

М.А. Ильяшов, д-р техн. наук,  
М.В. Головин, нач. отдела  
(ЗАО "Донецксталь - металлургический завод"),  
Б.М. Усаченко, д-р техн. наук, проф.,  
В.Н. Сергиенко, канд. техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ АРОЧНЫХ КРЕПЕЙ В СОСТАВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ**

Наведено результати фізичного моделювання роботи комбінованих охоронних систем при несиметричному навантаженні. Розглянуто особливості деформування аркового кріплення, як головного елемента охоронної системи.

## **PARTICULARITIES DEFORMING OF THE ARCHED TIMBERINGS IN COMPOSITION OF THE COMBINED SECURITY SYSTEMS UNDER ASYMMETRIC LOAD**

The results of physical modeling of the functioning of the combined systems under asymmetrical load are given. The particularities deformation arched timbers, as the main of the element of the security system are considered.

Освоение больших глубин при подземной добыче угля связано с целым рядом проблем, одной из которых является сложность поддержания подготовительных выработок при подходе лавы, а также за лавой в случае их повторного использования. Практический опыт ведущих угледобывающих стран мира показал, что генеральным направлением решения данной проблемы является использование комбинированных охранных систем [1-4].

Состав комбинированных охранных систем определяется многими факторами: геометрическими параметрами охраняемой выработки, горно-геологическими условиями, технологическими и экономическими возможностями горного предприятия. Однако, за редким исключением, обязательным элементом комбинированной охранной системы является рамная крепь. На шахтах Центрального Донбасса традиционно используются рамы с верхняком в виде арки. Крепи с плоской кровлей находят для условий больших глубин ограниченное применение.

Изучение взаимодействия арочной крепи с остальными элементами охранной системы и с породным массивом путем математического моделирования с использованием традиционно принятого метода конечных элементов осложняется рядом факторов [5]. Важнейшими из них являются:

- необходимость использования конечных элементов малых размеров для адекватного отображения геометрии элементов охранных конструкций (арок в том числе);
- необходимость решения пространственной задачи, поскольку элементы комбинированной охранной системы расположены в различных плоскостях;
- необходимость учета изменения параметров среды при ее переходе от

сплошной к блочно-структурированной;

- неоднозначность между напряжениями и деформациями при математическом описании перехода фрагментов деформируемой среды в запредельное состояние.

Авторы считают, что для изучения объектов со сложной пространственной структурой более приемлемым является физическое моделирование в варианте метода эквивалентных материалов [6, 7]. Его основными достоинствами являются:

- возможность наблюдать процесс деформирования в динамике, как на стадии упругого деформирования, так и в запредельной области вплоть до разрушения;

- наглядность изучаемых явлений;

- возможность помимо деформационных процессов регистрировать и другие сопутствующие явления, например, акустическую и электромагнитную эмиссию, сопровождающую трещинообразование.

В рамках выполненной экспериментальной работы моделировалось 4 вида рамной крепи. Характеристики моделей крепи приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики моделей рамной крепи

Крепь-прототип модели	Сечение в натуре, м <sup>2</sup>	Количество элементов	Размеры в плане, мм		Примечание
			ширина	высота	
КМП-А3	15,5	3	156	108	
КМП-А3Р2	18,0	3	164	131	
КМП-А5	17,1	5	164	140	
нет	18,0	4	164	155	замкнутая, с обратным сводом

Внешний вид моделей трехэлементных крепей представлен на рис. 1.

