$ , что превышает предельный изгибающий момент в 1,81 раза. Этот факт говорит о том, что нагрузка  $P_{пред}=60,04t/арку$  является завышенной для данного вида крепи в условиях пучащих пород почвы.

3. Для составной крепи КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4 из спецпрофиля СВП 27 предельный изгибающий момент, при котором произойдет исчерпание несущей способности, составляет  $21,07m \times m$ . Таким образом, несущая способность составной крепи по изгибающему моменту в 7,1 раз превосходит несущую способность крепи КШПУ-М 11,7

4. Максимальный изгибающий момент составной крепи КШПУ-М 11,7 + КШПУ-М 14,4 от нагрузки, соответствующей **предельной паспортной** для КШПУ-М 11,7 ( $P_{пред}=60,04t/арку$  или  $q=6,41m/m$ ) равен  $5,21m \times m$ , что составляет только 25% от предельного изгибающего момента для данной составной конструкции.

5. В конструкции крепи с обратным сводом величина максимального изгибающего момента уменьшается при увеличении стрелы прогиба обратной арки.

6. Оптимальная стрела прогиба обратной арки крепи близка к значению  $f=1/6b$ .

#### Список литературы

1. НПЦ "Геомеханика" Типовые проектные решения. [Отчет] : Сечения горных выработок. - Павлоград : [б.н.], 2002. - в. 401-011-2002.

2. Литвинский, Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. - К.: Техніка, 1999. - 216 с.

3. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Механика подземных сооружений и конструкции крепей» (сост. Г. Г. Литвинский – ДГМИ, 1989 – 40 с.).

4. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи ВНИИОМШС Минуглкпрома СССР – М.: Стройиздат, 1983 – 273 с.

5. Баклашов И. В., Тимофеев О. В. Конструкции и расчет крепей и отделок. – М.: Недра, 1979 г.

6. Кириченко В. Я.. Направление создания эффективных соединительных элементов для податливых крепей горных выработок [Текст] / В. Я. Кириченко, М. В. Шишов // Геотехнічна механіка. – 2012. – № 112. – С. 173–184.

7. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81\* окрім розділів 15\*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.