

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54

Н.В. Черданцев, В.Е. Ануфриев, В.Т. Преслер

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗМЕР ЗАВИСАНИЯ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ В БЛИЗИ ДЕМОНТАЖНОЙ КАМЕРЫ

Важнейшим мероприятием при отработке угольного пласта высокопроизводительной лавой является демонтаж механизированного комплекса. Время, связанное с его реализацией, напрямую определяет добычу угля шахтой. Нерационально организованные работы по демонтажу могут приводить к значительным потерям - до 900 тыс. т в мес. Как правило, демонтаж комплекса осуществляется путём ввода его под «брюс» или «сетку» [1] и занимает по времени до полутора месяцев. Значительного сокращения срока демонтажных работ можно достичь путём ввода комплекса в предварительно подготовленную демонтажную камеру. Так демонтаж комплекса в лаве длиной 236 м на шахте «Котинская» (Кузбасс), осуществлённый таким образом, занял всего 33 часа! Для реализации такого варианта демонтажа необходимо геомеханическое обоснование устойчивости предварительно пройденных демонтажных выработок во время ввода в них комплекса.

В условии полного подбучивания основной кровли мощностью $m_{o.k}$ породами непосредственной кровли мощностью $m_{n.k}$ демонтажная камера готовится как одиночная выработка. После ввода в камеру механизированного комплекса от него развивают демонтажный ходок. Ходок можно подготовить и до подхода лавы. В кровле ходка на встречу лаве бурятся скважины и в них устанавливаются инвентарные проколоты. При подработке скважин лавой проколоты соединяются перетяжкой. Такая конструкция служит разделяющим гибким перекрытием, под защитой которого производится разгрузка секций крепи и их разворот.

С позиций проявления горного давления наиболее тяжёлой является ситуация, когда отсутствует подбучивание пород основной кровли. В этом случае демонтажную камеру готовят с междукамерным целиком (рис.1), который, как правило, до погашения теряет свою несущую способность, поэтому для повышения устойчивости камеры применяют канатные анкеры. В процессе сооружения демонтажной камеры в кровле междукамерного целика также устанавливаются инвентарные проколоты, концы которых прикрепляются к породам кровли с помощью анкеров. При вводе комплекса в камеру кровлю над междукамерным целиком во время его погашения до-

полнительно перетягивают затяжками, присоединяя их к проколотам.

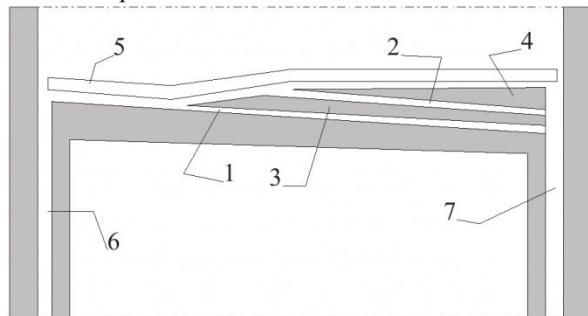


Рис. 1. Схема ввода механизированного комплекса в демонтажную камеру с междукамерным целиком. 1 - демонтажная камера № 2 (ДК 2), 2 - демонтажная камера №1 (ДК 1), 3 - междукамерный целик, 4 - лавный целик, 5 - механизированный комплекс, 6 - конвейерный штрек, 7 - вентиционный штрек

