

### Выводы

1. Газ в угольных пластах может находиться не только в двух состояниях: свободном, сорбированном, а также в кристаллогидратном.

2. Внезапные выбросы угля, породы и газа являются следствием разложения предельных формаций кристаллогидратов, замкнутых в отдельных зонах пласта и вмещающих пород. Не исключено, что в горных ударах, сопровождающихся усиленным газовыделением, также принимают участие кристаллогидраты.

В этой связи предлагается при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным

пластам осуществлять:

- применение геофизических методов для обнаружения и определения концентрации кристаллогидратов в пределах участка шахтного поля; ;

- разработку эффективных профилактических мероприятий на основе закачивания в краевую зону пласта пароводяного подогретого флюида;

- контроль эффективности защитных мероприятий.

После чего возможно проведение выработки одним из способов, характерным для безопасного угольного пласта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенин А.Г. Гидраты и внезапные выбросы// «Уголь» , №11.-1973.-С. 12-14.
2. Кэрролл Д. ГИДРАТЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА Перевод с английского.
3. Мурашев В.И. Внезапные выбросы угля, породы и газа // Основы теории внезапных выбросов угля и газа. - М.: изд. ИГД им.А.А.Скочинского,1982.
4. Христианович С.А. Распределение давления газа вблизи движущейся свободной поверхности угля // Изв.АН СССР.-ОТН.-1953.-№12. -С. 1673-1678.
5. Кричевский Р.М., Бобров И.В. Борьба с внезапными выбросами угля и газа. :- Киев,1964.

□ Авторы статьи.

<p>Дырдин Валерий Васильевич -докт. техн. наук, проф. зав. каф. физики КузГТУ Email: dav.fiz@kuzstu.ru</p>	<p>Нестеров Анатолий Николаевич – докт. хим. наук, проф. зам.директор института Криосфера Земли СО РАН Тел: +7(345-2) 68-87-22</p>	<p>Солодкая Ольга Николаевна - студ КузГТУ Т ел.89049954468</p>	<p>Алексеевич Андрей Анатольевич - студ. КузГТУ E-mail: viper-gt2@rambler.ru</p>
--	--	---	--

**УДК: 622.281.5:624:046**

**Д. Н. Макшанкин, В. А. Гоголин, А. В. Ремезов, А. В. Бедарев**

### ВОЗМОЖНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ АРОЧНЫХ КРЕПЕЙ

В угольной и горнорудной промышленности России широко применяются арочные металлические крепи, изготавливаемые из металлических профилей. В частности, на угольных шахтах Кузбасса в последние годы доля выработок, поддерживаемых арочными металлическими крепями, составляет до 60%. Ухудшение горно-геологических условий добычи угля, повышение требований к безопасности труда, экономичности производства требуют дальнейшего совершенствования арочных крепей.

Промышленное использование арочных крепей допускается только после стендовых испытаний, которые должны подтвердить их работоспособность. Стендовые испытания выполняются согласно ГОСТ Р 50910-96 «Крепи металлические податливые рамные» [1]. При этом предусматривается то, что число испытанных крепей одного типоразмера должно составлять не менее трех.

В натурных стендовых испытаниях крепь нагружается вертикально по центральной точке верхняка до нагрузки, когда крепь теряет несу-

Таблица 1. Геометрические характеристики профилей СВП и ШП

Тип профиля	$h$ , мм	$h_1$ , мм	$B$ , мм	$b_1$ , мм	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$y_0$ , мм
СВП-22	110,0	25,6	145,5	60,0	11,0	6,2	52,7
СВП-27	123,0	29,0	149,5	59,5	13,0	7,1	58,5
ШП-21	88,0	7,0	286,2	124,0	7,0	5,0	44,0
ШП-26	98,4	8,0	309,2	133,0	8,0	7,0	49,2

шую способность. На стенде КузНИИшахтостроя для этой цели используется стенд, состоящий из нескольких гидроцилиндров от комплекса 2-ОКП-70, расположенных по определенной схеме. потеря несущей способности фиксируется падением давления в манометрах, регистрирующих давление в гидроцилиндрах. Согласно ГОСТу испытания проводятся в двух режимах: 1) пассивном, когда гидроцилиндры, горизонтально расположенные на высоте 1 м от концов стоек, удерживают стойки крепи от горизонтальных смещений; 2) активном, когда на эти гидроцилиндры подается нагрузка (рис. 1).

