

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.28.042.4: 622.281.5: 622.283.5: 622.23.056

Г.Г. Литвинский, д-р техн. наук, проф.,
Э.В. Фесенко, канд. техн. наук, доц.

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Украина, e-mail: fesenkoed@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ РАМНОЙ КРЕПИ

G.G. Litvinsky, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
E.V. Fesenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

Donbass State Technical University, Alchevsk, Ukraine,
e-mail: fesenkoed@gmail.com

ANALYSIS OF LIMIT STATES OF MINING FRAME SUPPORT

Цель. Изучить закономерности изменения несущей способности крепи в зависимости от параметров внешнего нагружения, контактных условий её взаимодействия с массивом и жесткости забутовки.

Методика. В основу положено численное моделирование взаимодействия крепи с массивом горных пород при возникновении предельных состояний конструкции. Основная идея состоит в обеспечении принципа равнопрочности элементов крепи при её взаимодействии с массивом.

Результаты. Разработаны расчетная схема и методика оценки несущей способности стальной рамной крепи с учетом контактных условий ее взаимодействия с массивом горных пород и характера приложения внешней нагрузки. Сформулирован принцип равнопрочности элементов крепи, на основе которого предложены оптимальные подходы к их проектированию. Рассмотрены и проанализированы предельные состояния, возникающие в процессе нагружения податливой крепи. Исследовано влияние свойств забутовочного материала на работоспособность крепи, установлены рациональные условия работы и параметры рамной податливой крепи.

Научная новизна. На основе сформулированного принципа равнопрочности и предложенных критериев оптимальности разработан метод определения несущей способности стальной рамной крепи, который учитывает предельные состояния, возникающие в элементах крепи, с учетом условий формирования нагрузок на крепь со стороны массива пород.

Практическая значимость. Разработанная методика расчета несущей способности рамной крепи, основанная на принципе равнопрочности ее элементов, позволяет проектировать крепи горных выработок с рациональными параметрами и обеспечить существенную экономию металлопроката.

Ключевые слова: *рамная крепь, численное моделирование, предельные состояния, принцип равнопрочности, критерии оптимальности*

Постановка проблемы и анализ публикаций. В большинстве горных выработок шахт (до 90%) применяется рамная стальная крепь из спецпрофиля. Как показывает практика эксплуатации и многочисленные шахтные замеры [1], эксплуатационное состояние выработок не соответствует предписаниям правил безопасности (до 40–50 %). Это является следствием проектных ошибок 1 рода, связанных с недооценкой проявлений горного давления или переоценкой работоспособности принятой конструкции крепи.

В то же время нередки случаи (30–40 %), особенно в Восточном Донбассе, когда рамная крепь выработок почти не испытывает нагрузки со стороны массива и закрепное пространство содержит обширные пустоты. Это характерно для проектных ошибок 2 рода, которые вызваны использованием крепи с излишним запасом прочности. Особенностью этих ошибок является создание видимости благополучия, когда специалисты на основании визуальной оценки крепи убеждены в якобы правильности принятых инженерных решений. И лишь в незначительном

числе выработок (около 10–20 %) параметры крепи можно считать соответствующими горно-геологическим условиям [1].

Последствия проектных ошибок 1 и 2 рода различны: если первые приводят к разрушению крепей и производственному травматизму, то вторые – причина перерасхода крепежных материалов, трудовых ресурсов и завышения стоимости выработки. По мере увеличения глубины разработки и усложнения горно-геологических условий удельный вес наиболее опасных ошибок 1 рода возрастает за счет уменьшения числа проектных ошибок 2 рода. И в том и в другом случае неизбежны существенные материальные потери, вызванные не только прямыми убытками, но и излишними затратами трудовых и материальных ресурсов. Устранить эти ошибки можно путём повышения надёжности проектных решений на базе углублённых исследований проявлений горного давления и несущей способности крепи.

Особую актуальность сохраняет проблема надёжного и научно обоснованного определения несущей способности рамных конструкций крепи, особенно для выработок глубоких шахт.

Нерешенная часть проблемы. Существующие методы расчёта и обоснования параметров крепи [2, 3] отстали от современного уровня развития горной науки. Действующие нормативные материалы [2, 3] не предусматривают определения внутренних силовых факторов в крепи (продольных, поперечных сил, изгибающих моментов), а сразу, без достаточного обоснования и анализа, априори задают её паспортную несущую способность, считая её постоянной величиной. На самом деле несущая способность крепи является весьма изменчивой и зависит от условий её взаимодействия с массивом горных пород, не говоря уже о необходимости учета технологии, времени возведения и особенностей эксплуатации крепи. Поэтому важной проблемой проектирования выработок является отсутствие надежных методов расчета и оптимизации конструкций крепи с учетом возможных ее предельных состояний.

Цель исследований – изучить закономерности изменения несущей способности крепи в зависимости от параметров внешнего нагружения, контактных условий её взаимодействия с массивом и жесткости забутовки. **Объектом** исследований является стальная арочная крепь, а **предмет** исследований – изменение предельных состояний крепи в зависимости от условий её нагружения. **Задачи исследований** – установить режимы работы, опасные сечения и предельные состояния рамной крепи, дать научные обоснования по выбору параметров крепи. **Основная идея** исследований состоит в обеспечении принципа равнопрочности элементов крепи. Для рамной крепи этот принцип сводится к требованию равного запаса прочности по изгибающим моментам в опасных сечениях и по продольным силам в узлах податливости. В основу исследований положен метод численного моделирования работы крепи при её взаимодействии с массивом.