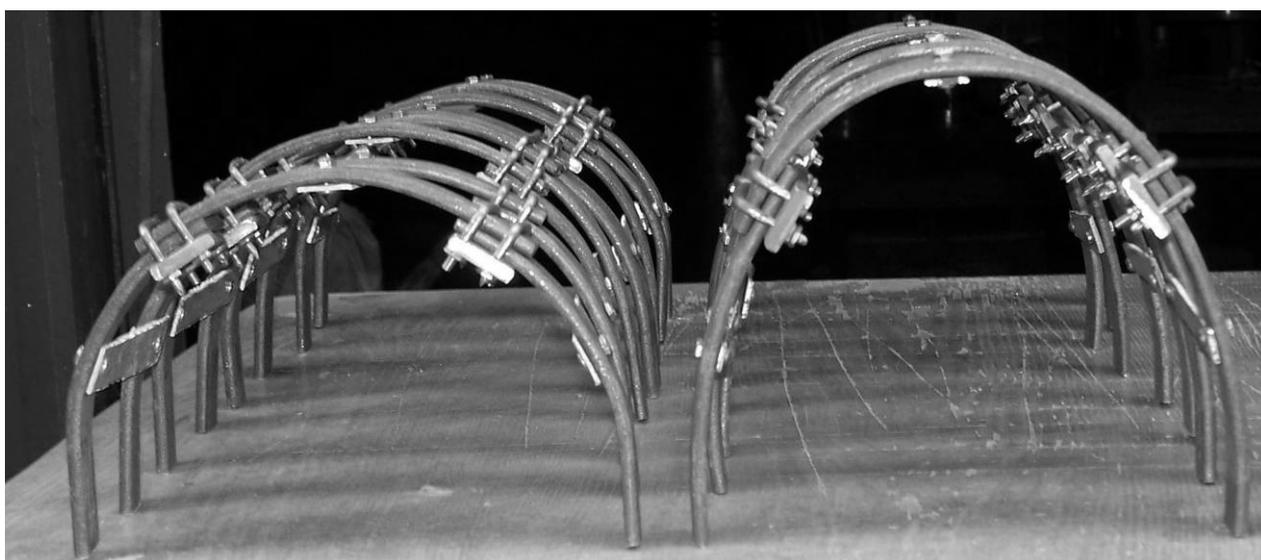


Рис. 1 – Модели крепей КМП-А3 (слева) и КМП-А3Р2 (справа)

При моделировании породного массива за основу была принята типичная структура его строения в окрестности угольного пласта  $d_4$  (шахта «Красноармейская-Западная № 1») [8]. Непосредственная кровля и почва пласта представлены слоистым алевролитом средней прочности, а основная кровля – более прочным песчаником.

Рассматриваемая физическая модель соответствует критериям геометрического подобия для всех ее основных элементов. Силовое подобие определяется примерным сохранением соотношения прочностных характеристик отвердевших слоев модели и соответствующих породных слоев в природе, что показано в табл. 2.

Таблица 2 – Прочностные характеристики пород и слоев модели

Порода (материал)	Прочность на сжатие $\sigma_{сж.}$ , МПа	Эквивалентный материал (через 28 суток после твердения)	Прочность на сжатие $\sigma_{сж.}$ , МПа	Соотношение прочностей природы и модели
песчаник	75	смесь № 1	32	2,34
алевролит	45	смесь № 2	20	2,22
уголь	15	смесь № 3	7	2.14
литая полоса	35	смесь № 4	15	2,33

Для обеспечения разнопрочности слоев, они выполнялись с применением различных составов. Состав смесей для приготовления эквивалентных материалов представлен в табл. 3.

Таблица 3 – Объемное соотношение компонентов для приготовления твердеющих смесей

Номер смеси	Песок	Цемент	Вода
1	100	19	25
2	100	15	22
3	100	7	20
4	100	12	21

Для формирования слоистой структуры модели использовались специальные заливочные формы. Каркас форм разборной, выполнен из дерева. Временные перегородки между слоями выполнены из пластика. Перед установкой они смазывались минеральной смазкой и извлекались на стадии начала потери подвижности твердеющей смеси.

На первом этапе создания модели происходила заливка смесей и их предварительное твердение сроком до двух суток, после чего модель вынималась из формы.