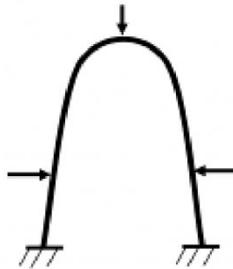


Рис. 1. Схема стеновых испытаний по ГОСТ Р 50910-96

Для вновь разработанного профиля ШП из-за отсутствия средств на изготовление опытной партии для проведения стеновых испытаний крепей с профилем ШП, авторы предлагают метод математического моделирования данного процесса для арочной трехзвенной крепи, испытываемой в двух режимах: жестком режиме (крепь не имеет элементов податливости) и в податливом (крепь трехзвенная с замками). Так как при сложном сечении профиля и арочной форме крепи ее напряженно-деформированное состояние не поддается точным аналитическим расчетам, то был использован метод конечных элементов (МКЭ). Численные расчеты были выполнены по стандартной программе для крепей из профилей СВП и ШП. Профиль СВП является стандартным при изготовлении крепей [3], а профиль ШП является новым, разработанным в Кузбасском государственном техническом университете [4, 5]. Сечения профилей приведены на рис. 2, а их геометрические характеристики в табл. 1, где  $y_0$  – расстояние до центра тяжести.

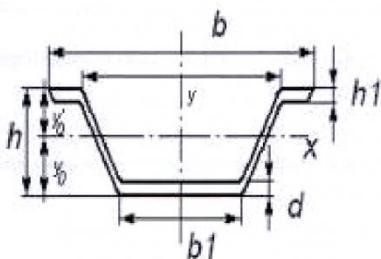


Рис. 2. Профили крепей СВП и ШП

Для проведения расчетов методом МКЭ для каждого из указанных профилей были рассчитаны их приведенные сечения в форме прямоугольников (рис. 3).

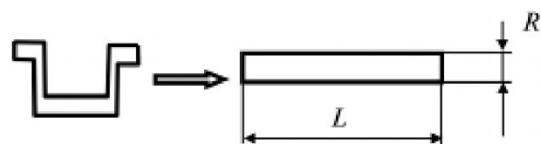


Рис. 3. Переход к приведенному сечению профиля.

Размеры приведенных сечений профилей определялись по двум условиям: 1) равенству площадей поперечных сечений профилей  $F$ ; 2) равенству моментов сопротивлений на изгиб относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести профиля  $W_x$  [6]:

$$\begin{cases} F_1 = F_2, \\ W_{x1} = W_{x2}. \end{cases}$$

Используя известные значения  $F$  и  $W_x$  были найдены параметры приведенного прямоугольного сечения:

$$\begin{cases} F = R \cdot L \\ W_x = \frac{L \cdot R^2}{6} \end{cases}, \quad \text{откуда} \quad \begin{cases} R = \frac{W_x \cdot 6}{F} \\ L = \frac{F}{R}, \end{cases}$$

где  $R$  и  $L$  – соответственно высота и ширина приведенного сечения профиля (табл. 2).

Так как конструктивные элементы крепей изготавливаются из горячекатанной стали, то при расчетах были приняты соответствующие деформационные и прочностные характеристики этого материала: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициент поперечных деформаций  $\nu = 0,25$ , прочность на растяжение  $4 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> [2].

