

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАМНЫХ ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ УСИЛЕННЫХ ПОДАТЛИВЫХ КРЕПЕЙ

Э.В. Фесенко, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Украина

Предложена конструкция и исследована работа рамной трапециевидной крепи с центральной стойкой повышенного сопротивления (КРТУ). Исследованы и обоснованы наиболее рациональные конструктивные параметры крепи КРТУ в целом и отдельных ее элементов для различной несущей способности крепи. Выполнен расчет и сравнение эффективности работы различных вариантов конструирования крепи с помощью предложенного параметра работоспособности.

подавляющее большинство рамных крепей, применяемых в настоящее время в угольной промышленности, изготавливают из специального взаимозаменяемого шахтного профиля СВП. В среднем расходуется около 300-350 т металлопроката на каждый километр выработки. При этом возведение крепи, как правило, производят вручную, что при значительных размерах выработки (более 11-12 м²) весьма трудоемко, поскольку масса элемента крепи (верхняка), который необходимо установить на высоте 3,5-4 м, может достигать 140-160 кг. Поэтому так актуальна проблема снижения расхода металла, стоимости и трудоемкости крепления выработок для горнодобывающей промышленности.

В работах [1, 2] предложен один из путей снижения расхода материала при креплении выработок, заключающийся в использовании для рамной крепи замкнутого тонкостенного профиля прямоугольного очертания. Его прочность на изгиб (при условии равенства масс 1 п. м.) выше, чем у стандартных спецпрофилей типа СВП того же сечения в 1,5 – 2 раза, а при кручении – в 16 – 27 раз.

Выполненный анализ существующих конструкций рамной податливой крепи [3] позволил выявить основные их недостатки и сформулировать задачи по разработке новых конструкций крепей. В результате была предложена новая крепь рамная трапециевидная усиленная (КРТУ), которая состоит из двух боковых и центральной стоек из спецпрофиля СВП и верхняка с консолями, выполненного из замкнутого профиля прямоугольного очертания (прямоугольной трубы). При этом центральная стойка имеет повышенное сопротивление податливости, а верхняк в месте соединения с центральной стойкой снабжен элементом усиления.

Расчеты выполнены для крепи с несущей способностью $P = 400$ кН, обоснованы параметры несущих элементов и узлов податливости центральной и боковых стоек, рассчитан расход металла для изготовления крепи [3, 4]. Однако применяемые в настоящее время рамные арочные крепи имеют различные типоразмеры и несущую способность, что позволяет в различных горно-геологических условиях рационально их использовать. Поэтому для новой крепи КРТУ также необходимо выполнить расчет параметров несущих элементов на разную несущую способность с целью оптимального ее применения при креплении горных выработок, находящихся в различных условиях эксплуатации.

Цель исследований состоит в изучении особенностей и эффективности работы различных типов несущих профилей в крепи КРТУ под действием вертикальной нагрузки. **Объектом** исследований является рамная податливая трапециевидная крепь с центральной стойкой, а **предмет исследований** – конструкция и параметры этой крепи. **Задачами исследований** являются расчет и обоснование параметров, определение эффективности работы КРТУ при различных типах несущих профилей.

Основная идея исследований состоит в учете особенностей формирования внешней нагрузки на крепь в различных стадиях ее работы и последующем выборе параметров рамной трапециевидной крепи горных выработок.

Для определения параметров КРТУ выполним расчет данной конструкции с использованием метода конечных элементов с помощью программы Лира.

Расчетная схема крепи представлена на рисунке 1. Высота крепи принята $h = 3$ м, возможная

величина податливости $\Delta U = 1000 - 1500$ мм. Такие геометрические характеристики позволяют использовать крепь КРТУ в условиях больших смещений пород контура в зоне влияния очистных работ. Площадь поперечного сечения крепи $S = 13,5$ м². Угол наклона стоек составляет 80° , длина консолей верхняка принята равной 0,5 м. Консоли обеспечивают более равномерное распределение нагрузки на верхняк, уменьшение изгибающих моментов и предотвращение просыпания породы с кровли на стойки крепи, особенно в районе сопряжения крепи с лавой.

