

УДК 622.268

В. Н. ЛЕВЧЕНКО, Э. К. ФРОЛОВ, Е. Э. ЯРОШ

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ РАБОТЫ АРОЧНОЙ ТРЕХЗВЕНЬЕВОЙ
КРЕПИ НА ОСНОВЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ СТЕРЖНЕВЫХ
СИСТЕМ**

В данной статье на основе методов строительной механики стержневых систем была предложена методика расчета несущей способности арочной трехзвеневой крепи. Используя эту методику, была рассчитана несущая способность крепи как цельной конструкции и рассмотрена особенность нагружения элементов крепи при различных схемах нагружения верхняка. В результате анализа особенностей работы элементов крепи (стойки и верхняков) была предложена методика оценки работы крепи в податливом режиме и установлена рациональная схема нагружения, при которой металлическая трехзвеневая арочная крепь может работать как податливая конструкция при максимально возможной несущей способности, т. е. изменять периметр без деформации элементов. Теоретические расчеты были проверены на вертикальном стенде ДонУГИ, который позволяет испытывать крепь в натуральную величину.

строительная механика, арочная крепь, верхняк, стойки, скользящий шарнир, продольная сила, поперечная сила, изгибающий момент

Металлическая арочная крепь АКП-3 состоит из трех элементов: две стойки и верхняк. Нижняя часть стойки прямолинейная, верхняя — криволинейная с радиусом изгиба, равным радиусу изгиба верхняка. Т. к. верхняк и криволинейная часть стойки имеют одинаковый радиус кривизны, то они могут соединяться между собой внахлестку. Целостность конструкции обеспечивается наличием хомутов, которыми верхняк прижимается к стойке. Такой способ соединения элементов арочной крепи представляет собой скользящий шарнир, который обеспечивает податливый режим работы крепи. При этом следует отметить, что в отличие от рамных конструкций надземной части здания или сооружения, работающих в режиме заданных нагрузок, металлическая арочная крепь подземных сооружений работает в режиме заданных деформаций, т. е. задается податливый режим работы крепи, при котором допускается уменьшение ее периметра без нарушения эксплуатационных требований к подземному сооружению. Этим объясняется широкое применение арочной трехзвеневой крепи в горных выработках глубоких шахт. Нормальная работа крепи в податливом режиме определяется тем, что по мере опускания верхняка равномерно увеличиваются «нахлестки» на обоих узлах сопряжения верхняка со стойками. Однако опыт показывает, что обычно нормально работает только один из узлов податливости. Очень часто крепь вообще не работает в податливом режиме, что приводит к деформации элементов крепи. Чтобы исключить подобные негативные явления, необходимо оценить, будет ли установленная в данных горно-геологических условиях крепь работать в «нормальном» податливом режиме. Для этого следует установить соотношение между величиной силы, смещающей верхняк по стойке, и величиной силы, препятствующей этому смещению. Известно, что под действием внешней нагрузки в каждом сечении арки возникает изгибающий момент M , поперечная Q и продольная N силы, которые характеризуют внутренние усилия профиля в рассматриваемом сечении, определяют степень деформируемости материала крепи и, в конечном счете, — деформацию всей конструкции.

Под действием силы N материал работает на сжатие. На несущую способность крепи она не оказывает заметного влияния, и для цельной (единой) конструкции продольная сила не имеет большого значения. Но в конструкции, состоящей из нескольких элементов, продольная сила может вызвать

взаимное смещение этих элементов. Применительно к шахтной трехзвенной крепи АП-3 это означает, что продольная сила N может вызвать перемещение верхняка по стойке, что соответствует податливому режиму работы крепи. Такое явление возможно только в том случае, если сила N , возникающая на сопряжении верхняка и стойки, будет больше сопротивления этого узла податливости T .

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо определить величину продольной силы в сечениях крепи на сопряжениях верхняка со стойками и установить величину сопротивления узлов податливости, которая зависит от силы прижатия верхняка к стойке Φ и коэффициента трения металла по металлу.

Лабораторные испытания показали, что сила Φ не постоянна и зависит от характера взаимодействия верхняка и стойки. Минимальное значение этой силы определяется величиной предварительного натяжения хомутов. В дальнейшем она может возрасти в зависимости от величины опрокидывания стойки либо в сторону забуга, либо во внутрь выработки, а по мере увеличения нахлестки — и от перекоса хомутов.