Расчётная модель углевмещающего массива при вводе комплекса в заранее подготовленную камеру представляет собой среду, внутри которой имеются две полости (рис. 2). Одна полость - очистная выработка, подкреплённая реакцией R_3 , создаваемой механизированным комплексом шириной l_k . Другая полость - демонтажная камера шириной b . Крепью камеры служит органный ряд из деревянных стоек, или литая полоса из искусственного материала. Крепь камеры создаёт реактивное усилие R_1 . Повысить устойчивость камеры при уменьшении ширины x_u междукамерного целика с несущей способностью R_2 можно с помощью двух рядов канатных анкеров глубокого заложения (рис. 2), усилия в которых равны N_1 и N_2 и составляют с горизонтом угол ξ . В модели, основанной на теории сводообразования [2 - 3], принято, что нагрузка на крепь выработки в результате её проведения создаётся породами кровли, отделяющимися от массива по криволинейному контуру, представленному сводом в виде полуэллипса. По этой теории передняя часть свода с его вершиной располагается впереди лавы. Породы свода опираются на краевую зону пласта (её ширина до демонтажной камеры равна a_1), крепь камеры, целик, а также секции механизированной

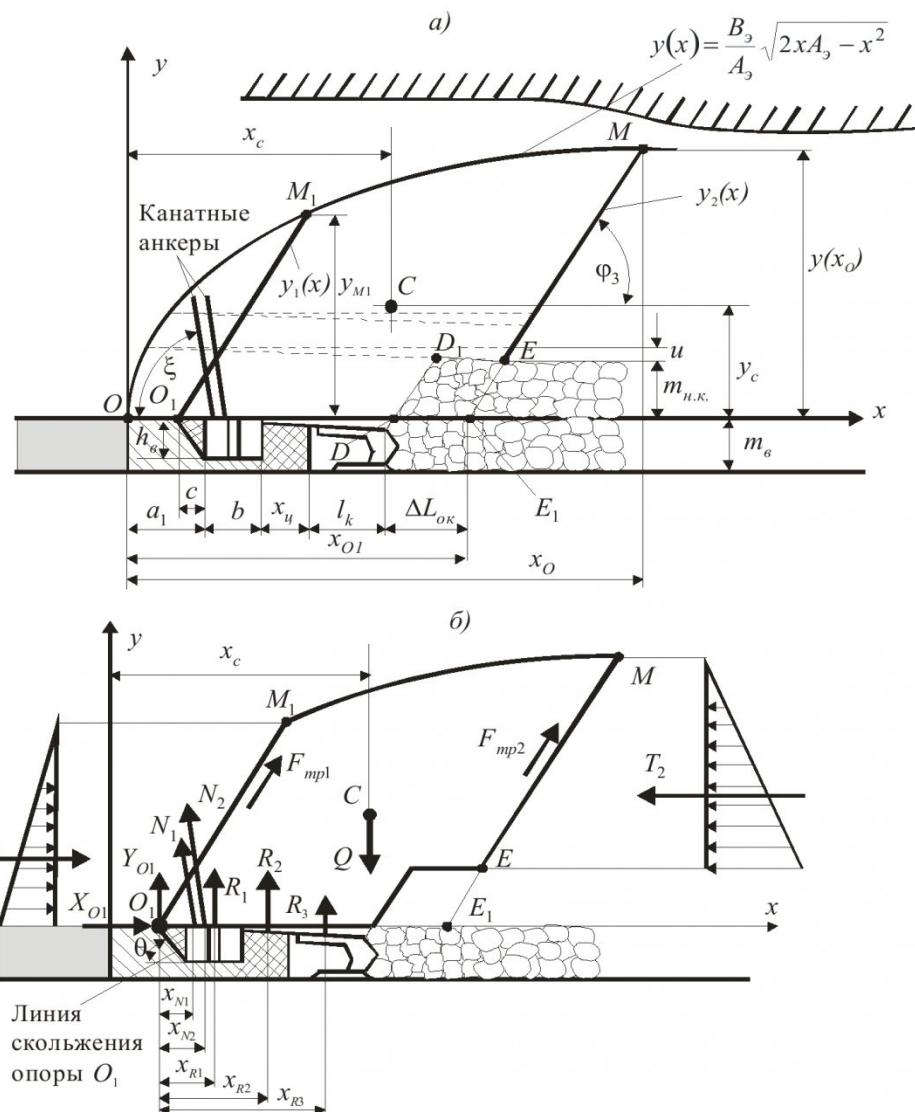


Рис. 2. Расчётная модель задачи

крепи. Задняя часть свода (за секциями крепи) через обрушенные и уплотнившиеся породы опирается на почву пласта. По мере подвигания лавы растет длина ΔL_{ok} консоли пород основной кровли. В результате этого увеличиваются её вертикальные линейные смещения (прогибы).