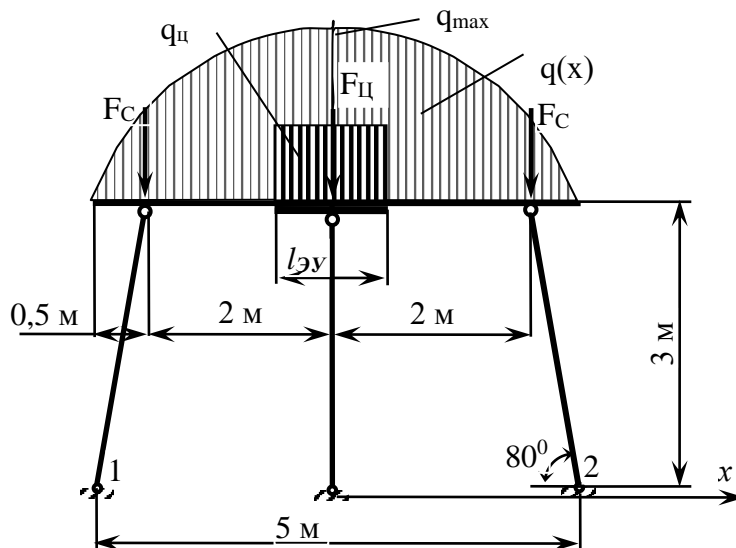


Рис. 1. Расчетная схема крепи КРТУ

Нижние узлы 1, 2 стоек опираются на почву выработки и приняты как неподвижные шарниры. Соединение стоек с верхняком также принято шарнирным. Элемент усиления верхняка имеет длину $l_{\text{эу}}$ и создает на участке усиления повышенный момент инерции J_x и момент сопротивления W_x . Для того, чтобы внешние усилия на крепь при ее работе в режиме податливости имели вид равномерно распределенной нагрузки, сопротивление узла податливости центральной стойки принято в два раза выше, чем боковой, т.е. $N_{\text{Ц}} = 2N_{\text{С}}$. Предел текучести стали, из которой изготовлены элементы крепи, принят $R_y = 240$ МПа.

В работе [3] приведено обоснование выбора закона распределения и величины внешней нагрузки на крепь до ее перехода в податливую стадию работы с использованием принципа максимального правдоподобия, что позволяет более достоверно и точно выполнить расчеты.

В настоящий момент нормативный документ, регламентирующий расчеты крепей горных выработок [5], не учитывает возможную неравномерность внешних нагрузок на крепь, считая ее равномерно распределенной. Однако, вероятнее всего, разрушенные породы будут давить на верхняк крепи неравномерно, оказывая максимальное давление в центре выработки, где смещения пород в выработку максимальны, при этом часть нагрузки на крепь будет приложена в виде сосредоточенных сил $\sum F_i$ к узлам крепи, а другая часть – в виде распределенной по некоторому закону нагрузки q , т.е.:

$$Q = (1 - k_q) \cdot \sum (q_i \cdot l_i) + k_q \cdot \sum F_i, \text{ кН} \quad (1)$$

где Q – общая нагрузка на раму крепи, кН;

$\sum (q_i \cdot l_i)$ – распределенная нагрузка на крепь, кН;

i – порядковый номер участка на верхняке крепи;

q_i – усредненная распределенная нагрузка на участке l_i ;

$\sum F_i$ – нагрузка на крепь в виде сосредоточенных сил;

k_q – коэффициент неравномерности нагрузки.

Коэффициент неравномерности нагрузки k_q показывает соотношение между распределенной нагрузкой $\sum(q_i \cdot l_i)$ и сосредоточенными силами $\sum F_i$, слагающими в сумме внешнюю нагрузку на крепь Q . При $k_q = 1$ вся нагрузка на крепь передается сосредоточенными силами, при $k_q = 0$ – распределенными. Этот показатель зависит от особенностей взаимодействия крепи с породным контуром, зазоров и контактных условий между крепью и породой, физико-механических свойств вмещающих выработку пород и технологии сооружения выработки.