При рассмотрении характера взаимодействия верхняка и стойки отметим следующее: в начале работы крепи сила прижатия верхняка к стойке определяется величиной предварительного натяжения соединительных хомутов; в процессе нагружения крепи в каждом ее сечении возникают поперечная Q и продольная N силы и изгибающий момент M ; если нагружается сводчатая часть крепи, то на сопряжении верхняка со стойкой возникают распоры, которые разводят концы верхняка. Одновременно эти же усилия опрокидывают стойку на забуг, поворачивая ее вокруг точки O (рис. 1).

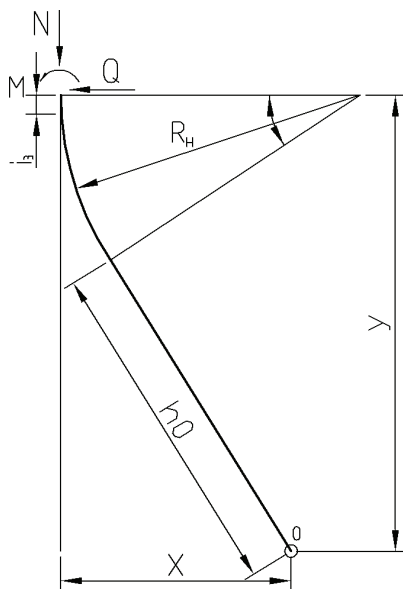


Рисунок 1 — Схема работы стойки металлической арочной трехзвеневой крепи.

При этом концы верхняка поворачиваются относительно верхнего конца стойки, растягивая хомуты; под действием распорных усилий верхняк «выходит» из стойки. При этом в соединительных хомутах образуются силы взаимного прижатия элементов крепи Φ , суммарную величину которых можно определить из следующего выражения (два случая, когда элементы крепи соединяются двумя хомутами):

$$\Phi = \frac{Q_y + N_x + M}{2l_s} \quad (1)$$

где Q , N , M — соответственно поперечная, продольная силы и изгибающий момент в сечении арки на сопряжении верхняка со стойкой;
 l_s — величина нахлестки.

Величины x и y определяют из следующих выражений, используя геометрические параметры крепи (рис. 1):

$$x = R_H \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right) + h_0 \cos \frac{\alpha}{2}; \quad (2)$$

$$y = R_H \cos \frac{\alpha}{2} + h_0 \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

где R_H — радиус стойки крепи;
 h_0 — длина прямой части стойки крепи;
 λ — центральный угол крепи.

Зная величину Φ , можно определить сопротивление узла податливости в зависимости от коэффициента трения металла по металлу:

$$T = \Phi f. \quad (4)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо знать величину внутренних усилий в сечениях крепи на соединении верхняка со стойками.

Эти усилия можно установить, если в качестве грузонесущей конструкции рассматривать только верхняк крепи. В этом случае влияние стоек крепи, соединительных хомутов, нахлестки, забутовки и различного вида заклинок уподобляется положению, когда на концы верхняка накладываются три связи (рис. 2). Расчеты по указанной схеме отличаются простотой и требуемой точностью, что весьма важно для их практического применения. Эта система (рис. 2) является трижды статически неопределимой и решается классическими методами строительной механики стержневых систем, применив метод «жестких консолей» [1].

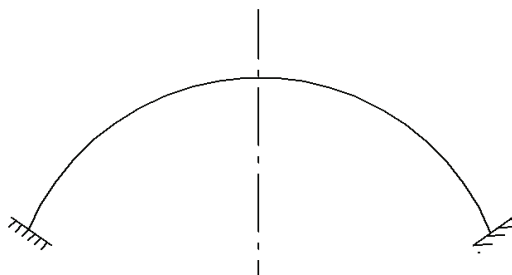


Рисунок 2 — Расчетная схема верхняка трехзвеневой крепи.

В результате аналитического решения получены выражения для определения момента M , продольной N и поперечной Q сил в любом сечении арки при любом виде нагрузки P .

$$M = M_p + xV - yH - L; \quad (5)$$

$$Q = Q_p + V \cos \varphi + H \sin \varphi; \quad (6)$$

$$N = N_p + V \sin \varphi - H \cos \varphi, \quad (7)$$

где M_p, Q_p, N_p — момент, поперечная и продольная силы статически определимой балки с заданной нагрузкой;
 x, y — координаты рассматриваемого сечения арки;
 V, H, L — постоянные величины для данной арки и данного вида заданной нагрузки (определяются путем деления перемещений от заданной нагрузки на перемещения от единичных сил);
 φ — угол наклона оси арки в рассматриваемом сечении.

