

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54

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

ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЛАВЕ МЕТОДОМ БАЛКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Проблема количественной и качественной оценки влияния опорного давления на угольный пласт при его отработке длинными столбами по простиранию не перестаёт быть актуальной и сейчас.

Существуют разные подходы по учёту этого влияния. Например, разработанный в [1] подход основан на решении задачи о распределении напряжений в окрестности выработанного пространства лавы.

В этой работе, ссылаясь на классическое решение, предполагается, что на некотором удалении от лавы напряжения изменяются по закону квадратной гиперболы, а в непосредственной близости к забою, там, где породы разрушены, напряжения распределены по линейному закону. Решение построено на предположении, что остаточные напряжения на кромке угольного пласта известны, а также на условии баланса нагрузок, т.е. снимаемая в результате выемки угля нагрузка на угольный пласт полностью передаётся на его часть, расположенную в глубине массива. В результате получено аналитическое выражение для определения вертикальной составляющей тензора напряжений. Однако в этом решении отсутствует

участок разгрузки, наличие которого подтверждается большинством экспериментальных исследований. Следовательно, этот подход не выявляет впереди лавы пониженных напряжений по сравнению с литологическими напряжениями.

Хорошо известно, что опорное давление при отработке угольных пластов длинными столбами по простиранию наиболее значительно проявляется в случаях, когда отсутствует подбучивание пород основной кровли. Очевидно, что в краевой зоне угольного пласта при его отработке очистным забоем повышенные напряжения (напряжения опорного давления) вызваны консольным зависанием пород кровли за лавой.

Для оценки нагрузки на крепь в очистном забое при длинностолбовой системе разработки принимается следующая модель геомеханического состояния углевмещающего массива. Внутри бесконечной среды имеется полость, представляющая собой очистную выработку (рис. 1). Изнутри полость подкреплена погонной реакцией R_3 , создаваемой механизированным комплексом. Нагрузка на крепь формируется породами, согласно теории сводообразования [2, 3], отделяющимися от массива по криволинейному контуру, пред-

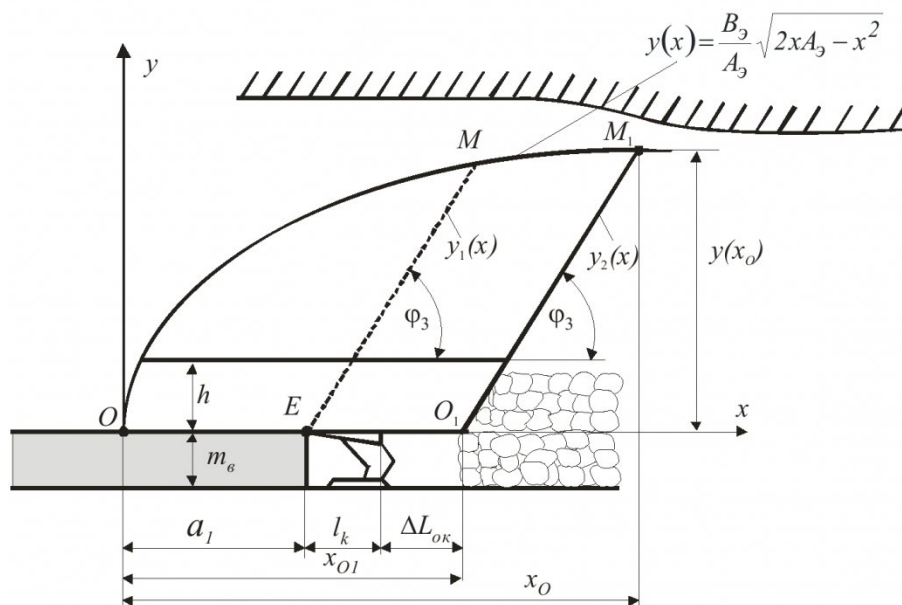


Рис. 1. Расчётная модель задачи

ставленному сводом в виде полуэллипса. По этой теории передняя часть свода с его вершиной располагается впереди лавы. Породы свода опираются на краевую зону пласта, ширина которой до очистного забоя равна a_1 . Задняя часть свода (за секциями крепи) опирается на крепь и обрушенные породы. По мере подвигания лавы растет длина $\Delta L_{ок}$ консоли пород основной кровли. В результате этого увеличиваются её вертикальные линейные смещения (прогибы) и изгибающие моменты, под действием которых и происходит разрушение слоя основной породы и, как следствие, сдвигание 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]. Следовательно, влияние на механизированную крепь оказывают породы, находящиеся в границах эллиптического свода естественного равновесия. Из рис. 1 это породы, заключенные в эллиптическом сегменте O_1M_1ME .