Значение коэффициента k_q следует определять из шахтных инструментальных измерений или по методу аналогии, используя опыт эксплуатации подобных выработок. Поскольку точное значение коэффициента k_q неизвестно, в расчетах, как наиболее вероятное, можно принять $k_q = 0,5$, а закон распределения сил на верхняке $q(x)$ в общем случае можно описать степенной функцией с максимальным значением q_{\max} в центре верхняка (рис. 1):

$$q(x) = q_{\max} \left(1 - \frac{x^n}{a^n}\right), \quad (2)$$

где x – текущая горизонтальная координата, отсчитанная от центра выработки (рис. 1);

a – половина ширины выработки ($a = 2,5$ м);

n – показатель степени функции распределения нагрузки, характеризует ее равномерность, при $n = 0$ (равномерность нулевая) распределенная нагрузка вырождается в сосредоточенную силу, т.е. крайняя степень неравномерности, при $n \rightarrow \infty$ распределенная нагрузка становится равномерной, а при $n = 2$ нагрузка распределена по квадратичной параболе.

Учитывая теоретические решения горной геомеханики и накопленный опыт управления горным давлением в горных выработках, можно в первом приближении принять при расчетах $n = 2$, имея в виду его уточнение при проведении шахтных инструментальных измерений на различных конструкциях крепи.

Кроме того, элемент усиления верхняка имеет размер $l_{\text{ЭУ}}$, поэтому сосредоточенную силу $F_{\text{Ц0}}$, приложенную в центре верхняка разделим на два слагаемых – сосредоточенную $F_{\text{Ц}}$ и равномерно распределенную $q_{\text{ц}}$ (рис. 1): $F_{\text{Ц0}} = F_{\text{Ц}} + q_{\text{ц}}$. При этом:

$$q_{\text{ц}} = \frac{F_{\text{Ц0}}}{2l_{\text{ЭУ}}}. \quad (3)$$

Проведем расчет элементов крепи для несущей способности $P = 300 \dots 600$ кН. Крепь перейдет в податливую стадию работы, когда внешняя нагрузка превысит суммарное сопротивление узлов податливости, установленных на стойках. Поэтому для обеспечения заданной несущей способности в каждом случае рассчитаем требуемое сопротивление узлов $N_{\text{Ц}}$ и $N_{\text{С}}$, а также параметры внешней нагрузки с учетом (1 – 3). Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Задачи расчета состояли в получении эпюры изгибающих моментов, определении рациональной длины элемента усиления $l_{\text{ЭУ}}$, подборе прочных размеров несущих элементов верхняка и элемента усиления. Стойки крепи выполнены из спецпрофиля СВП. В результате с помощью программы Лира получена следующая эпюра изгибающих моментов (рис. 2).

Таблица 1 – Требуемое сопротивление узлов податливости и параметры внешней нагрузки при различной несущей способности крепи КРТУ

P крепи, кН	$N_{Ц}$, кН	N_C , кН	q_{max} , кН/м	$F_{Ц0}$, кН	$F_{Ц}$, кН	F_C , кН	$q_{ц}$, кН/м
300	150	75	45	85,5	42,8	32,3	53,5
400	200	100	60	114,0	57,0	43,0	71,3
500	250	125	75	142,5	71,3	53,8	89,1
600	300	150	90	171,0	85,5	64,5	107,0

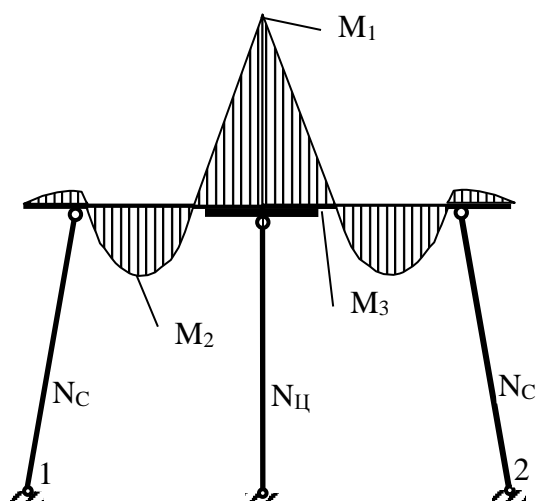


Рис. 2. Эпюра изгибающих моментов

Для расчета прочных размеров элементов верхняка учитывались экстремальные изгибающие моменты: M_1 – в центре верхняка, M_2 – между центральной и боковыми стойками, M_3 – на границе элемента усиления. Работу крепи необходимо разбить на 2 стадии: 1) жесткий режим работы до срабатывания узлов податливости; 2) податливый режим работы. В результате расчета установлено, что при постепенном возрастании нагрузки на крепь первым предельное состояние достигает узел податливости центральной стойки $[N_{Ц}]$, при этом в боковых стойках усилия еще недостаточны для срабатывания узлов податливости $N_C < [N_C]$. Общая нагрузка на крепь в этот момент равна $Q = 0,8P$ (где P – проектируемая несущая способность крепи).