Для проверки расчетных данных нами были проведены испытания арочных крепей различной конфигурации на вертикальном стенде ДонУГИ. Параллельно с испытаниями эти же арки с такой же схемой загрузки (сосредоточенная сила по центру верхняка) были рассчитаны по изложенной выше методике. Степень приближения расчетных данных к экспериментальным оценивались в результате сопоставления величин несущей способности крепи, определяемых в том и другом случаях.

Таблица 1 – Результаты испытания

Параметры крепи				Результаты лабораторных испытаний		Результаты расчета				
R _н , с	R _в , м	$\frac{R_C}{R_B}$	λ , градус	Несущая способность, кН	Величина опрокидывания стойки на забутовку, мм	Несущая способность, кН	Внутренние усилия			$\lambda = \frac{N}{T}$
							N, кН	Q, кН	M, кН·м	
2,6	1,27	2,1	106	250	50	250	-242	-113	-21,9	-0,24
2,9	1,7	1,7	80	220	85	254	-333	-113	-21,9	0,2
2,3	2,1	1,1	60	170	35	212	-262	-29	-21,9	0,24

На стенде были испытаны три пары рам металлической арочной трехзвеньевой крепи с различным соотношением радиусов стойки и верхняка, изготовленных из спецпрофиля СВП 27. Результаты испытания (табл. 1) показали, что несущая способность крепи в жестком режиме возрастает с уменьшением радиуса верхняка по отношению к радиусу стойки. Однако при нагружении сосредоточенной силой в середине пролета арки крепь не работает в податливом режиме независимо от ее геометрических параметров. При этом было отмечено, что стойки крепей по мере их нагружения «заваливаются» в сторону «забутовки». В таблице приведены результаты экспериментальных испытаний указанных крепей, результаты расчета их несущей способности и коэффициент возможности работы крепей в податливом режиме λ .

Из данных, приведенных в таблице, следует, что величины несущей способности, определенные в лабораторных условиях и теоретически, вполне сопоставимы. Дальнейшее сопоставление фактических и расчетных данных показывает, что соотношение между продольной силой N и сопоставлением узла податливости T во всех случаях значительно меньше единицы, т. е. крепи при принятой схеме нагружения не могут работать в податливом режиме. Кроме того, учитывая, что сила Q имеет направление на забут (т. е. имеет отрицательный знак), стойки крепи должны опрокидываться также на забут. Причем наибольшее опрокидывание должно быть во втором случае.

Таким образом, сопоставление расчетных и экспериментальных данных свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении результатов, что подтверждает целесообразность использования принятого метода расчета несущей способности крепи и предлагаемого способа оценки работы крепи в податливом режиме. При этом рекомендуется вести расчеты в следующем порядке:

- определяют максимальную несущую способность крепи (до появления пластического шарнира в каком-либо сечении арки);
- рассчитывают внутренние усилия (Q, N, M) в сечении верхняка на сопряжении его со стойкой (формулы 5, 6, 7);
- находят величину прижатия верхняка к стойке Φ (формула 1);
- находят величину сопротивления узла податливости T (формула 4);
- устанавливают величину $\lambda = N/T$. Если $\lambda \geq 1$, крепь будет работать в податливом режиме, если $\lambda < 1$ – в жестком.

По предложенной методике были проведены теоретические расчеты режима работы крепи КМПА3-11,2 при следующих схемах нагружения верхняка сосредоточенной нагрузкой:

I схема – сосредоточенная нагрузка приложена по центру верхняка (вертикальной оси выработки);

II схема – сосредоточенные нагрузки приложены симметрично относительно центра верхняка на расстоянии от него по 250 мм;

III схема – сосредоточенные нагрузки приложены симметрично относительно центра верхняка на расстоянии от него по 750 мм;

IV схема – сосредоточенные нагрузки приложены симметрично относительно центра верхняка на расстоянии от него по 1 100 мм;

V схема – сосредоточенные нагрузки приложены симметрично относительно центра верхняка на расстоянии от него по 1 250 мм;