Для изучения параметров опорного давления (длина предельно напряжённой зоны, коэффициент концентрации напряжений), которые, как отмечено выше, в первую очередь, определяются мощностью h основной кровлей, может быть принята расчётная схема в виде плиты, опирающейся на угольный пласт, который полагается упругим основанием с коэффициентом отпора k_0 . Однако, если размер зависящей части плиты (блока) по простиранию значительно меньше, чем длина лавы (длины очистного забоя), то можно считать, что плита работает в условиях плоской деформации. Т.е. любой слой малой по сравнению с длиной лавы ширины работает в равных с соседними такими же слоями условиях. Поэтому такой слой основной кровли, расположенный вдали от штреков, оконтуривающих выемочный столб, можно считать балкой-полоской или балкой единичной ширины, опирающейся на угольный пласт мощностью m_b (рис. 1). В этой связи расчёт плиты на упругом основании сводится к более простому – расчёту балки на упругом основании (рис. 2).

Модель балки на упругом основании с нашей точки зрения достаточно адекватно описывает взаимодействие угольного пласта с породами основной кровли. Балка, деформируясь под действием налегающих сверху горных пород, передаёт от них нагрузки на угольный пласт, в котором возникают силы отпора, так называемые реакции упругого основания, по которым можно судить о напряжённо-деформированном состоянии угольного пласта, а, следовательно, о размерах участков разгрузки и повышенных напряжений.

Существует ряд гипотез (допущений) о характере взаимодействия балки и упругого основания. Наиболее простая и в то же время достаточно хорошо согласующаяся с натурными наблюдениями является гипотеза Винклера. Согласно ей реактивный отпор $p(x)$, возникающий в произвольной

точке основания, пропорционален прогибу балки $v(x)$ в этой точке, т.е. $p(x)=k \cdot v(x)$. В этой зависимости коэффициент пропорциональности равен $k=k_0 \cdot b$, где b – ширина балки, а k_0 – коэффициент отпора основания, называемый также коэффициентом «постели». Физический смысл коэффициента постели означает величину распределённой на единице площади силы, прикладываемой в данную точку основания и вызывающей в нём единичное линейное смещение (единичный прогиб), равное единице длины. Можно указать целый ряд случаев, когда расчёт по Винклеру будет единственно правильным, либо приводит к результатам, одинаковым с результатами теории упругости [5]. Примером теоретического и практического совпадения результатов является основание, представляющее собой упругий слой, покоящийся на нижнем почти не сжимаемом слое скальной породы.

Теория расчёта балки, расположенной на сплошном винклеровом основании, в рамках допущений Бернулли (гипотеза плоских поперечных сечений) достаточно строго изложена, например, в [6, 7]. Основные сложности расчёта таких балок заключаются в определении коэффициента отпора основания k_0 . Строго говоря, этот коэффициент надо определять экспериментально для каждого упругого основания. Однако более, менее удовлетворительные результаты получаются при использовании справочных величин этого коэффициента, рекомендуемых для конкретного типа упругого основания, в том числе и для массивов горных пород [7, 8].

В рамках гипотезы Винклера имеются несколько решений о напряжённо-деформированном состоянии балки на упругом основании. Наиболее известны решения акад. А.Н. Крылова [6] и проф. Пузыревского [9], которые получены через именные функции в ходе решения в замкнутом виде обыкновенного дифференциального уравнения четвёртого порядка изогнутой оси балки.