Дальнейшее увеличение внешней нагрузки приведет к ее перераспределению на недогруженные боковые стойки, поскольку центральная стойка не может воспринимать нагрузку выше предельной для нее $[N_{Ц}]$. Внешняя нагрузка может расти до момента достижения предельного значения в боковых стойках, когда $N_C = [N_C]$. Таким образом, крепь как бы «сама» формирует на себя распределение внешней нагрузки, «уходя» от горного давления.

При выбранном соотношении сопротивления стоек $N_{Ц} = 2N_C$, внешняя нагрузка примет вид равномерно распределенной. Общая нагрузка на крепь в податливой стадии работы (ее несущая способность P) будет равна сумме сопротивления всех узлов податливости, установленных на стойках, т.е. $P = N_{Ц} + 2N_C$. При достижении внешней нагрузкой $Q = P$ крепь переходит во второе предельное состояние.

На первом этапе выполнен расчет и проектирование элементов крепи с верхняком и элементом усиления из замкнутого коробчатого профиля прямоугольного очертания (прямоугольной трубы).

Порядок расчета крепи и выбора прочных размеров ее элементов состоит в следующем:

1. Определение изгибающих моментов в характерных точках профиля M_1 , M_2 , M_3 при

величине внешней нагрузки $Q = 0,8P$ (первое предельное состояние).

2. Подбор прочных размеров несущего элемента верхняка.

3. Подбор типоразмера профиля и длины $l_{ЭУ}$ элемента усиления верхняка.

4. Определение изгибающих моментов в характерных точках профиля M^I_1, M^I_2, M^I_3 при величине внешней равномерно распределенной нагрузки $Q = P$ (второе предельное состояние).

5. Проверка прочности подобранных элементов крепи на полную несущую способность.

Длина и жесткость элемента усиления выбиралась из условия восприятия высокого изгибающего момента в центральной части верхняка. Поскольку верхняк в крепи КРТУ является статически неопределимым, с переменными сечением и жесткостью, то рациональную длину элемента усиления рассчитывали методом последовательных приближений. Согласно проведенным расчетам длина элемента усиления должна составлять $l_{ЭУ} = 0,8$ м.

В соответствии с расчетами (табл. 2) проведено конструирование верхняка крепи для несущей способности рамы $P = 300 \dots 600$ кН (табл. 3).

Таблица 2 – Результаты расчета изгибающих моментов в верхняке крепи КРТУ

Несущая способность крепи, кН	Расчетные изгибающие моменты в сечениях верхняка, кН·м					
	в I предельном состоянии			во II предельном состоянии		
	M_I	M_2	M_3	M^I_1	M^I_2	M^I_3
300	22,4	5,74	5,31	20,9	5,3	4,8
400	29,5	7,66	7,08	27,8	7,1	6,5
500	37,4	9,57	8,84	34,8	8,8	8,1
600	44,8	11,5	10,57	41,8	10,6	9,7

Отметим, что в стойках данной конструкции крепи моменты равны нулю, т.е. выполняется условие их центрального сжатия.

Как видно из расчетов, изгибающие моменты во втором предельном состоянии работы крепи в соответствующих опасных сечениях не превышают моментов для первого предельного состояния. Это значит, что профили крепи, подобранные для первого предельного состояния, обеспечат необходимую прочность и во втором предельном состоянии.