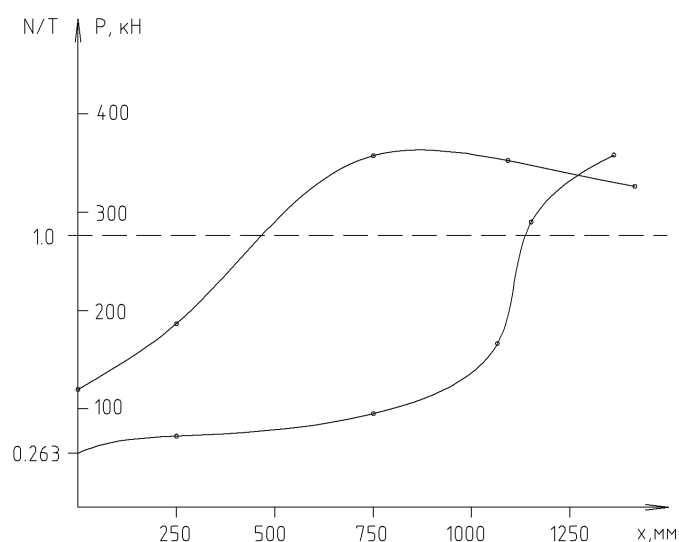
VI схема – сосредоточенные нагрузки приложены симметрично относительно центра верхняка на расстоянии от него по 1 400 мм;

VII схема – равномерно распределенная нагрузка по всему верхняку (это соответствует требованиям выполнения рекомендации «Инструкции по креплению горных выработок» [2] о необходимости полной забутовки закрепного пространства над верхняком).

Результаты расчетов представлены в табл. 2, а основные показатели (несущая способность крепи и коэффициент податливости λ при каждой схеме нагружения) – на рис. 3.

Таблица 2 – Результаты расчетов

Схема нагружения	Несущая способность крепи	Внутренние усилия в поперечном сечении крепи в местах соединения верхняка со стойками			Коэффициент податливости $\lambda = N/T$
		N , кН	Q , кН	M , кН·м	
I	124	118	57	156	0,263
II	192	179	23	21,3	0,27
III	356	276	77	11,6	0,346
IV	352	210	-5	-13,8	0,634
V	335	190	-41	-21,9	1,284
VI	318	150	-65	-21,9	1,304
VII	1109	780	130	21,0	0,363

Рисунок 3 – Изменения несущей способности крепи (N) и сопротивления узла податливости (T).

Как видно, по мере разнесения точек приложения внешних сосредоточенных сил, относительно вертикальной оси крепи, несущая способность конструкции (P) увеличивается и в пределах этих величин 750–1 100 мм она практически одинакова (350–352 кН). Однако при этом коэффициент податливости $\lambda = N/T < 1,0$, т. е. крепь работает в жестком режиме и следует ожидать появление пластических шарниров в районе сопряжения концов верхняка и стоек. При разнесении сил P на 1 250 мм от вертикальной оси крепи несущая способность уменьшается до 335 кН, а величина $\lambda = 1,284$, т. е. крепь будет работать в податливом режиме. Примечательно, что при этом момент и продольная сила меняют знак на отрицательный, т. е. они способствуют «заваливанию» стоек вовнутрь выработки, что соответствует нормальной работе крепи в податливом режиме.

Оптимальной величиной разноса сил P следует считать – 1 100 м от центра верхняка, что соответствует $1/4,5$ пролета выработки. Эта же величина для заклинки верхняка от $1/3$ до $1/4$ пролета выработки указана в нормативном документе по креплению выработок арочной крепью [2].

Следует отметить еще одно обстоятельство, вытекающее из анализа результатов расчетов (табл. 2), – равномерная забутовка крепи по всему периметру значительно увеличивает несущую способность (1 109 кН), но конструкция при этом не будет работать в податливом режиме, т. к. $\lambda = 0,363$. Отсюда следует вывод, что требование равномерной и плотной забутовки закрепленного пространства по всему периметру верхняка нельзя считать рациональным.