Основная часть. При расчёте конструкций крепи весьма эффективным считается метод конечных элементов (МКЭ).

К числу наиболее удобных программных продуктов для расчёта конструкций методом МКЭ следует отнести, среди прочих, расчетный комплекс ЛИРА (ПК ЛИРА). Нами успешно использован комплекс „Ли́ра“ для расчета и проектирования крепей горных выработок [4].

Особенностью взаимодействия крепи с массивом является возникновение на различных ее участках предельных состояний, после которых наблюдается разрушение или неупругое деформирование элементов. При этом следует различать несколько типов предельных состояний:

1. Изгибающий момент в опасном сечении какого-либо элемента крепи достигает предельного значения $M = [M]$, при этом продольные усилия в узлах податливости недостаточны для их проскальзывания $N \leq N_k$.

2. Переход крепи в податливую стадию работы, когда $N = N_k$, но изгибающие моменты в опасных сечениях меньше допустимых $M \leq [M]$.

3. Разрушение крепи от изгибающих моментов и продольных сил после исчерпания ее конструктивной податливости.

В данной работе исследованы первые два типа предельных состояний арочной рамной крепи. Для решения поставленных задач рассмотрим различные схемы взаимодействия крепи с массивом. Особое внимание следует уделить учёту особенностей формирования нагрузки на крепь. Для этого в каждой расчётной схеме крепи (ширина арки $2a = 3...5,5$ м, высота арки $2b = 2,5...3,75$ м, радиус дуги верхняка $r = 1,5...2,75$ м) задавали внешние нагрузки с разными законами распределения и контактными условиями на границе с массивом: разной плотности забутовка закрепного пространства, тампонаж и пр.

Расчетная схема крепи (рис. 1) – двухшарнирная циркулярная арка. На почве выработки она снабжена неподвижными шарнирами в нижних узлах 1 и 2 стоек.

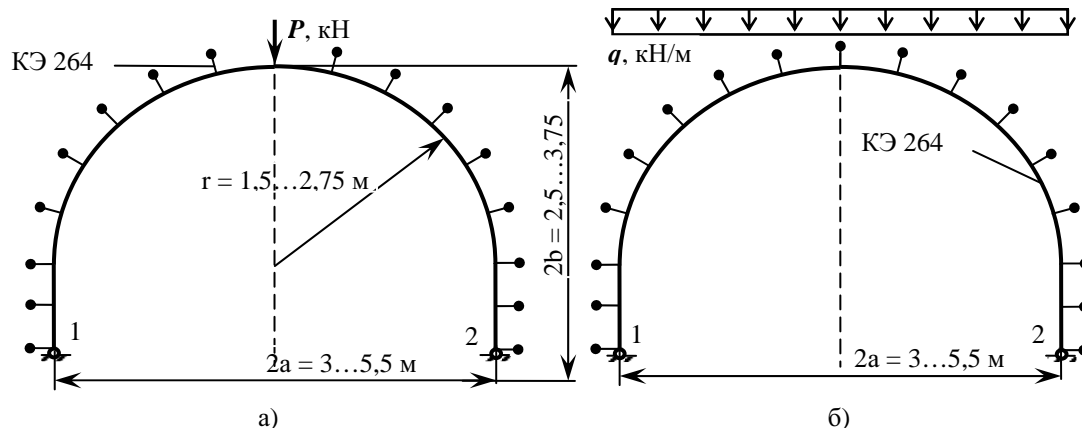


Рис. 1. Расчетные схемы арочной крепи при нагружении: а) вертикальной сосредоточенной силой P ; б) вертикальной распределенной нагрузкой q

Особенностью взаимодействия подземных конструкций с окружающим массивом является возникновение пассивного отпора пород, что редко реализуют в существующих методах расчёта, поскольку они становятся более сложными и трудоемкими.

Для учета пассивного отпора пород использованы имеющиеся в расчётном комплексе ЛИРА нелинейные конечные элементы (КЭ 264), которые обеспечивают одностороннюю упругую связь заданной жёсткости R [4].

При этом важно правильно определить жёсткость контактного взаимодействия крепи и массива в соответствии со свойствами забутовки закрепного пространства (забутовка из породы, тампонаж, жёсткий контакт с массивом и др.). Для охвата всего диапазона изменения условий контактов крепи с массивом их жёсткость рассчитывали в зависимости от коэффициента постели среды c . По данным экспериментальных исследований он находится в пределах: при тампонаже $c \approx 300 \dots 800$ МПа/м (принято 500); при плотной забутовке породой $c \approx 100 \dots 200$ МПа/м; при рыхлой забутовке – $c \approx 25$ МПа/м.

Жёсткость R нелинейных конечных элементов КЭ 264, установленных по контуру модели крепи (рис. 1), определяли, используя выражение $R = c \cdot A$, где A – площадь контакта, приходящаяся на один элемент. Таким образом, при моделировании жесткости материала в закрепном пространстве R изменялась в пределах $R = 0 \dots 133$ МН/м.