Следующим этапом при подготовке модели является установка анкеров. Они выполнялись в виде гвоздей диаметром 3 и длиной 80 мм. Для установки анкеров на стадии начала отвердения бетона с помощью шаблона выполнялось формирование отверстий диаметром 3 мм. Для обеспечения сцепления с массивом по всей длине анкера-гвозди перед установкой смазывались клеем «Момент».

Расположение анкеров – в ряд по центру внутренней поверхности выработки, посередине между двумя рамами. Схема установки анкеров представлена на рис. 2.

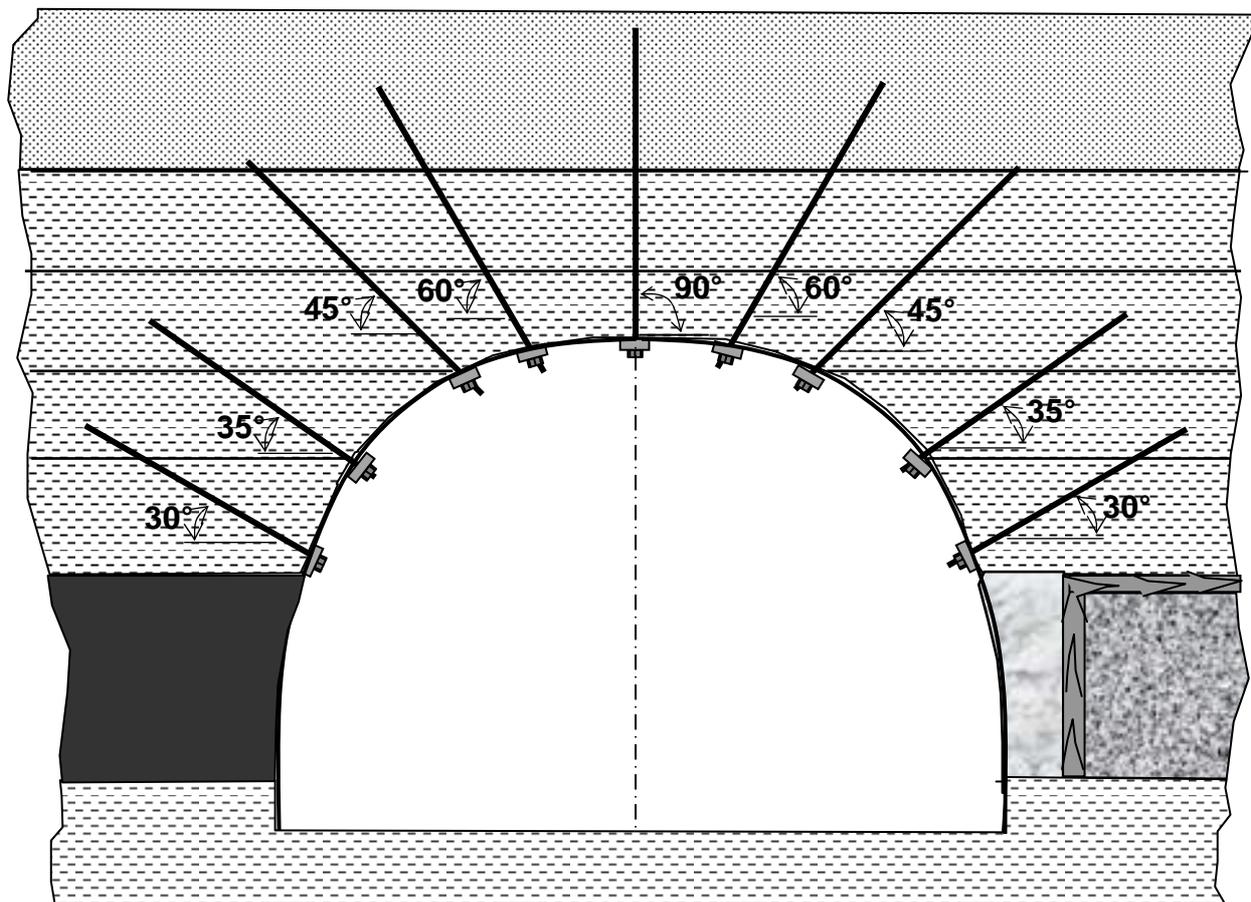


Рис. 2 – Базовая схема расположения анкеров

После установки анкеров выполнялась установка рам с соблюдением геометрического подобия расположения всех элементов крепи. Дальнейшая доводка модели предусматривала расклинивание рам деревом, выполнение забутовки в пространстве между рамой и литой полосой. На этом этапе также выполнялась засыпка щебнем и заливка тощей песчано-цементной смесью почвы выработки в моделях, где предусматривалось использование рамной крепи с обратным сводом.

Окончательное оформление модели включало следующие технологические операции:

- установку низко модульного слоя (пенопласт) в выработанном пространстве для обеспечения минимального отпора обрушению непосредственной кровли;
- окраску породных слоев на передней поверхности модели;
- помещение модели в специальную испытательную деревянную обойму, обеспечивающую равномерное распределение давления на горизонтальные плоскости и сдерживание деформаций в поперечном направлении.

Испытания моделей проводились на жесткой испытательной установке, выполненной на базе прессы П-500. Процесс деформирования модели происходил в течении 3 – 5 минут и регистрировался путем выполнения непрерывной видеосъемки, а также периодическим фотографированием с высокой разрешающей способностью (12 Мпс). Фотографирование выполнялось таким образом, чтобы в кадр вместе с деформируемой моделью попадали силоизмеритель и расположенная в одной плоскости с моделью линейка с миллиметровыми делениями. Наличие линейки в кадре позволило при обработке фотоизображений определять абсолютные величины текущего значения высоты  $H$  выработки и ее площади  $S$  поперечного сечения. Схема определения указанных параметров иллюстрируется рис. 3. Для автоматического вычисления их значений использовался программный комплекс AutoCAD 2007.