Таблица 3 – Результаты подбора несущих профилей прямоугольного очертания верхняка КРТУ

Несущая способность крепи, кН	Верхняк			Элемент усиления			Общая масса верхняка, кг
	типоразмер	Момент сопротивления $W_x, \text{см}^3$	масса 1 п.м., кг	типоразмер	Момент сопротивления $W_x, \text{см}^3$	масса 1 п.м., кг	
300	110x70x3	26,94	7,54	120x100x6	80,68	18,87	52,8
400	110x90x3	37,09	8,96	140x100x5	86,9	17,55	58,9
500	110x60x5	41,82	12,05	140x120x6	116,1	22,63	78,4
600	120x80x4	49,1	11,73	150x100x8,8	143,2	30,02	82,7

Из расчетов следует, что при увеличении несущей способности крепи с верхняком из замкнутого профиля прямоугольного очертания в два раза (с 300 до 600 кН), масса верхняка увеличивается в 1,57 раза или на 57 %. Однако для крепи с несущей способности $P = 600$ кН, необходимо установить на центральной стойке узел податливости с рабочим сопротивлением $N_{Ц} = 300$ кН. В настоящее время серийно выпускаемых узлов податливости, отвечающих таким характеристикам, не существует. Исходя из этого актуальной становится задача разработки соответствующих конструкций узлов податливости рамных крепей с высокими рабочими характеристиками для проектирования и применения крепей повышенной несущей

способности ($P > 500$ кН).

На следующем этапе для данной расчетной схемы (рис. 1) выполнен расчет несущей способности и параметров крепи с верхняком из спецпрофиля СВП различных типоразмеров. Рассмотрено два варианта конструирования верхняка: с элементом усиления из такого же типоразмера СВП, как и верхняк и без усиления. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета крепи КРТУ с верхняком из спецпрофиля СВП

Тип профиля СВП	Верхняк без усиления				Верхняк с элементом усиления			
	Расчетная несущая способность крепи P , кН	Действующие усилия в узлах податливости, кН		Масса верхняка, кг	Расчетная несущая способность крепи P , кН	Действующие усилия в узлах податливости, кН		Масса верхняка, кг
		$N_{ц}$	N_c			$N_{ц}$	N_c	
14	120	75	22,6	73,5	240	150	45,2	85,3
17	150	93	27,8	85,5	300	186	55,6	99,2
19	172	108	32,3	96,0	344	216	64,6	111,4
22	200	125	37,6	109,5	400	250	75,2	127,0
27	250	158	47,4	135,0	500	316	94,8	156,6
33	380	240	71,4	167	760	480	143	194,0

Согласно проведенным расчетам, при проектировании крепи из верхняка без усиления, для профилей СВП 14, 17 и 19 разрушение верхняка будет происходить до перехода рамы в податливую стадию работы, поскольку моменты в опасных сечениях достигают предельных значений, а усилия в стойках крепи еще недостаточны для срабатывания узлов податливости. Такая крепь не отвечает принципу равнопрочности ее элементов.

Кроме того, расчетная несущая способность P крепи при всех типоразмерах СВП имеет значения меньше, чем для крепи с верхняком их замкнутого профиля проката, а масса верхняка из СВП значительно превышает массу верхняка из коробчатого профиля.

При применении элемента усиления для верхняка из СВП, расчетная несущая способность крепи теоретически возрастает в 2 раза, однако необходимо обратить внимание на то, что элемент усиления может быть только того же типоразмера, как и профиль СВП верхняка, что накладывает ограничения в подборе эффективных параметров крепи. Отрезок спецпрофиля крепится к верхняку с помощью обычных хомутов узлов податливости, которые, как правило, не могут обеспечить надежную совместную работу соединяемых элементов в узле усиления из-за низкого сопротивления возникающим изгибающим моментам. Это может привести к разрушению верхняка задолго до достижения расчетной несущей способности крепи. Такие недостатки не присущи верхняку из коробчатого профиля проката, где элемент усиления может быть закреплен на верхняке способом «труба в трубе», обеспечивая надежную совместную работу несущих профилей в узле усиления.

Следует обратить внимание на необходимость обеспечения высокого сопротивления узлов податливости для достижения расчетной несущей способности крепи P . Так, для крепи с усиленным верхняком из СВП 27 и 33 $N_{ц} = 316...480$ кН, что, как было сказано выше, в данный момент обеспечить проблематично.