Тангенциальные (вдоль контура крепи) перемещения пород и крепи учтены с помощью такого же двухузлового элемента КЭ 264. Возникающая сила трения задана как параметр элемента КЭ 264. Значение коэффициента трения между породой и крепью принято, в среднем, равным $f = 0,3$. При этом крепь обычно не сразу вступает во взаимодействие с массивом, особенно при неплотной и некачественно выполненной забутовке из-за наличия зазоров и пустот в закрепном пространстве. Зазор моделировали с помощью соответствующего свойства элемента КЭ 264 – „зазор“. При расчётах величину зазора между крепью и массивом варьировали в пределах от 0 (тампонаж) до 50 мм и более (нет забутовки).

Работу податливой конструкции крепи рассмотрим в двух стадиях: 1) до срабатывания узлов податливости; 2) после их срабатывания. В первом случае крепь работает как упругая конструкция в режиме заданных нагрузок („мягкое“ нагружение). Во второй стадии происходит срабатывание и проскальзывание элементов крепи в узлах податливости, а крепь работает в режиме заданных деформаций („жёсткое“ нагружение).

Модель арочной крепи нагружали двумя видами нагрузок:

- вертикальной сосредоточенной силой, приложенной к вершине арки (рис. 1, а), для воспроизведения предельно неблагоприятного нагружения;
- вертикальной распределённой нагрузкой (рис. 1, б), которая является типичной для большинства расчетных схем.

Как известно, потеря устойчивости или разрушение крепи происходит в случае, когда напряжения в наиболее опасном сечении крепи от изгибающего момента M и нормальной силы N превысят предел прочности стали.

Разрушение крепи от сдвигающих напряжений, вызванных поперечными силами Q , можно не учитывать ввиду их малости.

Значения допустимых изгибающих моментов $[M]$ при чистом изгибе и продольных сил $[N]$ при центральной сжатии для всего диапазона типоразмеров профи-

лей СВП – специальный взаимозаменяемый профиль (от № 14 до № 33) определяем по формулам [5]

$$[M] = W \cdot R_y \cdot \gamma_{c1}; \quad (1)$$

$$[N] = \varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_{c2}, \quad (2)$$

где W – момент сопротивления сечения, см³; R_y – расчётное сопротивление стали, МПа ($R_y = 240$ МПа); φ – коэффициент продольного изгиба, принятый в соответствии со СНиП II-23-81 [6]; A – площадь поперечного сечения профиля, см²; γ_{c1} , γ_{c2} – соответственно, коэффициент условий работы для изгибаемых и центрально сжатых элементов ($\gamma_{c1} = 0,8$; $\gamma_{c2} = 1,1$).

Результаты расчетов крепи из разных спецпрофилей СВП представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчет допустимых изгибающих моментов $[M]$ при чистом изгибе и продольных сил $[N]$ при центральном сжатии

Типоразмер СВП	W , см ³	φ	A , см ²	$[M]$, кН·м	$[N]$, кН
14	40,7	0,48	18,7	7,8	235
17	50,3	0,51	21,73	9,7	290
19	61,3	0,58	24,44	11,8	375
22	74,8	0,61	27,91	14,4	450
27	100,2	0,685	34,37	19,2	620
33	133,5	0,75	42,53	25,6	840

Для элементов крепи следует учесть совместное действие в сечении изгибающих моментов и продольных сжимающих сил. При этом суммарные напряжения от нормальной силы N и от изгибающего момента M в опасном сечении крепи не должны превосходить расчетного сопротивления R (предела текучести стали) [5]

$$\sigma = \frac{M}{W \cdot \gamma_{c1}} + \frac{N}{\varphi \cdot A \cdot \gamma_{c2}} \leq R. \quad (3)$$

Зная соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N в опасном сечении, можно найти допустимый изгибающий момент $[M]$ для рассматриваемой схемы нагружения и любого типа спецпрофиля СВП, воспользовавшись выражением (3). Предельную продольную силу $[N]$ в податливых крепях определять, как правило, не следует, т.к. она ограничена величиной сопротивления узлов податливости N_k . Формула для определения допустимого момента $[M]$ после алгебраических преобразований будет иметь вид

$$[M] = \frac{R \cdot W \cdot A \cdot \varphi \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{A \cdot \varphi \cdot \gamma_{c2} + k \cdot W \cdot \gamma_{c1}}, \quad (4)$$

где k – соотношение между действующими N и M в опасном сечении при определённой схеме нагружения, т. е.

$$k = \frac{N}{M} = const. \quad (5)$$

Таким образом, значение допустимого момента $[M]$ в опасном сечении для разных схем загрузки крепи и типоразмеров спецпрофилей будет различным.

В результате расчетов по первой схеме (рис. 1, а) получены эпюры распределения внутренних силовых факторов, значения изгибающих моментов M , продольных N и поперечных Q сил, определены опасные сечения.