В расчётах оснований и фундаментов чаще всего используются решения в форме функций Крылова, представленные комбинациями гиперболических и тригонометрических функций, достоинство которых при произвольном количестве дифференцирований переходить друг в друга

$$V_1(\xi) = ch\xi \cdot \cos \xi,$$

$$V_2(\xi) = \frac{1}{2}(ch\xi \cdot \sin \xi + sh\xi \cdot \cos \xi),$$

$$V_3(\xi) = \frac{1}{2}sh\xi \cdot \sin \xi,$$

$$V_4(\xi) = \frac{1}{4}(ch\xi \cdot \sin \xi - sh\xi \cdot \cos \xi),$$

а функции прогибов v , углов поворотов θ , изгибающих моментов M и поперечных сил Q выражаются через функции Крылова следующим образом

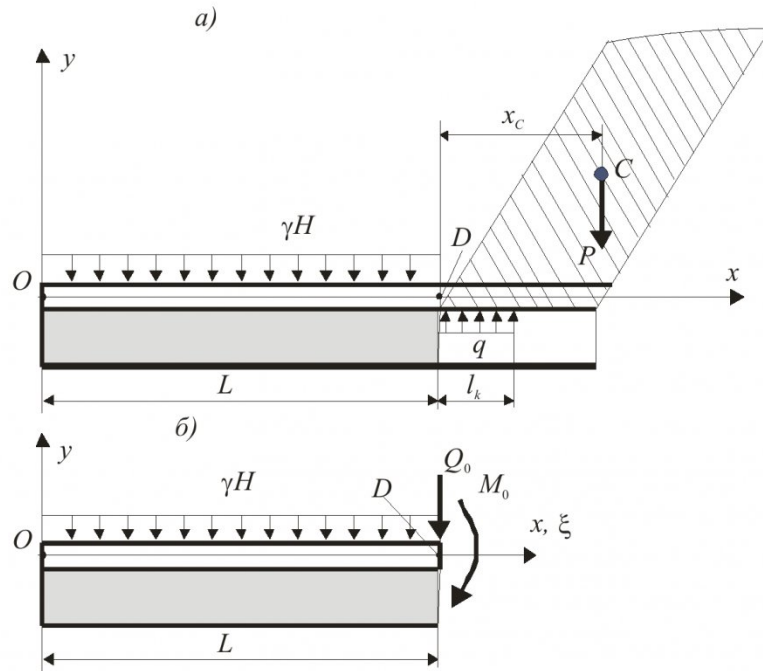


Рис. 2. Расчётная схема слоя основной кровли

$$v(x) = v(\xi) = C_1 \cdot V_1(\xi) + C_2 \cdot V_2(\xi) + C_3 \cdot V_3(\xi) + C_4 \cdot V_4(\xi),$$

$$\theta(x) = v'(x) = \eta \cdot v'(\xi) = \eta \left(\begin{array}{l} -4C_1 \cdot V_4(\xi) + C_2 \cdot V_1(\xi) + \\ + C_3 \cdot V_2(\xi) + C_4 \cdot V_3(\xi) \end{array} \right),$$

$$M(x) = EJ \cdot v''(x) = EJ \cdot \eta^2 \left(\begin{array}{l} -4C_1 \cdot V_3(\xi) - 4C_2 \cdot V_4(\xi) + \\ + C_3 \cdot V_1(\xi) + C_4 \cdot V_2(\xi) \end{array} \right),$$

$$Q(x) = EJ \cdot v'''(x) = EJ \cdot \eta^3 \left(\begin{array}{l} -4C_1 \cdot V_2(\xi) - 4C_2 \cdot V_3(\xi) - \\ -4C_3 \cdot V_4(\xi) + C_4 \cdot V_1(\xi) \end{array} \right).$$

В представленных зависимостях E – модуль упругости материала балки, $J = bh^3/12$ – осевой момент инерции поперечного сечения балки, $\xi = \eta x$ – безразмерная абсцисса, параметр η определяется

по формуле $\eta = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot EJ}}$, C_1, C_2, C_3, C_4 – про-

извольные постоянные интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки, определяемые из граничных условий задачи (из условий закрепления концов балки). При формулировании граничных условий учтём тот факт, что зависящая консоль пород основной кровли значительно короче той её части, которая расположена в массиве впереди забоя. Пользуясь этим обстоятельством, консоль можно отбросить, а действующую на неё нагрузку заменить силой P и парой сил m , приложенными к центру тяжести сече-

ния балки.