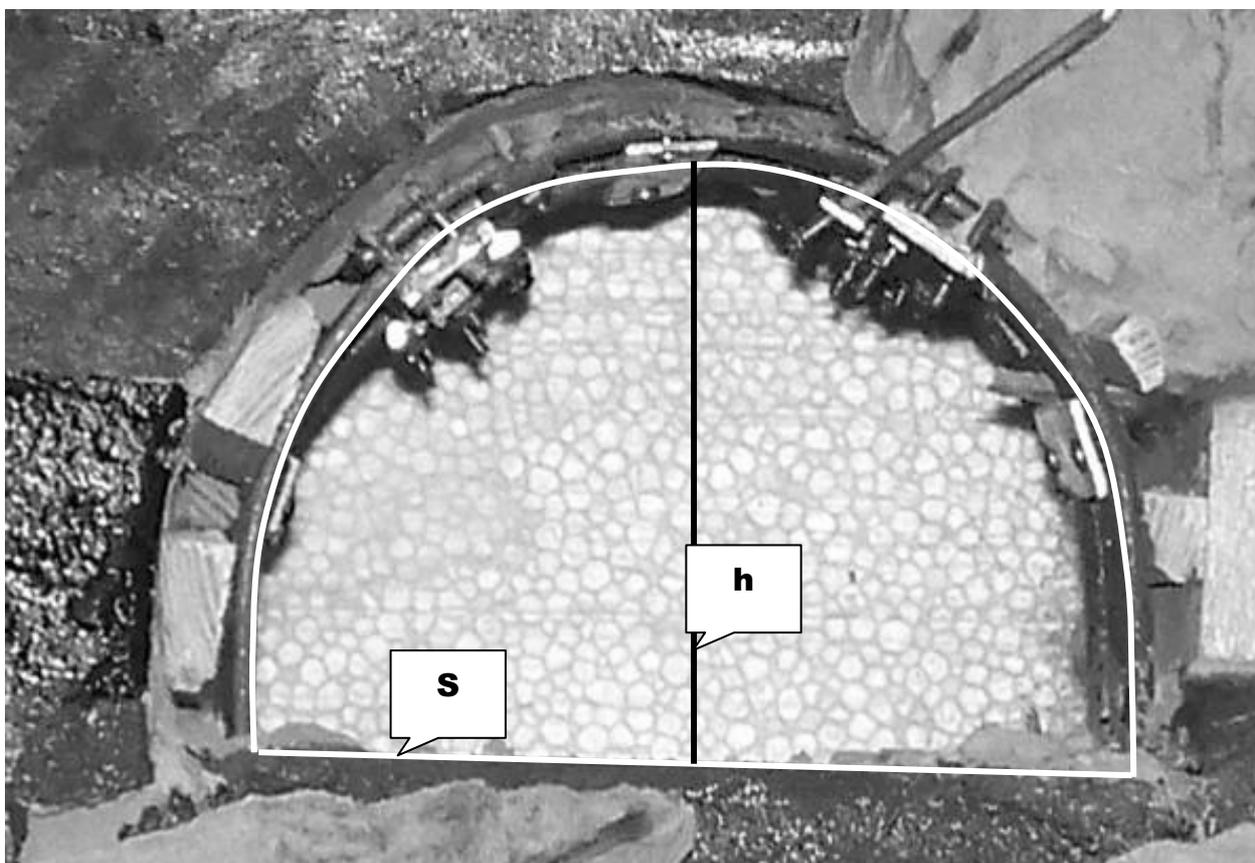
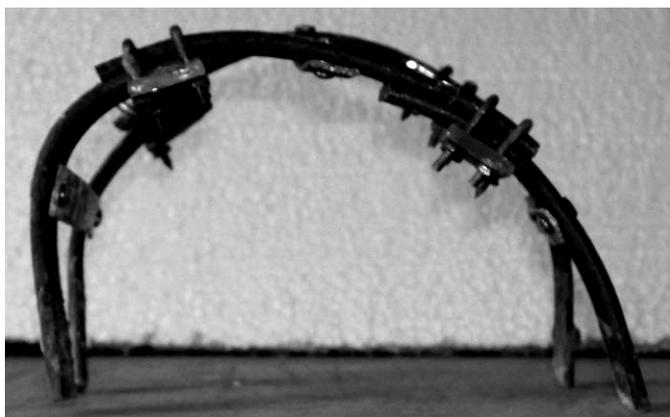


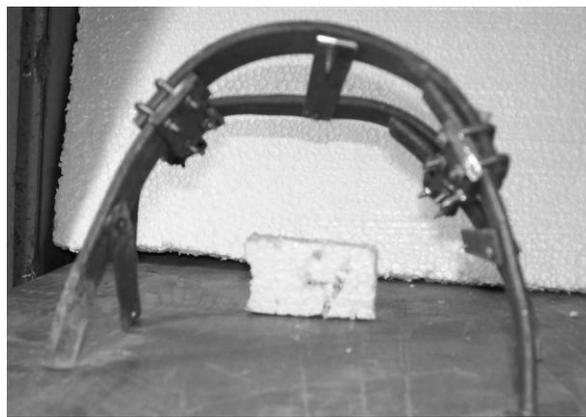
Рис. 3 – Схема определения текущих геометрических размеров выработки в модели

В процессе выполнения испытаний модель частично разрушается, внутренняя часть выработки заполняется обломками, и сечение рамы не всегда просматривается полностью, что затрудняет обработку фотоизображений на конечной стадии деформирования. Поэтому после завершения испытаний модели рам извлекались, а затем фотографировались отдельно. Это позволило более точно определить характер их деформирования.

Типичные формы деформированных рам для различных вариантов крепи представлены на рис. 4.