Проведенные исследования позволяют перейти к оценкам эффективности крепи КРТУ с различными вариантами конструирования верхняка. В работе [3] для сравнения различных конструкций крепи предложено использовать параметр работоспособности Π_w , который позволяет учитывать в обобщенном виде особенности деформационно-силовой ее характеристики, – величину несущей способности P , кН и конструктивной податливости U , м отнесенные к общей массе крепи m , кг :

$$\Pi_w = \frac{P \cdot U}{m}, \frac{\text{кН} \cdot \text{м}}{\text{кг}}. \quad (4)$$

Чем выше параметр работоспособности крепи P_w , тем более рационально используется металл в ее конструкции, тем она эффективнее. Физический смысл этого показателя состоит в том, что он одновременно отражает главные параметры конструкции при ее взаимодействии с массивом, т.е. несущую способность и деформируемость в податливом режиме, которые надо максимизировать. С другой стороны, в показателе P_w учтен расход материала в конструкции, причем крепь тем эффективней, чем меньше ее масса. Удобство практического применения показателя P_w для крепи разных конструкций состоит в том, что входящие в него параметры легко определяются из испытаний крепи или ее расчета.

Поскольку в данном случае податливость крепи U во всех случаях одинакова, исключим этот параметр из формулы (4) и рассчитаем параметр P_w для всех вариантов конструирования КРТУ. Результаты расчета представлены на графике (рис. 3).

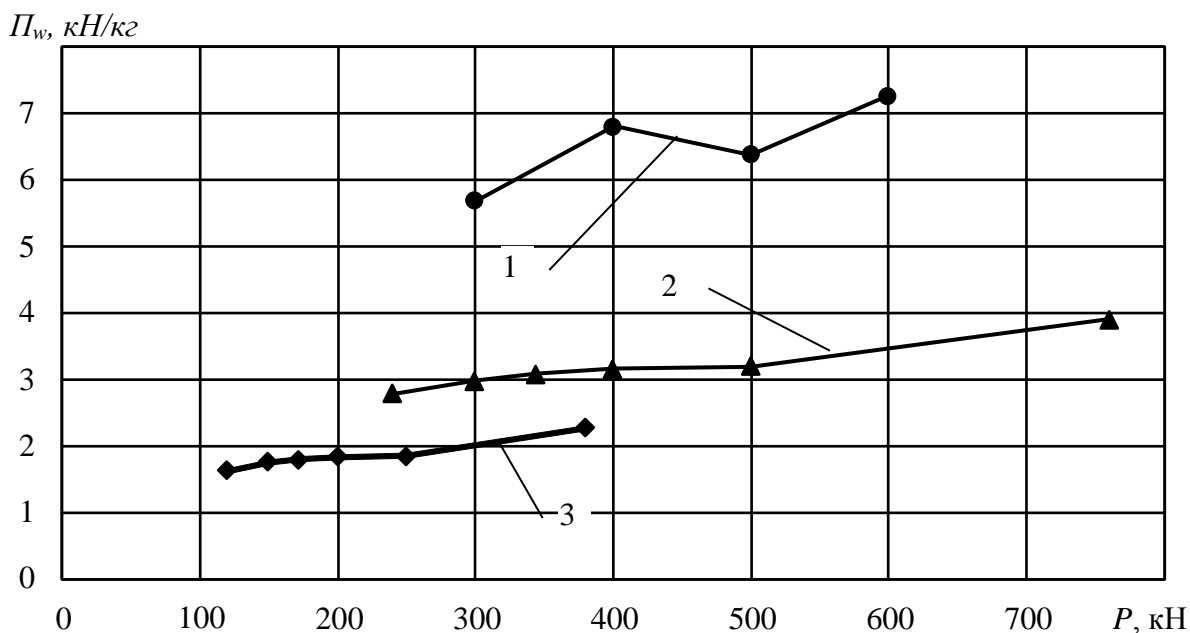


Рис. 3. Зависимость параметра работоспособности крепи P_w от несущей способности P при различном типе верхняка: 1 – из коробчатого замкнутого профиля, 2 – из профиля СВП с усилением, 3 – из профиля СВП без усиления

Проведенные сравнительные расчеты по оценке параметра работоспособности P_w крепи КРТУ с верхняком из замкнутого коробчатого профиля проката и крепи с верхняком из спецпрофиля СВП позволяют подтвердить явное преимущество первой. При одинаковой несущей способности крепь из коробчатого профиля (линия 1) имеет показатель эффективности в 2 – 3 раза выше такой же крепи с несущим профилем из СВП (линии 2, 3). Это подтверждает высокую эффективность использования стального проката в крепи первого типа, когда единица материала крепи обеспечивает большую несущую способность конструкции.