Как показывают многочисленные наблюдения, за счёт больших прогибов и, следовательно, больших изгибающих моментов происходит разрушение зависающей консоли основной кровли (рис. 2), что сопровождается сдвижением вышележащих пород, начиная от крайней точки O_1 призмы сползания по линии O_1M_1 , приблизительно параллельной линии разрушения EM , расположенной под углом давления φ_3 к горизонту [4]. Эти породы совместно с породами основной и непосредственной кровель, находящихся в границах свода естественного равновесия, в зависимости от горнотехнологических условий по-разному оказывают влияние на крепь и целики. В первом

случае призма сползания, не получая опоры в точке O_1 , скользит по линиям O_1M_1 и EM , полностью передавая свой вес на механизированную крепь и крепь демонтажной камеры. Во втором случае, призма сползания получает опору в точке O_1 и, поворачиваясь вокруг неё, передаёт свой вес на крепь и целик. Таким образом, в обоих случаях, необходимо определить вес пород, заключённых в эллиптическом сегменте $O_1M_1MED_1D$, а также абсциссу его центра тяжести.

Площадь сегмента, а также статический момент инерции относительно оси y , через который определяется абсцисса центра тяжести, в принятой прямоугольной системе координат определяется следующим образом [5]:

$$P = \int_0^{x_0} [y(x) - y_2(x)] dx - \int_0^{a_1-c} [y(x) - y_1(x)] dx - m_{h.k.} \cdot \Delta L_{ok}. \quad (1)$$

$$S_y = \int_0^{x_0} x \cdot [y(x) - y_2(x)] dx - \int_0^{a_1 - c} x \cdot [y(x) - y_1(x)] dx - m_{h.k.} \cdot \Delta L_{o.k.} \cdot x_{h.k.} \quad (2)$$

где $y(x)$ определяет контур свода давления, $y_1(x)$ и $y_2(x)$ - прямые линии O_1M_1 и E_1M , соответственно, $x_{h.k.}$ – абсцисса центра тяжести четырёхугольника DD_1EE_1 .

Горизонтальный размер призмы сползания краевой части угольного пласта определяется по формуле П.М. Цимбаревича [6]

$$c = h_b \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90^\circ - \rho}{2} \right),$$

где ρ - угол внутреннего трения угольного массива, а h_b – высота демонтажной камеры, размер которой принимается в интервале 2,5-2,7 м.

Расстояние от начала формирования свода давления (от его вершины до камеры) определяется по эмпирической формуле [1]

$$a_1 = k_o a \sqrt{\frac{\sigma_{nl}}{\sigma_{\max}}}, \quad (3)$$

где σ_{nl} – предел прочности угля в нетронутом массиве, k_o – коэффициент объёмного сжатия угля в пласте, обусловленный наклоном кровли и зависящим её пород, классифицированных по обрушаемости на четыре типа, согласно которым принимает значения в пределах от 0,3 до 0,9; a – ширина предельно напряжённой зоны в угольном пласте, определяемая из условия баланса нагрузки, непрерывности напряжений и равенства их на границе упругой и пластической частей пласта по формуле [1]

$$a = \frac{2(\gamma H - \sigma_0) \cos \alpha + \sqrt{4(\gamma H - \sigma_0)^2 \cos^2 \alpha + 6k_c}}{3k_*}$$

в которой величина c_o рассчитывается следующим образом:

$$c_o = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{ctg} \varphi_3 + (x_u + B + l_k + \Delta L_{o.k.}) \gamma H + \\ + \Delta L_{o.k.} \gamma m_{h.k.} - \left(\sigma_{ocm} x_u + R_1 + ql_k + \right. \\ \left. \times \cos \alpha \right) \end{array} \right]$$