Проанализируем распределение внутренних силовых факторов в крепи от действия вертикальной сосредоточенной силы P . Наиболее опасное сечение – в точке приложения силы P , где действует наибольший изгибающий момент. Поскольку место приложения нагрузки в расчетной схеме не меняется, а зависимость между внутренними силовыми факторами и внешней нагрузкой линейная, опасное сечение по предельному моменту всегда находится в центре арки. При постепенном возрастании нагрузки на первом этапе (до исчерпания конструктивной податливости) возможен переход крепи в одну из двух предельных стадий работы – тип 1 ($M = [M]$, когда крепь разрушает изгибающий момент) или тип 2 ($N = N_K$, когда срабатывают узлы податливости и крепь переходит в податливую стадию работы).

Методика определения предельной несущей способности крепи от изгибающих моментов или продольной силы в узле податливости состоит в следующем. Рассчитав в программе ЛИРА в опасном сечении момент от единичной силы M_{1max} , можно найти допустимый момент $[M]$ для любого спецпрофиля (4). После этого, используя линейную зависимость между приложенной нагрузкой и возникающим в опасном сечении моментом M , определяем допустимую (максимальную) сосредоточенную нагрузку P , которую способны нести разные спецпрофили. Интуитивно понятно, что наиболее выгодным случаем работы крепи будет одновременное исчерпание ее несущей способности по обоим факторам, т.е. по допустимым моментам и продольным силам в узлах податливости.

Исходя из этого, можно сформулировать **условие оптимального проектирования** рамной податливой крепи. Оно основано на анализе возможных предельных состояний двух типов: предельная нагрузка на крепь P лимитируется либо сопротивлением N_K узлов податливости, либо несущей способностью элемента крепи на изгиб $[M]$, что следует использовать для достижения равнопрочности конструкции.

Принцип равнопрочности податливой крепи состоит в том, чтобы обеспечить такое сопротивление узлов податливости $[N_0]$ крепи, которое соответствует нагрузке, вызывающей предельный изгибающий момент $[M]$ в наиболее опасном её сечении. Этот принцип позволяет сформулировать критерии оптимальности рамной податливой крепи

$$K_{o1} = \frac{P_M}{P_N} \rightarrow 1 \text{ при } K_{o2} = \frac{P_K}{m_K} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где P_M – несущая способность крепи по допустимому моменту в самом опасном сечении; P_N – несущая спо-

собность крепи по предельному сопротивлению узлов податливости; P_K – несущая способность податливой крепи (минимальное значение из P_M и P_N); m_K – масса одной крепежной рамы.

На рис. 2 представлены результаты расчета несущей способности P рамной арочной крепи шириной 5 м, нагруженной вертикальной сосредоточенной силой (см. расчетную схему на рис. 1, а) при различной степени жёсткости забутовки, причем линии на графике соответствуют: 1 – крепь без забутовки; 2 – с расклинкой в узлах податливости; 3 – коэффициент расклиновки $c = 25$ МПа/м; 4 – $c = 100$ МПа/м; 5 – $c = 200$ МПа/м; 6 – тампонаж ($c = 500$ МПа/м).

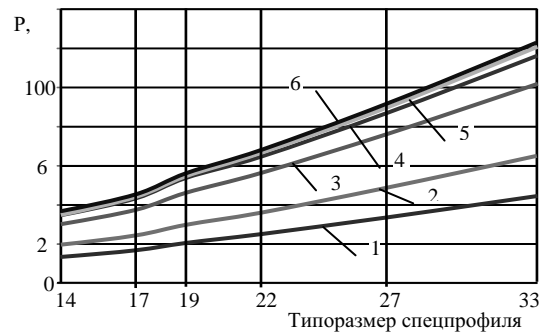


Рис. 2. Зависимость несущей способности крепи P от типоразмера спецпрофиля СВП при действии сосредоточенной силы

Как следует из графиков на рис. 2, предельная нагрузка P на крепь без забутовки закрепного пространства (линия 1), после которой она разрушается, оказалась ниже нормативного значения, рекомендуемого в нормах проектирования [2], в 7–10 раз. Установка расклинки крепи в зоне узлов податливости увеличивает ее несущую способность примерно на 45% – линия 2, но, тем не менее, она остается ниже паспортных значений в несколько раз.

Забутвка закрепного пространства обеспечивает пассивный отпор пород и тем самым заметно повышает несущую способность крепи. Даже наличие неплотной забутовки ($c = 25$ МПа/м, линия 3) увеличивает несущую способность крепи в 2,3 раза. Тем не менее, этого недостаточно, т. к. допустимая нагрузка P остаётся меньше нормативной [2] в 3...4 раза. Дальнейшее увеличение жёсткости забутовки до 100...200 МПа/м существенно не увеличивает несущую способность крепи (линии 4, 5). Даже выполнение тампонажа, когда жёсткость доходит до $c = 500$ МПа/м и более, по сравнению с рыхлой забутовкой, повышает P всего в 1,2 раза (линии 3 и 6).

Таким образом, увеличение жёсткости забутовки выше 100 МПа/м или выполнение тампонажа при такой схеме загрузки крепи малоэффективно и поэтому нецелесообразно.