а)



б)



в)



г)

а) КМП-А3; б) КМП-А3Р2; в) КМП-А5; г) замкнутая крепь

Рис. 4 – Внешний вид различных конструкций рам после выполнения разрушающих испытаний моделей

По результатам исследований установлено, что модели крепей с различной конструкцией при одинаковых условиях нагружения деформируются различным образом.

До сих пор широко используемая на шахтах Донбасса крепь КМП-А3 имеет верхняк с большим радиусом. Вероятно, эта особенность крепи обуславливает характер ее деформирования. При нагружении конструктивная податливость не выбирается полностью, однако происходит выполаживание верхняка и рама в поперечном сечении приобретает резко асимметричную форму. Максимальная нагрузка на рамную конструкцию приходится на замковое соединение между верхняком и стойкой со стороны выработанного пространства. Указанная на рис. 4а форма поперечного сечения хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений выработок повторного использования. В отдельных случаях наблюдаемый реально прогиб верхняка рамы приобретает даже седловидный характер.

Разработанная в ЗДНТЦ «Геомеханика» двухрадиусная крепь КМП-А3Р2 предназначена для условий повышенного горного давления. Ее особенностью

является уменьшенный радиус верхняка. Это позволяет налегающей породной толще в определенном смысле скользить по верхняку со стороны выработанного пространства, уменьшая давление на раму. Данная крепь характеризуется также более высокой податливостью, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, что позволяет при существенных деформациях выработки в основном сохранить ее первоначальную форму. Вертикальная податливость крепи выбирается преимущественно со стороны выработанного пространства. Деформации верхняка незначительны. При явно большем выборе податливости замкового соединения со стороны выработанного пространства, асимметрия выработки меньше, чем в предыдущем случае.

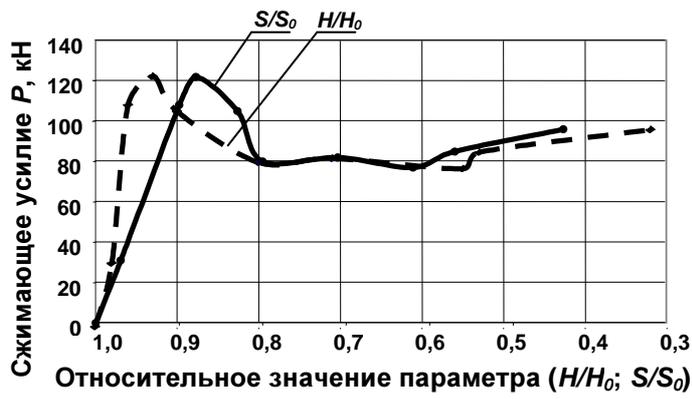
Неплохие результаты получены для пятиэлементной крепи КМП-А5. Благодаря увеличенному количеству элементов обеспечивается лучшая адаптация к неравномерной нагрузке на контур рамы. Представленная фотография деформированной рамы показывает, что выбор вертикальной податливости произошел преимущественно на соединениях основных и дополнительных стоек. Вторая составляющая вертикальной податливости – деформация верхняка, сопровождающаяся незначительной асимметрией.

Испытания замкнутой крепи с обратным сводом выявило ее существенные недостатки. Модели с обратным сводом для эффективной работы требуют запрещения поперечных деформаций на участке сопряжения стоек крепи и обратного свода. При отсутствии такого запрещения, что имеет место как на модели, так и в реальной ситуации в шахтных условиях, сопряжения становятся точками изгиба и для сплющивания модели в вертикальном направлении требуется усилие даже меньше, чем при вдавливании стоек в почву.

Выше было проанализировано конечное состояние рам после выполнения разрушающих испытаний. Однако, важным для эксплуатации крепей фактором является также динамика процесса потери поперечного сечения выработки. Она определяется как необратимыми деформациями рамы, так и вдавливанием стоек в почву выработки.