где q – удельная несущая способность секции механизированной крепи, $\sigma_0 = k_c \sigma_{nl}$ – средневзвешенное сопротивление одноосному сжатию угля на обнажении пласта, α – угол падения пласта, $k_c = k_\delta k(t)$ – обобщённый коэффициент снижения прочности пласта, $k_\delta = 0,5-0,12f$ – коэффициент структурного ослабления пласта [7], f – коэффициент крепости пласта по шкале М.М. Протодьяконова, σ_{ocm} – остаточная прочность угольного целика,

$$k(t) = \eta + \chi \left(\frac{1}{1+t} \right)^n$$

- коэффициент снижения прочности пласта от длительности действия нагрузки [7], η , χ , n – эмпирические коэффициенты, отражающие свойства горных пород, t – время существования целика, мес.,

$$k_* = \frac{2k(v)\sigma_0}{h_b}$$

- коэффициент роста нагрузки в предельно напряжённой зоне, где $k(v)$ – коэффициент влияния скорости подвигания забоя изменяется в пределах от 0,4 до 1. Максимальное напряжение в угольном пласте впереди лавы, входящее в формулу (3), определяется зависимостью $\sigma_{\max} = \sigma_0 + k_* a$, в которой $\sigma_0 = k_c \cdot \sigma_{nl}$.

Интегрирование в выражениях (1) и (2) производится от нуля до значения x_O . В этом выражении размеры целика x_u и консоли $\Delta L_{o.k.}$ – приняты переменными величинами.

По данным [8] высота зоны активных сдвигений, подработанных лавой пород кровли, определяется по формуле $h_{ak} = k_{kpn} m_b$, где m_b – вынимаемая мощность пласта, $k_{kpn} = 2m_b + 4,5 \pm 1,5$ – коэффициент кратности подработки пласта, зависящий от вынимаемой его мощности. Эта высота принимается за максимальную высоту свода давления за лавой. Выше свода слои подработанной кровли деформируются без нарушения сплошности. При известной максимальной высоте свода давления $B_3 = h_{ak}$ (рис. 2) ордината контура свода эллиптической формы в произвольной точке имеет вид

$$y(x) = \frac{B_3}{A_3} \sqrt{2xA_3 - x^2}, \quad (4)$$

где $A_3 = \frac{B_3}{\delta \sqrt{\omega}}$ – большая полуось эллипса свода

давления. Параметры δ и ω рассчитываются по формулам $\delta = \lambda / k'(t)$, $\omega = \sigma_{nl}/R_c$, в которых R_c – средневзвешенное сопротивление одноосному сжатию пород кровли в своде давления, λ – коэффициент бокового давления, $k'(t)$ – коэффициент снижения прочности пород кровли, который рассчитывается по той же формуле, что и для угольного пласта.

Вес пород кровли в пределах эллиптического свода формирует нагрузки: N_1 , N_2 – натяжения в анкерах, R_1 – реакция крепи усиления, R_2 – реакция целика, R_3 – реакция секций механизированной крепи, которые определяются габаритными размерами эллиптического сегмента, в том числе, консолью пород основной кровли размером $\Delta L_{o.k.}$, расположенной за секциями механизированной крепи.