Рамная крепь рассчитывалась как конструкция, находящаяся в плоском напряженном состоянии. Такое решение связано с тем, что горизонтальный размер приведенного сечения  $L$  на порядок меньше вертикального размера  $R$ . (табл. 2.) Основные уравнения плоского напряженного состояния крепи, связывающие напряжения  $\sigma$ ,  $\tau$  и деформации  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  имеют вид:

$$\begin{cases} \sigma_z = 0, \\ \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \\ \varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \tau_{xy} \end{cases}$$

Уравнения статического равновесия записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases}$$

В рассматриваемом случае можно пренебречь весом рамы, так как внешние нагрузки значительно превосходят этот вес, и к тому же рама испытывается в горизонтальном положении. Так что  $f_x = f_y = 0$ .

В первую очередь было проверено соответствие расчетных результатов с результатами стендовых испытаний крепей для двух типоразмеров профилей: СВП – 22, СВП – 27. Результаты стендовых испытаний были предоставлены администрацией института «КузНИИшахтострой» (Прото-

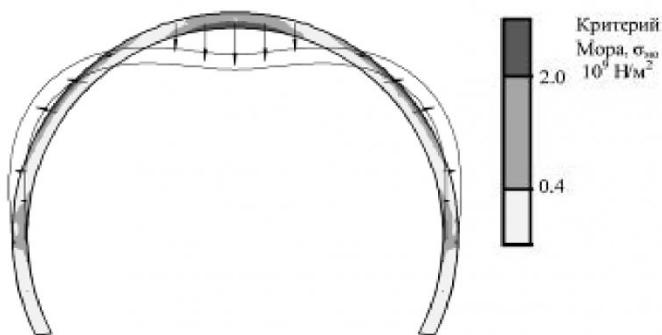


Рис. 4. Изменение геометрии крепи, векторы смещения и распределение остаточной прочности при потере несущей способности крепи.

кол № 17 стендовых сертификационных испытаний металлической податливой трехзвенной крепи арочной формы типа АКП, эллиптической формы типа КАПЭ и металлической жесткой коробовой формы типа КЖК, изготовленной на Шахтинском ремонтно-механическом заводе ОАО «Ростовшахтострой» от 30 июля 2007 г.)

Это было необходимо для выяснения адекватности применения метода расчета МКЭ для арочных крепей. Вертикальное нагружение рамной крепи проводилось с нагрузки 15 кН. Геометрия

рамной крепи СВП-22 и векторы смещения в масштабе 1:5 в предельном случае нагружения (потере несущей способности) показаны на рис. 4. Аналогичная качественная картина изменения геометрии крепи при потере ее несущей способности в испытаниях в жестком режиме наблюдалась у крепей всех типов профилей.

На этом рисунке темный цвет показывает области разрушения крепи. Места разрушения крепи находились по критерию разрушения Мора:

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cж}} \cdot \sigma_2 > \sigma_p,$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – наибольшее и наименьшее главные напряжения;  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{cж}$  – пределы прочности металла на растяжение и сжатие,  $\sigma_p / \sigma_{cж} = 0,1$ .

Как показывает сопоставление результатов экспериментальных стендовых испытаний с результатами теоретических численных расчетов основных параметров крепей СВП – 22,27 и ШП – 21,26 принятых ГОСТом различие теоретических и экспериментальных значений в среднем составляет 4-7% (табл. 3). Значения этих погрешности находятся в диапазоне отклонений, допускаемых при стендовых испытаниях и выпуске арочных крепей.

Для сопоставления работоспособности крепей с профилем СВП и ШП проведено численное моделирование крепей с новым профилем ШП – 21, 26, для видов исполнения и типоразмеров крепей АКП-9,8 и АКП-13,8. Основные результаты этих численных экспериментов приведены в табл. 3.