Общий вывод изложенных данных в данной статье таков: предложенный метод расчета арочных крепей соответствует фактическим данным и может быть использован для улучшения конструкции арочной крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульчев, Н. С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок [Текст] / Н. С. Бульчев, Н. Н. Фотиева, Е. В. Стрельцов. — М. : Недра, 1986. — 198 с.
2. Зборщик, М. Г. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки [Текст] / М. Г. Зборщик, В. В. Назимко. — К. : Техника, 1991. — 248 с.
3. Литвинский, Г. Г. Стальные рамные крепи горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский, Г. И. Гайко, Н. И. Кулдыркаев. — К. : Техника, 1999. — 213 с.
4. Рабинович, И. М. Основы строительной механики стержневых систем [Текст] / И. М. Рабинович. — М. : Госстройиздат, 1960. — 519 с.
5. Киселев, В. А. Строительная механика [Текст] / В. А. Киселев. — М. : Стройиздат, 1986. — 520 с.
6. Гелескул, М. Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] / М. Н. Гелескул, В. Н. Каретников. — М. : Недра, 1982. — 478 с.
7. Ерофеев, Л. М. Повышение надежности крепи горных выработок [Текст] / Л. М. Ерофеев, Л. А. Мирошникова. — М. : Недра, 1988. — 247 с.
8. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчета крепи [Текст] / ВНИМИ, ВНИИ-ОМШС Минуглепрома СССР. — М. : Стройиздат, 1983. — 272 с.

Получено 11.09.2012

В. М. ЛЕВЧЕНКО, Е. К. ФРОЛОВ, О. Е. ЯРОШ РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ РОБОТИ АРОЧНОГО ТРИЛАНКОВОГО КРІПЛЕННЯ НА ОСНОВІ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ СТРИЖНЕВИХ СИСТЕМ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У цій статті на основі методів будівельної механіки стрижневих систем була запропонована методика розрахунку несучої здатності арочної здатності триланкового кріплення. Використовуючи цю методику, була розрахована несуча здатність кріплення, як цілісної конструкції і розглянута особливість навантаження елементів кріплення при різних схемах навантаження верхняка. У результаті аналізу особливостей роботи елементів кріплення (стійок і верхняків) була запропонована методика оцінки роботи кріплення у податливому режимі і встановлена раціональна схема навантаження, при якій металеве триланкове арочне кріплення може працювати як податлива конструкція при максимально можливій несучій здатності, тобто змінювати периметр без деформації елементів. Теоретичні розрахунки були перевірені на вертикальному стенді ДонВУГІ, який дозволяє випробовувати кріплення в натуральну величину.

будівельна механіка, арочне кріплення, верхняк, стійки, сквозний шарнір, поздовжня сила, поперечна сила, згинальний момент

VICTOR LEVCHENKO, EDUARD FROLOV, ELENA YAROSH THE DEVELOPMENT OF THE METHOD OF EVALUATION OF ARCH THREE — LINKED SUPPORT ON THE BASIS OF BUILDING MECHANICS OF BAR SYSTEM

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

In the given article on the basis of building mechanics methods of calculated the bearing capacity of the support as an integral construction and examined the peculiarities of loading support links at different circuits of beam loading have been given. As a result of the analysis of the peculiarities of the links of the support (props and beams) function was suggested the technique of estimation of the support function in the compliant condition and was established a rational scheme of loading under which metal three - linked arch support can function as a compliant construction at maximal possible bearing capacity, i. e. to change the perimeter without deformation of elements. Theoretical analyses were tested on the vertical stand which allows to test the support of actual size.

construction mechanics, arch lining, top, rack, slide the hinge, longitudinal force, transverse force, bending moment

Левченко Віктор Миколайович — кандидат технічних наук, професор. Проректор з науково-педагогічної і виховної роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Фролов Едуард Костянтинович — кандидат технічних наук, доцент кафедри основ, фундаментів та підземних споруд Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка та проектування заглиблених підземних споруд.

Ярош Олена Едуардівна — асистент кафедри основ, фундаментів та підземних споруд Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування і будівництво підземної частини будівель та споруд.

Левченко Виктор Николаевич — кандидат технических наук, профессор. Проректор по научно-педагогической и воспитательной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Фролов Эдуард Константинович — кандидат технических наук, доцент кафедры оснований, фундаментов и подземных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка и проектирование заглиблених підземних споруд.

Ярош Елена Эдуардовна — ассистент кафедры оснований, фундаментов и подземных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование и строительство подземной части зданий и сооружений.

Victor Levchenko — PhD (Eng.), Professor, Vice-rector in education and pedagogic activities, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, chancellor's office. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

Eduard Frolov — PhD (Eng.), Associate Professor, Grounds, Foundations and Underground Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development and designing of underground structures.

Elena Yarosh — assistant, Grounds, Foundations and Underground Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: Design and construction of the underground part of buildings and constructions.