Согласно принятой расчётной схеме призма

сползания пород кровли получает опору в краевой зоне угольного пласта (точка O_1). Если опора шарнирно неподвижная, то задача об устойчивости пород над демонтажной камерой является статически определимой. Её решение получим, используя условия равновесия сегмента, расположенного в пределах эллиптического свода, в момент его разрушения по наклонным параллельным линиям. Эти условия представляются тремя уравнениями равновесия сегмента

$$\begin{aligned} \Delta X = 0 \rightarrow \\ X_{O1} + (F_{mp.1} - F_{mp.2}) \cdot \cos \varphi_3 - \\ - (T_2 - T_1) - (N_1 + N_2) \cdot \cos \xi = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y = 0 \rightarrow \\ Y_{O1} + (N_1 + N_2) \cdot \sin \xi + R_1 + R_2 + R_3 + \\ + (F_{mp.1} + F_{mp.2}) \cdot \sin \varphi_3 - Q = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{O1} = 0 \rightarrow \\ (N_1 \cdot x_{N1} + N_2 \cdot x_{N2}) \cdot \sin \xi + R_1 \cdot x_{R1} + \\ + R_2 \cdot x_{R2} + R_3 \cdot x_{R3} + T_2 \cdot \frac{1}{3} \cdot (y_M - m_{h.k.}) - \\ - T_1 \cdot \frac{1}{3} \cdot y_{M_1} + F_{mp.2} \sin \varphi_3 \cdot x_{mp.2} - Q \cdot x_C = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнениях (5) - (7) принято: $Q = \gamma P$ - вес пород в эллиптическом сегменте, приходящийся на единицу длины лавы (γ - объёмный вес пород), а x_C - абсцисса его центра тяжести, определяемая зависимостью $x_C = S_y/P$, в которой S_y и P вычисляются по формулам (1) и (2); T_1 , T_2 - горизонтальные силы распора, возникающие в породах свода, которые здесь считаются сыпучей средой; $F_{mp.1}$, $F_{mp.2}$ - силы трения по линиям скольжения O_1M и EM , соответственно; x_{N1} , x_{N2} , ..., x_{R3} - горизонтальные расстояния между точками приложения соответствующих сил; $x_{mp.2} = x_{O1} - a_1 + c$ - гори-

зонтальное расстояние от точки O_1 до линии действия силы $F_{mp.2}$. Силы T_1 , T_2 , а также $F_{mp.1}$, $F_{mp.2}$ определяются следующим образом

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\lambda' \cdot \gamma \cdot y_{M_1}^2}{2}, \\ T_2 &= \frac{\lambda' \cdot \gamma \cdot (y_M - m_{h.k.})^2}{2}, \\ F_{mp.1} &= T_1 \cdot \sin \varphi_3 \mu'_{mp}, \\ F_{mp.2} &= T_2 \cdot \sin \varphi_3 \mu'_{mp}, \end{aligned}$$

где λ' - коэффициент бокового распора в сыпучей среде, связанный с углом внутреннего трения ρ' этой среды зависимостью

$$\lambda' = \operatorname{tg} \left(\frac{90^\circ - \rho'}{2} \right);$$

y_{M_1} , y_M - ординаты точек M_1 и M ; μ'_{mp} - коэффициент трения пород свода, также связанный с ρ' зависимостью вида $\mu'_{mp} = \operatorname{tg} \rho'$.

Если реакции в крепях фиксированы, то решение задачи сводится к нахождению габаритных размеров эллиптического сегмента, расположенного в пределах свода давления. При этом возможны два варианта (две схемы). В первом варианте призма сползания получает значительные смещения, поворачиваясь вокруг опоры O_1 , которая за счёт значительного трения не скользит по наклонной линии O_1K призмы сползания в краевой зоне угольного пласта, а остается неподвижной. Во втором варианте из-за недостаточного трения возможно скольжение опоры (даже без разрушения угольного пласта под ней) по наклонной линии O_1K , т.е. призма пород кровли, получив значительные смещения, займет положение, параллельное исходному состоянию, выведя из строя крепи выработок. Условие равновесия при возможном скольжении опоры определяется со-