Значения оптимального сопротивления узлов податливости $[N_0]$ (рис. 3, 5) сопоставлены с конструктивным сопротивлением серийного узла податливости $N_K = 120$ кН. На этих рисунках линия 7 показывает

сопротивление серийного узла податливости N_K , остальные линии (1 – 6) – те же.

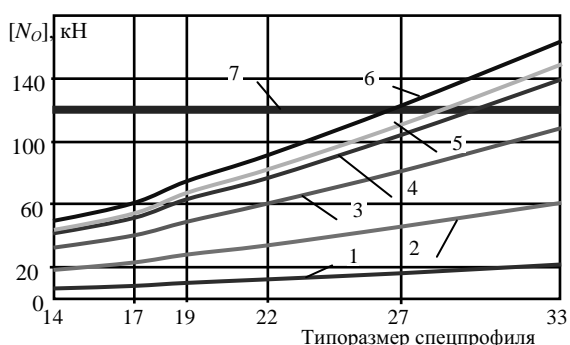


Рис.3. Требуемое сопротивление узлов податливости $[N_0]$ при условии равнопрочности элементов крепи

При загрузке сосредоточенной силой (рис. 3) требуемое сопротивление узлов податливости $[N_0]$ почти всегда ниже N_K . Это доказывает, что при сосредоточенных нагрузках разрушение крепи происходит от изгибающих моментов, т. е. крепь работает как жёсткая конструкция и разрушается, не успевая входить во вторую (податливую) стадию работы. При установке крепи из СВП 33, использование для забутовки материала с жесткостью $c > 25$ МПа/м приводит к тому, что узел податливости сработает раньше, чем изгибающий момент в опасном сечении превысит допустимое значение $[M]$. Значит, недогруженная по моменту крепь перейдет в податливую стадию работы, не исчерпав возможности сопротивления профиля изгибающим моментам.

Таким образом, нагружение крепи сосредоточенной силой (рис. 1, а), которое часто наблюдается на практике при отсутствии забутовки, больших зазорах, плохом оконтуривании и других нарушениях технологии, вызывает значительные изгибающие моменты и крепь разрушается при нагрузках, существенно меньших паспортных значений, т. е. в нормах проектирования заложена наиболее опасная проектная ошибка 1 рода, приводящая к обрушению пород в выработку при таком нагружении. В этих условиях податливые узлы заблокированы, и крепь работает только в неэффективном жестком режиме.

Следует обратить внимание на то, что усилия в узлах податливости крепи $[N_0]$, вплоть до ее разрушения от изгибающих моментов, остаются значительно меньше усилий срабатывания узлов N_K . Поэтому для использования податливого режима работы крепи придется снизить сопротивление узлов податливости в 3...15 раз, т. е. заведомо пойти либо на потерю сечения выработки от смещений пород, либо смириться с быстрым разрушением крепи и завалом выработки.

Что же происходит при нагружении крепи равномерной распределенной нагрузкой, т. е. в идеальном случае, предусмотренном техническими условиями (ТУ) установками крепи (рис. 1, б)? Расчеты показали, что опасные сечения по изгибающему моменту появляются не только в верхняке, но и в стойках крепи, которые будут разрушаться изгибом или из-за потери устойчивости.

На рис. 4 представлены зависимости несущей способности P крепи шириной 5 м, нагруженной вертикальной распределенной нагрузкой (рис. 1, б), а на рис. 5 – результаты расчета оптимальных усилий $[N_0]$ в узлах податливости. Обозначения линий на графиках остались прежними.

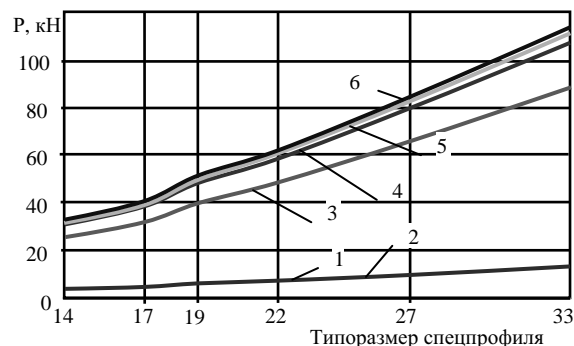


Рис.4. Несущая способность крепи P при вертикальной распределенной нагрузке

Как и в расчетной схеме рис. 1, а, разрушение крепи без забутовки (линия 1) происходит от изгибающих моментов до наступления податливого режима. Несущая способность крепи P меньше нормативных значений [2] в 3-5 раз. Отсюда следует, что без забутовки применять крепь нецелесообразно. Ее несущая способность весьма низка – всего 40,5...133,4 кН, а усилия в узлах податливости составляют 10...32% от допустимых N_K (рис. 5). Это доказывает, что крепь работает в жестком (не паспортном) режиме и будет неминуемо разрушена изгибающими моментами в стойках.

Вопреки рекомендациям действующих ТУ, оказалось, что наличие расклинки крепи не влияет на ее несущую способность: линия 1 (без забутовки) и линия 2 (крепь без забутовки, но с расклинкой) совпадают (рис. 4). Расклинка, тем не менее, полезна для устранения выбивания крепи взрывом при проведении горной выработки.