Нагрузка, действующая на балку, включает следующие нагрузки. Равномерно распределённую нагрузку γH (γ – плотность налегающих горных пород, H – глубина ведения горных работ) по длине L , создаваемую налегающими сверху породами, и нагрузку, действующую на консольную часть балки, формируемую породами, заключёнными в эллиптическом сегменте O_1M_1ME (рис. 2 а), называемом призмой сползания, заменяются соответственно одной и парой сил (рис. 2 б). Вес пород P , заключённый в призме равен её площади (для условий плоской деформации), умноженной на плотность пород, заключённых в ней. Площадь сегмента, а также статический момент инерции относительно оси y , через который определяется абсцисса центра тяжести x_c , в принятой прямоугольной системе координат определяется через определённые интегралы, как в [9].

Полагая, что в глубине массива, где выбрано начало координат (рис. 2б), балка не закреплена, то её линейное (прогиб) и угловое (угол поворота) перемещения сечения не равны нулю, то граничными условиями задачи являются следующие условия:

$$\begin{array}{l} \underline{x=0} \quad 1) M(0)=0, \quad 2) Q(0)=0; \\ \underline{x=L} \quad 1) M(0)=M_0=-P \cdot x_c + q \cdot l_k^2/2, \\ \quad \quad 2) Q(0)=Q_0=P - q \cdot l_k. \end{array}$$

Ниже приведены результаты расчётов по представленной схеме, оформленные в виде графиков, которые получены в ходе реализации описанной выше модели путём проведения многовариантного вычислительного эксперимента при следующих значениях параметров среды: $\gamma=25 \text{ кН/м}^3$, $m_b=4,5 \text{ м}$, предел прочности угольного пла-

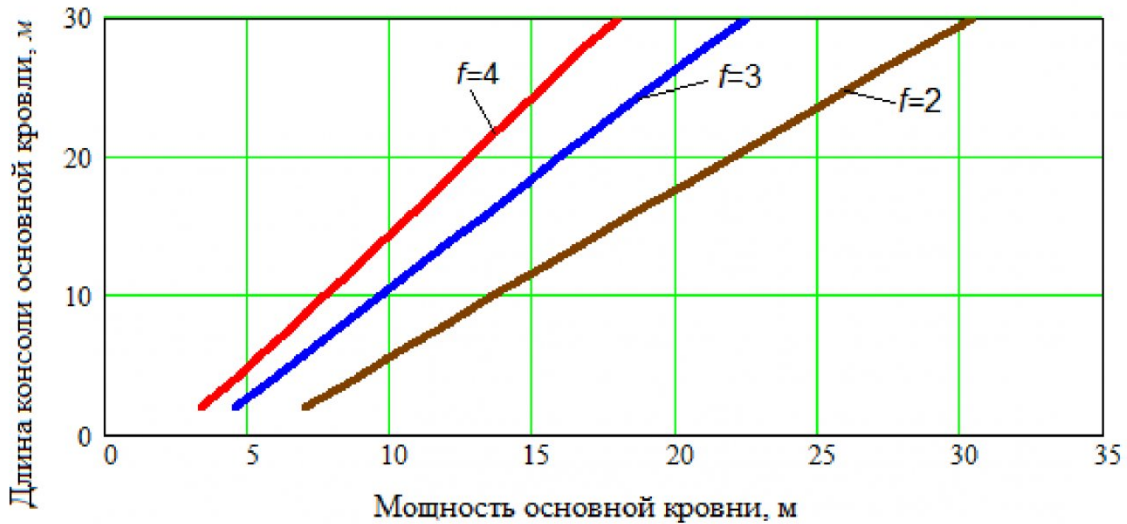


Рис. 3. Графики изменения длины консоли основной кровли в зависимости от её мощности при некоторых значениях коэффициента крепости пород кровли и $k=10^3 \text{ МН/м}^2$