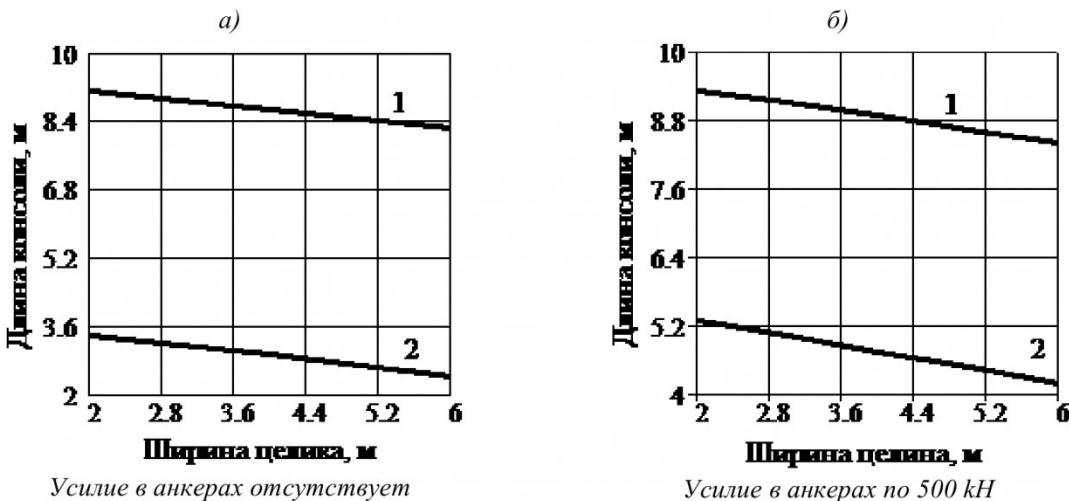


Рис. 3. Зависимость ширины целика от длины консоли основной кровли при разных усилиях в анкерах для $f=1$, $R_3=5,4$ МН

гласно закону Кулона выражением [9]

$$(Y_{O1} \cos \theta + X_{O1} \sin \theta) \cdot \mu'_{mp} \geq X_{O1} \cdot \cos \theta - Y_{O1} \cdot \sin \theta$$

в котором угол θ (рис. 1) определяется по формуле

$$\theta = \frac{90^\circ + \rho}{2}$$

Ниже приведены результаты расчётов, представленные в виде графиков, которые получены в ходе реализации описанной выше модели путём проведения многовариантного вычислительного эксперимента при следующих значениях параметров среды: $\gamma=25 \text{ kH/m}^3$, $m_{n.k.}=6 \text{ м}$, $m_b=4,5 \text{ м}$, высота выработки $h_b=2,5 \text{ м}$, $\sigma_{n.t}=10 \text{ MPa}$, $R_c=40 \text{ MPa}$, $k_o=0,43$, $\eta=0,5$, $\chi=0,4$, $n=0,6$, $k(t)=0,93$, $\lambda=0,4$, $\rho=40^\circ$, $\xi=70^\circ$, $\varphi_3=75^\circ$, $k_{kpn}=2m_a+4,5$, остаточная прочность определяется по эмпирической формуле $\sigma_{ocm}=0,5f$, $\rho'=20^\circ$. Усилия в анкерах двух рядов приняты одинаковыми и изменяются в диапазоне $[0, 500] \text{ kH}$, $a=10^\circ$, $k(v)=0,5$.

Анализ полученных графических результатов приводит к следующим выводам.

1. Кривые на рис. 3, 4, обозначенные цифрой 1, соответствуют переходу от исходного состояния равновесия к соседнему за счёт поворота сегмента пород кровли вокруг опоры O_1 , кривые под цифрой 2 – переходу к соседнему состоянию равновесия за счёт сползания его опоры вдоль призмы в краевой зоне пласта. На всех рисунках кривые 2 расположены значительно ниже кривых 1. Это говорит о том, что на исследуемом диапазоне коэффициента крепости угольного пласта при нарушении равновесия эллиптического сегмента пород кровли, когда происходит его отделение от свода давления, реализуется схема скольжения его опоры по призме сползания угольного пласта.