Как видно из этой таблицы, отклонения расчетных значений параметров для крепей с профилями СВП-22, 27 от экспериментальных, со-

Таблица 2. Геометрические характеристики профилей крепей и их приведенных сечений

Тип профиля	Момент сопротивления, $W_x$ , см <sup>3</sup>	Площадь сечения профиля, $F$ , см <sup>2</sup>	Вертикальный размер приведенного сечения, $R$ , см	Горизонтальный размер приведенного сечения, $L$ , см
СВП-22	74,8	27,91	16,08	1,74
СВП-27	100,2	34,37	17,49	1,96
ШП-21	75,45	26,68	16,97	1,57
ШП-26	104,6	33,47	18,75	1,79

Таблица 3. Результаты стендовых испытаний и численных расчетов арочных крепей в жестком режиме

Тип профиля	Несущая способность по стендовым испытаниям, кН	Несущая способность по расчетам, кН	Погрешность расчета несущей способности, %	Прогиб верхняка по испытаниям, мм	Прогиб верхняка по расчетам, мм	Погрешность расчета смещений верхняка, %
СВП-22	352	312	11	284	260	4,9
СВП-27	415	381	8,2	342	350	2,3
ШП-21	-	344	-	-	273	-
ШП-26	-	402	-	-	366	-

Таблица 4. Геометрические характеристики профилей крепей и их приведенных сечений

Тип профиля	Момент сопротивления, $W_x$ , см <sup>3</sup>	Площадь сечения профиля, $F$ , см <sup>2</sup>	Вертикальный размер приведенного сечения, $R$ , см	Горизонтальный размер приведенного сечения, $L$ , см
СВП-22	74,8	27,91	16,08	1,74
СВП-27	100,2	34,37	17,49	1,96
ШП-21	75,45	26,68	16,97	1,57
ШП-26	104,6	33,47	18,75	1,79

ставляют в среднем: для прогиба верхняка – 3,6%; для несущей способности рамы – 9,6%. Несущая способность крепей с профилем ШП-21 превосходит несущую способность крепей с профилем СВП-22 на 10%, а с профилем ШП-26 - на 6% по сравнению с профилем СВП-27.

## ВТОРОЙ ЭТАП ИСПЫТАНИЯ

Арка трехзвенной податливой крепи состоит из верхняка и двух стоек. Все звенья арки соединены между собой скобами с планками и гайками (рис. 5). Податливость крепи достигается за счет сдвигания концов звеньев одного в другой в мес-

тром. Промышленное использование арочных крепей возможно только после стендовых испытаний, которые должны подтвердить их работоспособность. Стендовые испытания выполняются согласно ГОСТ Р 50910-96 «Крепи металлические податливые рамные» [1]. В натурных стендовых испытаниях крепь нагружается вертикально по центральной точке верхняка до нагрузки, когда крепь теряет несущую способность. На стенде КузНИИшахтостроя для этой цели используются гидроцилиндры от комплекса 2-ОКП-70. Потеря несущей способности фиксируется падением давления в манометрах, регистрирующих давление в гидроцилиндрах. Согласно ГОСТу испытания

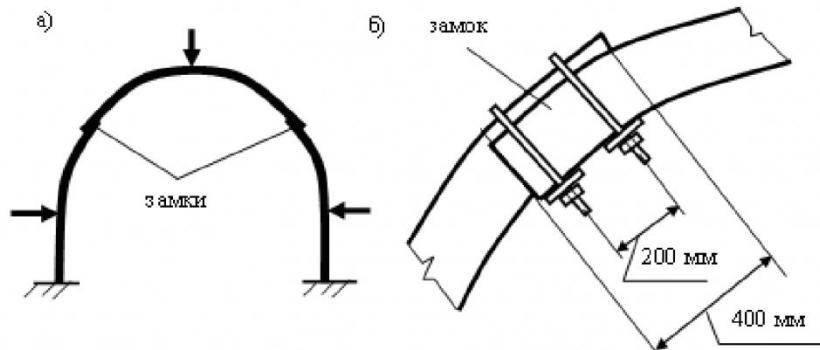


Рис. 5. Схема трехзвенной податливой крепи и ее стендовых испытаний (а); место соединения звеньев (б)

таких соединений, которые называются замками. Таким образом, трехзвенная крепь имеет два замка, причем проектная величина ее податливости составляет до 300 мм. Величина податливости определяется усилием, приложенным при затягивании гаек на скобах. Вдоль выработки каждая арка соединяется с соседней аркой тремя межрамными стяжками, располагаемыми в кровле и по бокам выработки.