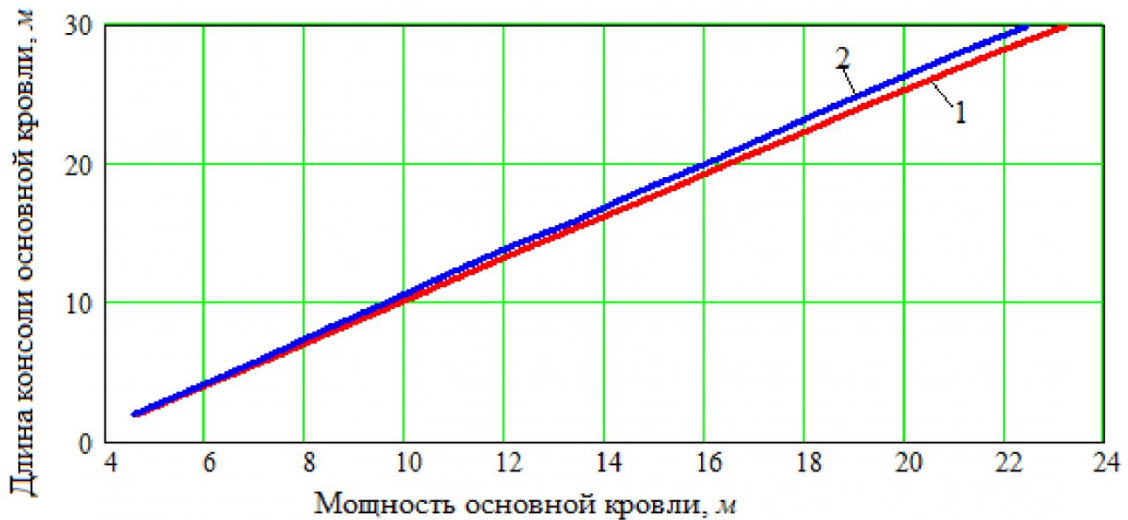


Рис. 4. Графики изменения длины консоли основной кровли в зависимости от её мощности при некоторых значениях коэффициента крепости пород кровли и $f=3$ (кривая 1 соответствует $k=10^3 \text{ МН/м}^2$, кривая 2 – $k=2 \cdot 10^2 \text{ МН/м}^2$)

стовая - $\sigma_{нл}=10 \text{ МПа}$, угол сдвижения пород кровли - $\varphi_3=75^\circ$, остаточная прочность пласта - $\sigma_0=5,74 \text{ МПа}$, угол внутреннего трения угля $\rho=20^\circ$, пласт пологого падения (угол его падения α менее 10°). Размер ширины балки-полоски $b=1 \text{ м}$. Распределённая нагрузка, создаваемая крепью механизированного комплекса $q=1 \text{ МПа}$, глубина ведения очистных работ $H=400 \text{ м}$.

Примем длину балки (блока) основной кровли $L=90 \text{ м}$ и проведём вычисления, последовательно изменяя следующие параметры. Мощность пород основной кровли $h=(4 - 20) \text{ м}$, коэффициент отпора упругого основания $k=k_0b=(2 \cdot 10^2 - 10^3) \text{ МПа}$, коэффициент крепости пород основной кровли $f=2, 3, 4$, её пределы прочности: на сжатие - $R_c=10f \text{ МПа}$, на изгиб - $R_u=0,3R_c$. Размер $a_l=\sqrt{\gamma H / f}$ определяется согласно [3]. Ограничим объём вычис-

лительного эксперимента следующим условием. Будем определять основные параметры опорного давления перед самым обрушением кровли (в момент её обрушения), т.е. ставить в соответствие, исходя из условия прочности балки, размер консольной (зависающей) части $\Delta l_{ок}$ и её высоту h .

В качестве демонстрации реализации данной модели на рис. 3 приведены графики изменения размера консоли в зависимости от высоты балки, т.е. мощности пород основной кровли, построенные при трёх значениях их коэффициента крепости. Графики практически линейны. Так, например, из рисунка следует, что при $f=4$ и $h=15 \text{ м}$ длина консоли составляет около 25 м , а при $f=2$ и $h=15 \text{ м}$ длина консоли примерно 12 м . Т.е. увеличение длины консоли почти обратно пропорционально увеличению коэффициентов крепости.