Динамика изменения геометрических размеров модели в целом и выработки в частности определяется деформационно-силовыми характеристиками всей совокупности составляющих ее элементов. Для корректного сравнения роли рамной крепи в составе комбинированной охранной системы были выбраны модели, основным отличием которых было только изменение типа рамы. С учетом различных значений начальных геометрических размеров текущее значение высоты  $H$  и поперечного сечения  $S$  дается относительно их первоначальных значений. По имеющимся фотоматериалам с синхронной регистрацией показаний силоизмерителя и текущей геометрии модели построены зависимости изменения геометрических параметров от прикладываемой к модели нагрузки  $P$ . Соответственно рассматриваются четыре варианта, иллюстрируемые графиками на рис. 5.

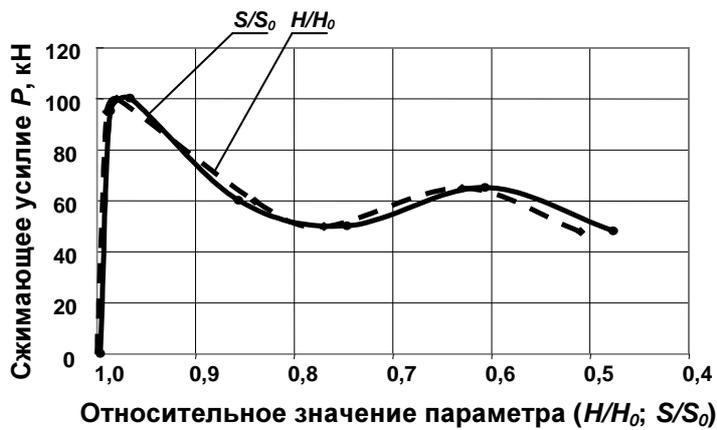
По результатам анализа совокупности диаграмм деформирования построена итоговая таблица 4 важнейших прочностных параметров моделей с различными типами рамной крепи.



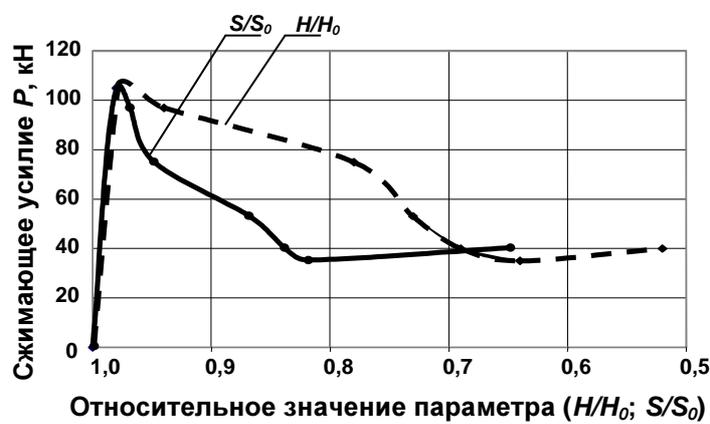
а) с крепью КМП-А3



б) с крепью КМП-А3P2



в) с крепью КМП-А5



г) с замкнутой крепью

Рис. 5 – Нагрузочные характеристики различных вариантов моделей

Таблица 4 – Усредненные прочностные параметры моделей с различными типами рамной крепи

Моделируемая крепь	Предел прочности модели на сжатие $\sigma_{сж}$ МПа	Остаточная прочность на сжатие $\sigma_{ост}$ МПа	Отношение $\sigma_{ост.}/\sigma_{сж.}$
КМП-А3	1,89	1,0	0,53
КМП-А3Р2	2,95	1,1	0,37
КМП-А5	1,96	0,7	0,35
замкнутая	1,75	0,6	0,34

Широко используемая на шахтах Донбасса крепь КМП-А3 в комплексе с остальными элементами комбинированной охранной системы позволяет сохранять форму выработки только при умеренных нагрузках, носящих симметричный характер. Однако, следует обратить внимание на повышенную (относительную) остаточную несущую способность охранной системы с этой крепью. Наблюдаемая характеристика запредельного деформирования модели является предпосылкой для плавного во времени и поэтому прогнозируемого уменьшения сечения выработки.