2. При незначительной прочности угольного пласта ($f=1$) с ростом ширины целика происходит уменьшение длины консоли вне зависимости от

значений реактивных усилий в анкерах (рис. 3). Кривые рисунка 3 демонстрируют ниспадающий характер, они практически линейны и параллельны друг к другу.

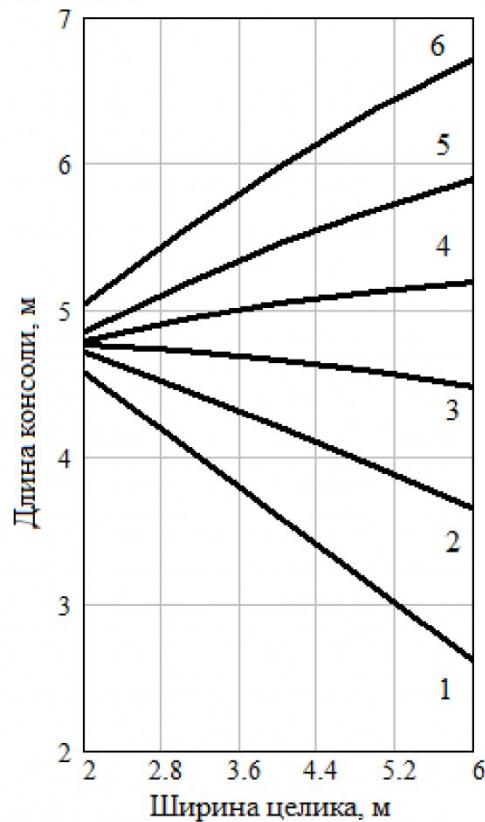


Рис. 5. Зависимость ширины целика от длины консоли основной кровли при разных значениях коэффициента крепости угольного пласта для $N=350 \text{ kH}$, $R_3=430 \text{ kH}$ (кривая 1 соответствует $f=0,75$; кривая 2 - $f=1$; 3 - $f=1,25$; 4 - $f=1,5$; 5 - $f=1,75$; 6 - $f=2$)

Ниспадающий характер графиков объясняется недостаточной несущей способностью целика. Несмотря на увеличение его ширины, растёт и

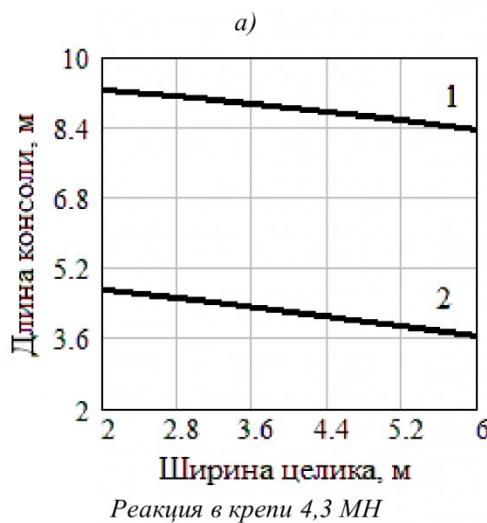
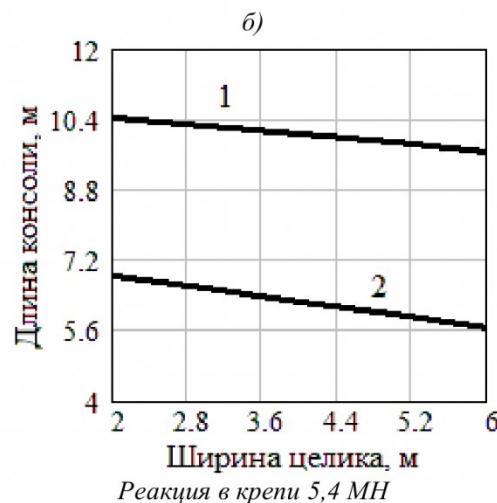


Рис. 4. Зависимость ширины целика от длины консоли основной кровли при разных значениях реакций в секциях крепи для $N=350 \text{ kH}$, $f=1$



Реакция в крепи $5,4 \text{ MN}$

основание эллиптического сегмента (призмы сползания), а, следовательно, увеличивается его масса, которая в большей степени воспринимается не целиком, а крепями. Рост усилия в анкерах с 0 до 500 kN увеличивает длину консоли в среднем на 42%.