На рис. 4 графики демонстрируют влияние коэффициента отпора упругого основания. Хорошо

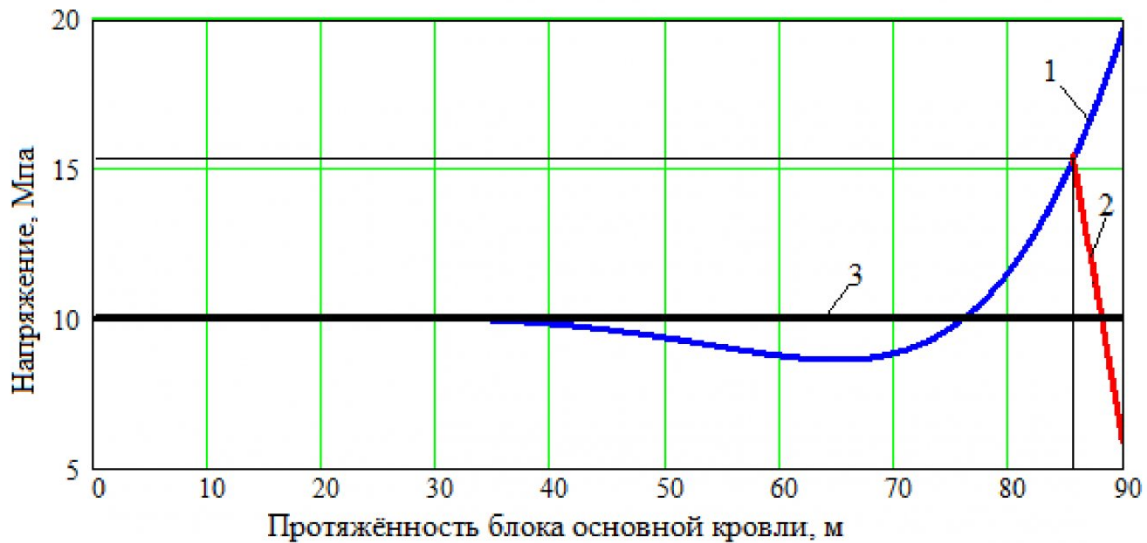


Рис. 5. График давления на угольный пласт в окрестности лавы

видно, что они достаточно близко расположены друг к другу, что свидетельствует о незначительном его влиянии на прочность балки, хотя величины коэффициента отпора упругого основания в двух случаях отличались в 5 раз.

В ходе эксперимента проведены исследования влияния размера зависания основной кровли на напряжённое состояние в угольном пласте. В частности, на рис. 5 приведены графики изменения напряжений в угольном пласте вдоль его простирания. Графики построены при следующих параметрах массива: $k=10^3$ МПа, коэффициент крепости пород кровли $f=4$, а мощность кровли основной породы $h=18,3$ м, длина консоли зависания $\Delta L_{ок}=30$ м соответствуют её предельному состоянию (в момент обрушения). Кривая 1 построена по результатам расчёта балки на упругом основании. Прямая 2 описывает поведение массива в предельно напряжённой зоне, она согласно [4] строится по уравнению $\sigma(x_I) = \sigma_0 + k_x \cdot x_I$, где k_x – коэффициент пропорциональности, определяемый по формуле

$$k_x = \frac{2 \cdot \sigma_0}{m_b} k_V,$$

в которой коэффициент k_V зависит от скорости подвигания забоя лежит в пределах $0,4 - 1,0$. Здесь он принят равным $0,8$ единицы. Комбинация линий 1 и 2 описывает поведение массива в призабойной части очистной выработки. Так, начиная от груди забоя до точки пересечения с кривой 1, напряжения в пласте следуют закону прямой 2 (прямая линия предельно напряжённой зоны). Следуя далее вглубь массива за точкой пересечения этих графиков, напряжения в угольном пласте, изменяются согласно кривой линии 1 (линия упругого деформирования пласта). Прямая линия 3 соответствует напряжению γH . Как следует из графика абсцисса и ордината точки пересечения

кривой 1 и прямой 2 равны, соответственно, 86 м и $15,1$ МПа. Поэтому размер предельно напряжённой зоны равна $90-85=5$ м, коэффициент концентрации $k_\sigma=15,1/\gamma H=1,51$, а длина повышенного горного давления (ПГД) составляет $90-76=14$ м. По графику легко определить участок разгрузки, соответствующий напряжениям, меньшим, чем в нетронутым массиве. Он простирается на длину от 35 до 77 м – на 42 м. Из графика также следует, что на расстоянии от 0 до 35 м напряжения в балке равны напряжениям нетронутого массива. А влияние очистных работ простирается от очистного забоя вглубь массива на расстояние $90-35=55$ м.