проводятся в двух режимах:

1) пассивном, когда гидроцилиндры, горизонтально расположенные на высоте 1 м от концов стоек, удерживают стойки крепи от горизонтальных смещений;

2) активном, когда на эти гидроцилиндры подается нагрузка (см. рис. 5,а).

В работе [2] описано моделирование испытаний арочных крепей жесткой конструкции, без

Таблица 5. Результаты стендовых испытаний и численных расчетов арочных податливых крепей

Тип профиля	Несущая способность по стендовым испытаниям, Кн	Несущая способность по расчетам, $P$ , Кн	Погрешность расчета несущей способности, %	Прогиб верхняка по стендовым испытаниям, мм	Прогиб верхняка по расчетам, $I$ , мм	Погрешность расчета смещений верхняка, %
СВП-22	302	312	9,7	274	260	5,0
СВП-27	405	381	6,0	382	350	8,4
ШП-21	-	364	-	-	263	-
ШП-26	-	412	-	-	356	-

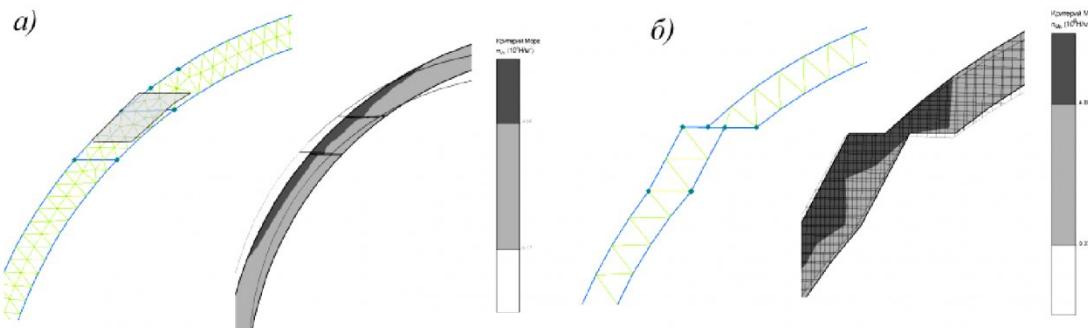


Рис. 6. Математические модели замков трехзвенной арочной крепи и их кинематическое и прочностное состояния в предельном режиме нагружения

элементов податливости.

Установлено следующее.

1. Математическое моделирование методом конечных элементов является альтернативой экспериментальным стендовым испытаниям арочных крепей жесткой конструкции.

2. Арочная крепь жесткой конструкции, изготовленная из нового профиля ШП, имеет более высокую несущую способность по сравнению с крепью из профиля СВП на 6-10%. Поэтому профиль ШП может быть использован при изготовлении арочных крепей с сортаментом 21, 26.

3. Арочные трехзвенные крепи, изготовленные из профиля ШП-21, 26, могут быть применены на практике для крепления подготовительных выработок.

Для анализа поведения податливой арочной трехзвенной крепи, изготовленной из нового профиля ШП, также было проведено математическое моделирование стеновых испытаний. Как и в работе [2], профили изучаемых крепей были эквивалентно заменены на приведенные профили прямоугольного сечения. Размеры сечений прямоугольных профилей рассчитывались по равенству площадей поперечных сечений и моментов сопротивления в соответствии с [3]. Эти результаты представлены в табл. 4.

Трудность моделирования поведения податливой арочной крепи заключается в том, что замок крепи представляет собой сложную конструкцию для численного и, тем более, аналитического описания его напряженно-деформированного состояния. Были рассмотрены две математические модели замка, имитирующие податливый режим работы крепи (рис. 6).