3. Как следует из графиков, представленных на рис. 4, при достаточно слабом угольном пласте ($f=1$) вне зависимости от реакции крепи с ростом ширины целика длина консоли уменьшается практически линейно.

Однако влияние реакции крепи механизированного комплекса на размеры консоли всё же существенно. Так, при её увеличении с 4,3 до 5,4 MН, т.е. в 1,256 раза, длина консоли увеличивается в 1,546 раза.

4. Границы ниспадающего и возрастающего характера изменения длины консоли с увеличением размеров целиков для разных значений коэффициента крепости угольного пласта устанавливают кривые, представленные на рис. 5. Они, как и в предыдущих случаях, также практически линейны. Видно, что кривые при коэффициенте крепости менее 1,35 убывают, а при $f > 1,35$ - возрастают.

Заключение

1. Представленная в статье модель геомеханического состояния массива в окрестности демон-

тажной камеры корректно описывает его поведение при подходе очистной выработки к заранее подготовленной демонтажной камере, что подтверждается данными шахт Кузбасса, например, шахты Котинская. Применение модели обеспечивает выбор рациональных параметров демонтажной камеры и целиков в зависимости от конкретных горно-геологических условий.

2. Применение канатных анкеров глубокого заложения увеличивает длину консоли основной кровли в среднем на четверть по сравнению с их отсутствием. Такой эффект может быть существенным для массивов с труднообрушаемыми кровлями и недостаточным подбучиванием их породами непосредственной кровли.

3. Ширина междукамерного целика, реакция в стойках механизированного комплекса должны подбираться с учётом прочностных свойств этого целика. Поскольку при слабом целике рост его ширины не обеспечивает достаточного увеличения длины консоли пород основной кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ануфриев В.Е., Луций М.Г., Калинин С.И. и др. Опыт применения канатных анкеров в качестве крепи усиления демонтажных камер и выработок, поддерживаемых на границе с выработанным пространством и методика расчета их параметров. - Кемерово: Изд-во ИУУ СО РАН, 2008. 220 с.
2. Айзаксон Э. Давление горных пород в шахтах. - М.: Госгортехиздат, 1961. 176 с.
3. Станкус В.М., В.Г. Кожевин, Муратов В.А. Механика горных пород и устойчивость выработок шахт Кузбасса. – Кемерово: Кемеровск. книжн. изд-во. – 1973. 346 с.
4. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. – М.: Недра, 1976. 224 с.
5. Бронштейн И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике. - М.: Наука, 1980. 976 с.
6. Цимбаревич П.М. Механика горных пород. - М.: Углехиздат, 1948. 184 с.
7. Методическое руководство по расчёту геомеханических параметров технологии отработки угольных пластов короткими забоями. - С-Петербург: Изд-во Межотраслевого научного центра ВНИМИ, 2001. 66 с.
8. Давыдович И.А., Бажин Н.П., Коренной Ю.П. и др. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт. – М.: Недра, 1971. 288 с.
9. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1995. 416с.

□ Авторы статьи:

Черданцев

Николай Васильевич

- докт.техн.наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики и геомеханики угольных месторождений Института угля и углехимии СО РАН.

Email:cherdantsev@icc.kemsc.ru

Ануфриев

Виктор Евгеньевич

- канд.техн.наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики и геомеханики угольных месторождений Института угля и углехимии СО РАН.

E-mail: anufrve@mail.ru

Преслер

Вильгельм Теобальдович

- докт.техн.наук, ведущий научный сотрудник лаборатории газодинамики и геомеханики угольных месторождений Института угля и углехимии СО РАН.

Тел. 8-3842-45-20-61.