Из рис. 4 следует, что даже рыхлая забутовка с жесткостью $c = 25$ МПа/м повышает несущую способность крепи в 6-7 раз (линии 1 и 3), когда крепь имеет узлы податливости с оптимальным сопротивлением $[N_0]$ (рис. 5).

Исследования показали, что увеличение жесткости забутовки (выше $c = 100$ МПа/м) не приводит к заметному росту несущей способности крепи. Так выполнение тампонажа закрепного пространства ($c = 500$ МПа/м), по сравнению с забутовкой жесткостью $c = 100$ МПа/м, даёт повышение несущей способности крепи всего на 6...7% (линии 6 и 4, рис. 2 и 4). Это по-новому ставит вопрос о целесообразности выполнения жесткого тампонажа закрепного пространства для рамных арочных крепей. Повысить несущую способность крепи в несколько раз можно, обеспечив заполнение закрепного пространства забутовкой с жесткостью $c = 25...100$ МПа/м, например, путём взрывной разгрузки пород кровли (ВРПК) [7].

Важно подчеркнуть, что все крепи с забутовкой (тампонажем) закрепного пространства при верти-

кальной распределенной нагрузке для обеспечения принципа равнопрочности должны иметь сопротивление узлов податливости намного (в 2–7 раз) выше серийных (рис. 5). По сути, это равнозначно повышению работоспособности крепи в такой же пропорции.



Рис.5. Требуемое сопротивление узлов податливости $[N_0]$ при вертикальной распределённой нагрузке

Таким образом, серийная крепь независимо от типоразмера СВП будет иметь заниженную несущую способность P , поскольку всегда будет происходить проскальзывание серийных узлов податливости до исчерпания несущей способности элемента крепи (в верхняке или стойке) из-за несоблюдения принципа равнопрочности, что видно из таблицы 2.

Таблица 2

Несущая способность крепи при вертикальной распределенной нагрузке с забутовкой закрепного пространства ($c = 25$ МПа/м)

Тип СВП	$[M]$, кН·м	Максимальный изгибающий момент, M , кН·м		Максимальная нагрузка на крепь (несущая способность), P , кН		Оптимальное усилие в узле податливости при $M=[M]$ $[N_0]$, кН	$[N_0]$ в % к N_k	Действующее усилие в узле податливости, N , кН	$\frac{P_M}{P_N}$
		Действующий M	M в % к $[M]$	по N_k в узлах податливости (P_N)	по $[M]$ (P_M)				
14	4,39	3,87	88	230	315	136	113	120	1,37
17	5,43	3,87	71	230	385	168	140	120	1,67
19	6,76	3,87	57	230	485	210	175	120	2,11
22	8,19	3,87	47	230	585	254	212	120	2,54
27	11,12	3,87	35	230	795	345	288	120	3,46
33	14,92	3,87	26	230	890	463	386	120	3,86

Из таблицы 2 следует, что для всех типоразмеров СВП несущая способность крепи примерно постоянна и равна 230 кН, т. к. лимитируется сопротивлением узлов податливости, т. е. крепь переходит в податливую стадию работы до начала изгиба. При этом изгибающие моменты в опасных сечениях крепи M занижены и находятся в пределах от 26% (СВП 33) до 88%

(СВП 14) по отношению к допустимому $[M]$. Несущая способность крепи оказывается заниженной в 2–4 раза, что равносильно перерасходу металлопроката в таком же соотношении, причём, чем больше типоразмер профиля, тем менее эффективна крепь.

Более того, исследования показали, что применение спецпрофилей мощнее СВП-14 при серийных узлах податливости и выполнении забутовки нецелесообразно. Так, согласно принципу оптимальности, сопротивление узла податливости для спецпрофиля СВП 33 должно составлять $[N] = 463$ кН, что увеличит несущую способность рамы с 230 кН до 890 кН, т. е. в 3,86 раза. Однако ни один тип существующих узлов податливости не способен обеспечить такое сопротивление. Поэтому теряет смысл направлять усилия специалистов на разработку всё новых узлов податливости с примерно одинаковыми усилиями сопротивления.

Это ставит задачу создания податливых крепей нового типа, работающих в податливо-жестком режиме, соответствующем конкретным горно-геологическим условиям и особенностям формирования внешней нагрузки на крепь. Самым перспективным направлением обеспечения принципа равнопрочности крепи и оптимальности её взаимодействия с массивом окружающих пород можно считать искусственное формирование внешней нагрузки на крепь активными способами воздействия на массив горных пород [7].

Следовательно, повышать несущую способность крепи при распределённой нагрузке надо не путем увеличения типоразмера спецпрофиля (до СВП 27, 33 или больше), а либо применяя узлы податливости с сопротивлением в 2...4 раза больше, либо обеспечивая податливо-жесткий режим работы рамы (например, установкой ограничителей податливости - „сухарей“).

Выводы:

1. Существующие нормативные методики проектирования и выбора параметров стальной рамной крепи не учитывают особенности взаимодействия крепи с массивом (распределение нагрузки, жесткость забутовки и др.), что ведёт к грубым ошибкам проектирования 1 и 2 рода, а потому – малодостоверны и должны быть пересмотрены.