При построении графиков, представленных на рис. 6, коэффициент крепости пород кровли принят $f=3$, а коэффициент отпора основания, высота балки и соответствующая консоль менялись. Так при построении графиков на рис. 6 (а) они принимались следующими: $k=10^3$ МПа, $h=10,9$ м, $\Delta L_{ок}=12$ м, а для графиков на рис. 6 (б) $k=2 \cdot 10^2$ МПа, $h=11,2$ м, $\Delta L_{ок}=12$ м.

Из графиков, в частности, следует, что при $k=10^3$ МПа размер зоны влияния очистных работ составляет $90-40=50$ м, длина ПГД $90-66=24$ м, а длина зоны разгрузки равна $66-40=26$ м. При $k=2 \cdot 10^2$ МПа эти размеры получились, соответственно, такими 80 м, 38 м и 42 м. Следует также отметить, что максимальные напряжения в балке, действующие в её крайних волокнах, приходятся на сечение, расположенное не в очистном забое, а на сечение в глубине массива. При $k=10^3$ МПа это сечение расположено в глубине массива на расстоянии около 2 м от забоя, а при $k=2 \cdot 10^2$ МПа это расстояние составляет 5 м.

Из анализа полученных результатов следует:

1. Отношения размеров консолей зависания основной кровли в момент обрушения для различ-