На рис. 6, а) замок моделировался отдельным сегментом крепи (показан более темным цветом) с более низкими деформационными и прочностными характеристиками, чем у материала крепи. На рис. 6, б) моделирование замка выполняется показанной конфигурацией стыковки верхняка со стойкой. Также в обоих случаях показано напряженно-деформированное состояние элементов крепи при потере их несущей способности.

Наиболее сопоставимой с результатами натурных стеновых испытаний является модель,

показанная на рис. 6, а). Как показали расчеты, в этой модели можно учитывать реальные деформационные и прочностные характеристики конструкции замка. Далее методом конечных элементов были проведены численные расчеты поведения податливой трехзвенной арочной крепи в условиях стеновых испытаний с выбранной моделью замка.

Так как конструктивные элементы крепей изготавливаются из горячекатанной стали, то при расчетах были приняты соответствующие деформационные и прочностные характеристики этого материала: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ , коэффициент поперечных деформаций  $\nu = 0,25$ , прочность на растяжение  $4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$  [4]. Эти параметры для модели податливого узла были следующими: модуль упругости  $E = 10^9 \text{ Н/м}^2$ , коэффициент поперечных деформаций  $\nu = 0,27$ . Прочность на растяжение составляет  $10^7 \text{ Н/м}^2$ . Данные числовые значения деформационных параметров были выбраны из сопоставления результатов начальных стадий стеновых испытаний и результатов численных расчетов.

Результаты сопоставления стеновых испытаний и численных расчетов основных параметров рассматриваемых крепей приведены в табл. 5.

Поведение трехзвенных арочных крепей можно характеризовать по зависимости прогиба верхняка  $I$  от вертикальной нагрузки  $P$ . Эти зависимости представлены на рис. 7.

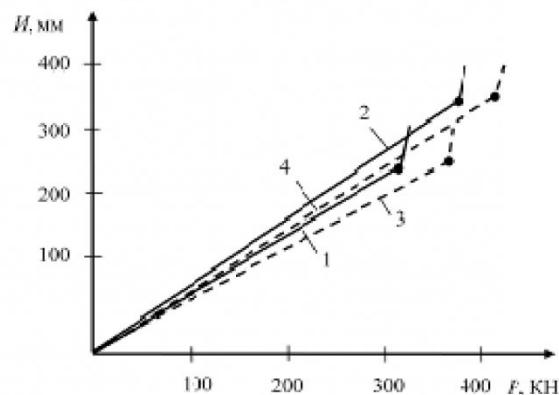


Рис. 7. Зависимость прогиба верхняка  $I$  от вертикальной нагрузки  $P$  для профилей СВП-22 (1), СВП-27 (2), ШП-21 (3), ШП-26 (4)

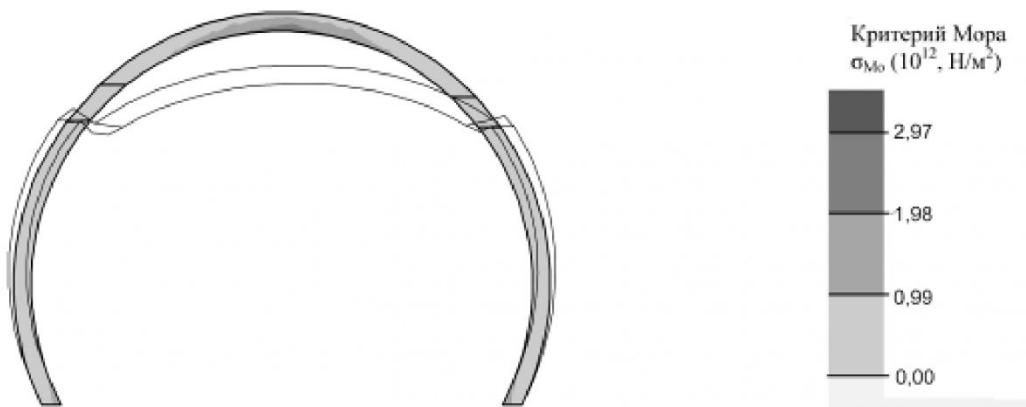


Рис. 8. Кинематическое и прочностное состояние трехзвенной податливой арочной крепи из профиля ШП-21

Здесь видно, что при соответствующих типо-размерах, крепь с профилем ШП имеет повышенную несущую способность.