2. Научно обоснованными численными методами расчёта и выбора параметров крепи доказано, что некачественное оконтуривание выработки, большие пустоты закрепного пространства, отсутствие забутовки и другие нарушения технологии приводят к разрушению верхняка и стоек до начала податливости, снижению несущей способности крепи в 3–10 раз по сравнению с рекомендациями в нормах.

3. Существующие конструкции узлов податливости не отвечают принципу равнопрочности крепи, при сосредоточенной силе на крепь их сопротивление избыточно (в 6–10 раз), а при распределённой нагрузке и забутовке – должно быть увеличено в 2–4 раза.

4. Применение забутовки закрепного пространства с обеспечением оптимального сопротивления узлов податливости крепи $[N_0]$ способно резко увеличить (в 5–10 раз) несущую способность крепи, что позволит отказаться во многих случаях от примене-

ния „тяжёлых“ спецпрофилей СВП (22, 27, 33) и перейти к использованию „лёгких“ спецпрофилей (СВП 14, 17, 19). Это с избытком окупит усложнение технологии работ по креплению и даст существенную (в 2–3 раза) экономию металлопроката.

5. Стремление увеличить жёсткость забутовки (более $c = 100$ МПа/м) не приводит к заметному увеличению несущей способности крепи. Поэтому нецелесообразно выполнять жёсткий тампонаж закрепного пространства вокруг рамных арочных крепей, а достаточно создать „рыхлую“ забутовку с жёсткостью $c = 25 \dots 100$ МПа/м, чтобы повысить несущую способность крепи в 6...7 раз.

6. При оптимальном проектировании рамной крепи, что требует использования компьютерных моделей, необходимо руководствоваться принципом равнопрочности (6), согласно которому конструкция крепи должна иметь одинаковый запас прочности по изгибающим моментам в опасных сечениях и продольным силам в узлах податливости.

Список литературы / References

1. Литвинский Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. – К.: Техника, 1999. – 216 с.

Litvinskiy, G.G., Gayko, G.I. and Kuldyrkaev, N.I. (1999), *Stalnye ramnye krepri gornykh vyrobotok* [Steel Frame Support of Mine Tunnels], Tekhnika, Kiev, Ukraine.

2. СОУ 10.1.00185790.011:2007 / Мін-во вугільної промисловості України; ДонВУГІ, УкрНДІпроєкт. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 116 с.

SOU 10.1.00185790.011:2007 (2007), Ministry of Coal Industry of Ukraine, DonVUGI, UkrNDIproekt Kiev, Ukraine.

3. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. – СПб: ВНИМИ, 1991. – 125 с.

Instrukcija po vuboru ramnykh podatlivykh krepey gornykh vyrobotok (1991), [Instruction on Selection of Yielding Mine Frame Support], VNIMI, St. Petersburg, Russia.

4. Литвинский Г.Г. Расчет крепи горных выработок на ЭВМ / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко, Е.В. Емец. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – 174 с.

Litvinskiy, G.G., Fesenko, E.V. and Yemets, Ye.V. (2011), *Raschet krepri gornykh vyrobotok na EVM* [Computer Calculation Of Mine Working Support], DSTU, Alchevsk, Ukraine.

5. Маилян Р.Л. Строительные конструкции; Изд. 2-е. / Р.Л. Маилян, Д.Р. Маилян, Ю.А. Веселев. – Ростов на Дону: Феникс, 2005. – 880 с.

Mailyan, R.L., Mailyan, D.R. and Veselev, Yu.A. (2005), *Stroitelnye konstruksii* [Building Structures], Feniks, Rostov-on-Don, Russia.

6. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М., 2011. – 172 с.

SP 16.13330.2011 *Stalnye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23-81** (2011), [Steel Structures. Actualized Edition of SNIp II-23-81*], Moscow, Russia.

7. Литвинский Г.Г. Способ обеспечения устойчивости горной выработки взрывной разгрузкой пород кровли / Г.Г. Литвинский, Е.Е. Павлов // Матеріали міжнародної

конференції „Форум гірників – 2010“. – Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, 2010. – С. 168–177.

Litvinskiy, G.G. and Pavlov, Ye.Ye. (2010), *Sposob obespecheniya ustoychivosti gornoy vyrabotki vzyrnoy razgruzkoy porod krovli* [Ensuring the Stability of Mine Working by Explosive Discharge of Roof Rock], *Proc. of the International Conf. "Forum of Mining Engineers – 2010"*, National Mining University, Dnepropetrovsk, pp. 168–177.

Мета. Вивчити закономірності зміни несучої спроможності кріплення в залежності від параметрів зовнішнього навантаження, контактних умов його взаємодії з масивом і жорсткості забутовки.

Методика. В основу покладено чисельне моделювання взаємодії кріплення з масивом гірських порід при виникненні граничних станів конструкції. Основна ідея полягає в забезпеченні принципу рівномірності елементів кріплення при їх взаємодії з масивом.

Результати. Розроблено розрахункову схему та методику оцінки несучої спроможності сталевих рамного кріплення з урахуванням контактних умов його взаємодії з масивом гірських порід і характеру прикладення зовнішнього навантаження. Сформульовано принцип рівномірності елементів кріплення, на основі якого запропоновано оптимальні підходи до їх проектування. Розглянуто й проаналізовано граничні стани, що виникають у процесі навантаження податливого кріплення. Досліджено вплив властивостей забутовочного матеріалу на працездатність кріплення, встановлено раціональні умови роботи та параметри рамного податливого кріплення.