Анализируя процесс взаимодействия крепи КРТУ с окружающим массивом горных пород, можно заключить, что крепь, переходя в податливый режим работы, формирует не только верхний предел суммарной нагрузки со стороны кровли, но и особенности ее распределения за счет конструктивного назначения высокого сопротивления податливости центральной стойки и повышенной жесткости элемента усиления. С позиций горной геомеханики главной особенностью такого управления нагрузкой на крепь является создание преобладающего отпора крепи в центре пролета верхняка за счет центральной стойки повышенного сопротивления и передачи этого отпора непосредственно на почву, минуя большую часть длины верхняка. Такое конструктивное решение оказывает крайне благоприятное воздействие на деформационное поведение слоистых пород плоской кровли и почвы. Последние, подвергаясь разрушительному воздействию концентрации напряжений вокруг горной выработки, стремятся переместиться

внутри нее с характерной волнообразной формой продольно-поперечного изгиба и потери устойчивости слоев [6]. Установленный в центре выработки верхняк создает мощный отпор и способен в значительной части или даже полностью предотвратить такую крайне неблагоприятную форму проявления горного давления, которая превалирует на больших глубинах и особенно, в зоне вредного влияния очистных работ - выпучивание слоев пород в выработку со стороны кровли и почвы. Таким образом, в отличие от арочных крепей, которые оказываются неэффективными для предотвращения выдавливания пород, особенно со стороны почвы, крепь КРТУ оказывает мощное противодействие потере устойчивости слоев горных пород своей центральной стойкой, выполняющей функцию податливого распора и предотвращающей конвергенцию кровли и почвы.

Выводы.

1. Спецпрофиль СВП для рамных крепей ввиду его малой эффективности целесообразно заменить профилем в виде прямоугольной трубы.

2. Предложена крепь КРТУ (крепь рамная трапециевидная усиленная), отличающаяся облегченной конструкцией верхняка из коробчатого профиля с консолями и элементом усиления оптимальной длины над центральной стойкой повышенного сопротивления податливости.

3. Разработана методика расчета крепи КРТУ, отличающаяся учетом постадийного режима взаимодействия крепи и массива при возрастании нагрузки начиная от упругой стадии через поочередный или одновременный переход стоек в режим податливого сопротивления. С помощью программы «Лира» исследованы и обоснованы наиболее рациональные конструктивные параметры крепи КРТУ в целом и отдельных ее элементов, обоснована жесткость и целесообразная длина элемента усиления.

4. На основе расчета параметра работоспособности выполнены сравнительные исследования эффективности конструкции крепи КРТУ с верхняком из коробчатого профиля и спецпрофиля СВП, которые показали существенное преимущество использования замкнутого профиля проката прямоугольного очертания.

5. Показаны преимущества использования крепи КРТУ для крепления выработок с позиций горной геомеханики, что позволяет вполне обоснованно утверждать о возможности замены крепи арочной и криволинейной формы на трапециевидную крепь КРТУ под плоскую кровлю в пластовых подготовительных выработках в том числе и в зоне влияния очистных работ.

Список литературы

1. Литвинский Г.Г. Исследование эффективности прокатных профилей для рамной крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. – 2012. – №11. – С. 11 – 14.

2. Литвинский Г.Г. Оптимальный прокатный профиль для рамной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1(32). – С. 198 – 203.

3. Литвинский Г.Г. Разработка и исследование конструкции рамной трапециевидной усиленной крепи / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2014». – Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2014. – Т.2. – С. 121 – 129.

4. Фесенко Э.В. Особенности расчета и проектирования рамной трапециевидной усиленной крепи // Сб. науч. тр. – Лисичанск: ДонГТУ, 2015. – Вып. 1 (44). – С. 50 – 58.

5. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. — Прийнято та надано чинності: наказ Мінвуглепрому України від 09.01.07 № 494. — К.: Мінвуглепром України, 2007. — 113 с.

6. Шашенко А.Н. Моделирование процесса пучения пород почвы в подземных выработках / А.Н. Шашенко, М.Е. Каганов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – №11. – С. 21-26.