Кинематическое и прочностное состояние трехзвенной арочной крепи из профиля ШП-21 показано на рис. 8. Откуда видно, что в отличие жесткой конструкции крепи [2], потеря несущей способности податливой крепи происходит в первую очередь в элементах податливости – замках.

#### Основные выводы

1. Экспериментальные стендовые испытания арочных трехзвенных крепей податливой конструкции могут быть математически смоделированы методом конечных элементов. Погрешность расчетов несущей способности крепей с профилем СВП-22, СВП-27 составляет 6,0-9,7%, а величины

прогиба верхняка 5,0-8,4 %.

2. Арочная крепь податливой конструкции, изготовленная из нового профиля ШП, имеет более высокую несущую способность по сравнению с крепью из профиля СВП на 5,3-9,2%. Поэтому профиль ШП может быть использован при изготовлении арочных крепей с сортаментом 21, 26.

3. Арочные трехзвенные крепи податливой конструкции, изготовленные из профиля ШП-21, 26, могут быть применены на практике для крепления подготовительных выработок.

4. Важной дальнейшей задачей является рассмотрение поведение таких крепей во взаимодействии с массивом горных пород в подготовительных выработках при различных геомеханических условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственный стандарт Российской Федерации. Крепи металлические податливые рамные. Методы испытаний. (ГОСТ Р 50910). Госстандарт России. М.:1996. – 12 с.
- Государственный стандарт СОЮЗА ССР. Профили горячекатаные СВП для крепи горных выработок. Сортамент. (ГОСТ 18662–83). М.:1983. – 3 с.
- Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 51748–2001 Крепи металлические податливые рамные. Крепь арочная. Общие технические условия. Госстандарт России. М.: 2001. – 15 с.
- А.С. № 1288304 Е 21 11/14, 11/15. Профиль для шахтной крепи/ В. В. Егошин. Опубл. 07.02.87 г. Бюл. №5.
- Макшанкин Д. Н., Ремезов А. В. Специальный шахтный профиль для изготовления металлических крепей горных выработок // Топливно – энергетический комплекс и ресурсы Кузбасса: региональный научно-производственный и социально-экономический журнал. / Кемерово, 2006. – С. 61–63.
- Ремезов А. В., Харитонов В. Г., Макшанкин Д. Н., Брынько А. Ф., Ермак В. В. Основные виды крепления горных выработок и методика расчета технических параметров. / Кемерово, Кузбассуиздат, 2007. – 306 с.
- Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела.– М.: Наука, 1979. – 744 с.
- Макшанкин Д.Н. Математическое моделирование стендовых испытаний арочных крепей в жестком режиме. Горный информационно-аналитический бюллетень №11, 2009 г. Изд. МГГУ. - 7 с.

□ Авторы статьи:

Макшанкин Денис Николаевич – соискат. каф. разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом КузГТУ Тел.8-384-2-39-69-07	Гоголин Вячеслав Анатольевич – докт.техн.наук, проф. каф. прикладной матема- тики КузГТУ Тел 8-384-2-39-69-25	Ремезов Анатолий Владимирович – докт.техн.наук, проф. каф. каф. разработки ме- сторождений полезных ископаемых подземным способом КузГТ У email: rav.rmp@kuzstu.ru	Бедарев Алексей Викторович – соискат. каф разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом КузГТ У Тел.8-384-2-39-69-07
--	--	---	--