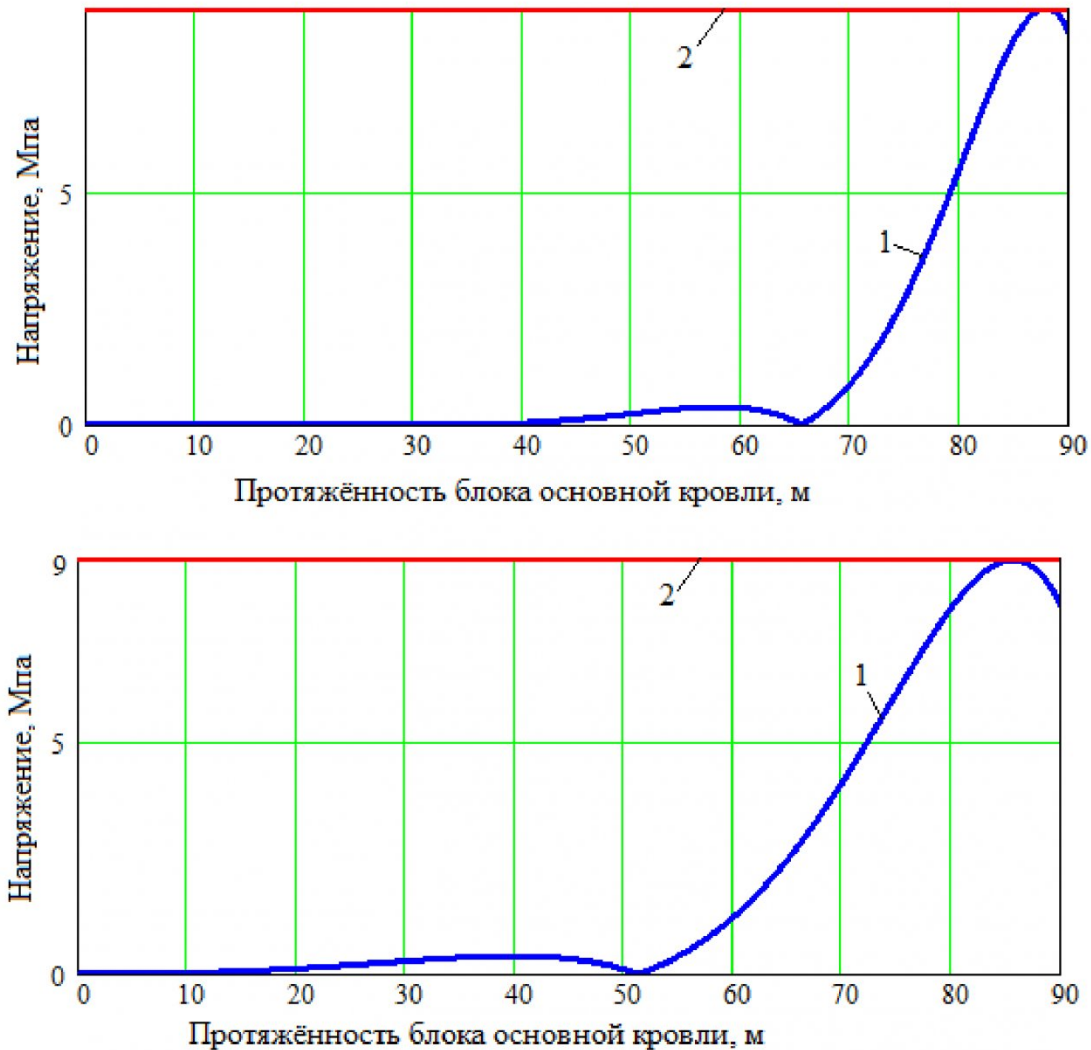


Рис.6. Графики изменения напряжений в основной кровле вдоль выемочного столба (1 – кривая напряжений в крайних волокнах балки из решения балки на упругом основании, 2 – прямая предельного напряжения в балке)

ных горных пород практически обратно пропорциональны их коэффициентам крепости.

2. Значение коэффициента отпора упругого основания мало влияет на размер зависания основной кровли, однако на размеры опорного давления (повышенного горного давления) это влияние существенно.

3. Прямая линия, описывающая поведение угольного пласта в предельно напряжённой зоне совместно с кривой отпора упругого основания, построенной из классического решения балки на упругом основании адекватно оценивают проявление горного давления при отработке пластов длинными столбами по простиранию. Т.е. участок опорного давления с повышенными напряжениями сменяется участком разгрузки, который вдали от забоя стремится к участку с постоянными напряжениями нетронутого массива.

4. Максимальные напряжения в основной кровле действуют в его сечении, расположенном в глубине массива на некотором расстоянии от за-

боя.

Заключение

1. Представленная в статье модель геомеханического состояния массива в окрестности очистной выработки достаточно удовлетворительно описывает напряжённое состояние угольного пласта пологого залегания при его отработке длинными столбами по простиранию. Во всяком случае модели, основанные на инженерных подходах, или построенные в рамках теории упругости и пластичности, не описывают такой картины изменения напряжений, в которой участки опорного давления сменяются участками разгрузки.

2. Некоторые результаты, полученные в ходе реализации модели, по-видимому, занижены по сравнению с результатами натуральных наблюдений и измерений. Это касается, прежде всего, значений коэффициента концентрации напряжений и размера предельно напряжённой зоны.

3. Модернизация модели в направлении учёта в ней разрушений угольного пласта в предельно

напряжённой зоне наверняка повысит её адекватность реальному массиву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лупий М.Г., Баклушин Ю.И., Ануфриев В.Е. и др.* Геомеханическое состояние приконтурного массива демонтажной камеры. - Кемерово: ИУУ СО РАН, 2006. - 80 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. *Горбунов-Посадов М.И.* Балки и плиты на упругом основании. – М.: Машиностроение, 1949. - 367 с.
6. *Филоненко-Бородич М.М.* Курс сопротивления материалов. - М.: Высшая школа. Т. 2, 1946. - 624 с.
7. *Дойхен Ю.М.* Расчёт балок конечной длины на упругом винклеровском основании. Хабаровск: Хабаровск. книжн. из. -во, 1979. - 147 с.
8. *Киселёв В.А.* Балки и рамы на упругом основании. М.-Л.: ОНТИ, 1936. - 342 с.
9. *Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С.* Справочник по строительной механике корабля. – Л.: Судостроение. Т. 1, 1982. - 376 с.
10. *Черданцев Н.В., Ануфриев В.Е., Преслер В.Т.* Оценка влияния горнотехнических параметров на размер зависания основной кровли вблизи демонтажной камеры //Вестник КузГТУ, 2010. № 5. С. 45 - 50.

□ Авторы статьи:

Черданцев
Николай Васильевич,
докт.техн.наук, ст. научн. сотр.
Института угля СО РАН.
Email: cherdantsevnnv@icc.kemsc.ru

Преслер
Вильгельм Теобальдович,
докт.техн.наук, вед. научн. сотр.
Института угля СО РАН.
Тел. 8-3842-45-20-61

Ануфриев
Виктор Евгеньевич,
канд.техн.наук, ст. научн. сотр.
Института угля СО РАН.
Email: anufrve@mail.ru.