Модели с двухрадиусной крепью КМП-А3Р2 отличаются наиболее высокой несущей способностью. Искажение формы выработки меньше, чем для модели с рамой КМП-А3. Абсолютное значение остаточной прочности близко к предыдущему варианту. Из этого вытекает возможность быстрого во времени уменьшения сечения выработки на определенном этапе ее нагружения. Следует, однако, учесть, что потеря сечения во многом вызвана вдавливанием стоек модели рамы в моделируемый слой почвы выработки. Устранение указанного недостатка позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики крепи.

Как уже отмечалось ранее, пятизвенная крепь показала высокую способность к адаптации по отношению к несимметричному нагружению и в наибольшей степени способствовала сохранению приемлемой формы остаточного сечения выработки в свету. В то же время, нагрузочная способность комбинированной охранной системы с ее участием не намного выше базового варианта с крепью КМП-А3. Использование такой крепи целесообразно при выборе начального сечения выработки с большим запасом. При снижении величины поперечного сечения выработки до 50%, что для выработок повторного использования является характерным значением после удаления более чем 100 м от лавы, крепь будет иметь, по крайней мере, приемлемую форму.

Испытанная конструкция замкнутой крепи с обратным сводом показала неудовлетворительные во всех отношениях характеристики: наиболее низкие зна-

чения несущей способности и остаточной прочности, большие вертикальные и горизонтальные (в узлах соединения стоек и обратного свода) деформации.

Таким образом, по результатам физического моделирования альтернативой для замены крепи КМП-А3, эксплуатируемой в условиях повышенного горного давления и асимметричной нагрузки, являются пятизвенная крепь КМП-А5 и двухрадиусная КМП-А3Р2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байсаров, Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых выработок / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, А.И. Демченко. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2005. – 240 с.
2. Ильяшов, М.А. Охрана повторно используемых выработок, как один из факторов обеспечения эффективности и безопасности разработки угольных пластов на больших глубинах / М.А. Ильяшов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 66. – С. 39-44.
3. Борщевский, С.В. К вопросу о геомеханических принципах и совершенствовании технологии комплексного поддержания повторно используемых выемочных штреков / С.В. Борщевский, О.Д. Кожушок // Перспективы развития Восточного Донбасса: сб. науч. тр. Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2008. – Ч. 1. – С. 390–397.
4. Булат А.Ф. Технологический регламент поддержания повторно используемых выемочных штреков комбинированными охранными системами / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, М.А. Ильяшов, О.Д. Кожушок [и др.]. – Днепропетровск – Донецк: «ВИК», 2009. – 36 с.
5. Кожушок, О.Д. Математическое моделирование работы комбинированной охранной системы при поддержании выемочного штрека за лавой ] / О.Д. Кожушок, М.А. Ильяшов // Школа підземної розробки: III міжнародна науково-практична конференція (м. Дніпропетровськ, 13 - 19 вересня 2009 р.). - Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – С. 185 - 193.
6. Кузнецов Г.Н. Роль и задачи моделирования методом эквивалентных материалов в исследовании вопросов механики горных пород / Г.Н. Кузнецов // Тр. ВНИМИ. – Л.: Изд-во ВНИМИ. - 1970. – № 76. – 96 с
7. Глушихин Ф.П. Моделирование в геомеханике / Ф.П. Глушихин, Г.Н. Кузнецов, М.Ф. Шклярский [и др.]. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
8. Яйцов А.А. Результаты оценки условий поддержания подготовительных выработок в условиях шахты «Красноармейская-Западная № 1» / А.А. Яйцов, О.Д. Кожушок, В.А. Болбат, Н.А. Бугаева // Проблеми гірського тиску: зб. наук. праць / ДонНТУ. – Донецьк, 2007. – Вип. 15. – С. 19-32.