Наукова новизна. На основі сформульованого принципу рівномірності та запропонованих критеріїв оптимальності розроблено метод визначення несучої здатності сталевих рамного кріплення, що враховує граничні стани, які виникають в елементах кріплення, у залежності від умов формування навантажень на кріплення з боку масиву порід.

Практична значимість. Розроблено методику розрахунку несучої здатності рамного кріплення, що ґрунтується на принципі рівномірності його елементів, дозволяє проектувати кріплення гірничих виробок із раціональними параметрами та забезпечити суттєву економію металлопрокату.

Ключові слова: рамне кріплення, чисельне моделювання, граничні стани, принцип рівномірності, критерії оптимальності

Purpose. To study the laws of mine support bearing capacity change depending on the external loading parameters, the contact conditions of its interaction with the rock massif and the backfill stiffness.

Methodology. The research was based on the numerical simulation of the interaction of the mine support with the rock massif when the marginal state appears. The main idea is to ensure the principle of equal strength of the elements when they are interacting with the rock massif.

Findings. The analytical model and the method of evaluation of bearing capacity of steel frame support tak-

ing into account the contact conditions of its interaction with the rock massif and nature of external forces has been developed. The principle of equal strength support elements has been formulated and optimal criteria of their design have been proposed on its base. The marginal states appearing in the process of loading of the yielding support have been considered and analyzed. The influences of the backfill material properties on the bearing capacity of the support and the rational conditions and parameters of frame yielding support have been determined.

Originality. The method for determination of the steel frame support carrying capacity has been developed on the principles of equal strength and the optimal criteria. It takes into account the marginal states appearing in the

support elements depending on the external loading by the rock massif.

Practical value. The method of calculation of the mine frame support bearing capacity has been developed. The method is based on the equal strength principle of support elements. This allows us to design the mine working with rational parameters of support and to reduce consumption of metal.

Keywords: *mining frame support, numerical simulation, marginal state, principle of equal strength, criteria of optimality*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Г.І. Гайком. Дата надходження рукопису 28.12.12.*

УДК [622.831.322:551.24].001.6

П.Е. Филимонов, канд. тех. наук

Публичное акционерное общество „Шахта им. А.Ф. Засядько“, г. Донецк, Украина, e-mail: igtmnanu@yandex.ru

ИСПЫТАНИЯ СПОСОБА КОНТРОЛЯ БУРЕНИЯ И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРЕЖАЮЩИХ СКВАЖИН ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

P.Ye. Filimonov, Cand. Sci. (Tech.)

Public Joint Stock Company “Shakhta im. A.F. Zasyadko”, Donetsk, Ukraine, e-mail: igtmnanu@yandex.ru

TESTING OF THE METHOD OF MONITORING AND EVALUATION OF THE ADVANCE BORES DRILLING EFFECTIVENESS BY ACOUSTIC SIGNAL PARAMETERS

Цель. Проведение испытаний и подтверждение эффективности способа контроля бурения и оценки эффективности опережающих скважин по параметрам акустического сигнала для снижения выбороопасности угольного пласта.

Методика. Применены методы контроля бурения, сравнительного анализа, системно-комплексный подход. Методика предусматривает бурение опережающих скважин, регистрацию акустического сигнала, формирующегося при бурении скважин в угольном пласте, и его обработку на персональном компьютере.

Результаты. Разработана программа, методика и проект руководства по применению способа контроля бурения и оценки эффективности опережающих скважин по параметрам акустического сигнала в условиях АП „Шахта им. А.Ф. Засядько“.

Разработанный способ обеспечил безопасное бурение и оценку выбороопасности массива по результатам бурения опережающих скважин. В результате испытаний установлено, что фактические параметры способа соответствуют техническим требованиям. В процессе испытаний были получены следующие показатели эксплуатации скважин: подвигание забоя составило 50–70 м в месяц, а в конвейерном ходе уклонной лавы пласта m_3 в отдельные месяцы подвигание забоя составило 100–110 м. Призабойная часть пласта существенно дегазирована, задержка деформаций и связанные с ней негативные последствия отсутствовали. Применение скважин позволило сохранить устойчивость пород непосредственной кровли выработки, более эффективно устанавливать дополнительную анкерную крепь и тем самым поддерживать выработку в удовлетворительном состоянии.

Научная новизна. Заключается в установлении закономерностей изменения величины сорбционного показателя и коэффициента пригрузки в процессе бурения опережающих скважин.

Практическая значимость. Заключается в разработке руководства по применению способа контроля бурения и оценки эффективности опережающих скважин по параметрам акустического сигнала в условиях АП „Шахта им. А.Ф. Засядько“.

Ключевые слова: *способ контроля бурения, опережающие скважины, параметры акустического сигнала, снижение выбороопасности*

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Среди проблем, стоящих перед угольной промышленностью и

влияющих на добычу угля, наиболее острой остаётся ускорение проведения подготовительных выработок, обеспечивающих необходимую и своевременную подготовку фронта очистных работ [1–3].