

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРУШЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ
ПРИ ОТРАБОТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЛАСТОВ УГЛЯ
ДЛИННЫМИ ОЧИСТНЫМИ ЗАБОЯМИ**

У статті визначені особливості форм блоків склепіння обвалення гірських порід у покрівлі вугільного шару при формуванні генерального і сталого обвалень. Обґрунтовано закономірності сталого кроку обвалення порід покрівлі. У результаті обробки даних комп'ютерного моделювання встановлена нелінійна залежність величини кроку сталого обвалення від перемінних параметрів довжини лави, потужності порід безпосередньої й основної покрівлі.

**LEGITIMACIES OF ROOF ROCK FALL AT WORKING
OF HORIZONTAL COAL SEAMS BY LONG WORKING FACES**

In paper features of shapes of blocks of a roof arch of rocks in a roofing of a coal seam are spotted at formation of general and steady-stated roof falls. Legitimacies of a steady-stated roof-caving increment of roof rock are proved. As a result of a data handling computer model operation nonlinear dependence of quantity of a step of a steady-stated roof fall on variable parameters of length of longwall, power of soils immediate and a main roof sets.

Актуальность исследований. При ведении очистных работ управление кровлей на шахте осуществляются полным обрушением, которое сопровождается рядом специфических явлений: увеличением нагрузки на механизированную крепь и крепь сопряжения, повышенным газовыделением в призабойное пространство лавы, пучением пород почвы, динамическими эффектами. Все это затрудняет работу механизмов, снижает темпы проходки и безопасность ведения очистных работ. Поэтому, возникает задача прогнозирования момента обрушения пород основной кровли, т.е. установление параметров первого (генерального) обрушения и связанного с ним последующих обрушений, которые носят периодический характер.

Определение шага и в первом, и во втором случае обрушения связано с установлением геомеханических закономерностей, протекающих в окружающем породном массиве непрерывном подвигании очистного забоя, сопровождающимся постоянным перераспределением концентрации напряжений и, в предельном состоянии, обрушением пород кровли.

Натурные исследования показывают, что при залегании в породах кровли отработываемого угольного пласта слоя крепких пород проявления горного давления в лаве зависят от мощности этого слоя и места его расположения в стратиграфической колонке по отношению к пласту угля.

Особенности генерального обрушения. При генеральном обрушении, как было установлено ранее [1], в кровле образуется свод обрушения. Его очертания в случае пород сравнительно однородных по прочности близко к параболическому [2], а при наличии слоя крепких пород напоминает трапецию [3].

Задача решается методом конечных элементов (МКЭ) [1]. Для определения изменений НДС пород рассмотрена последовательность расчетных схем (рис. 1), имитирующих отход лавы от разрезной печи и подвигание очистного забоя.

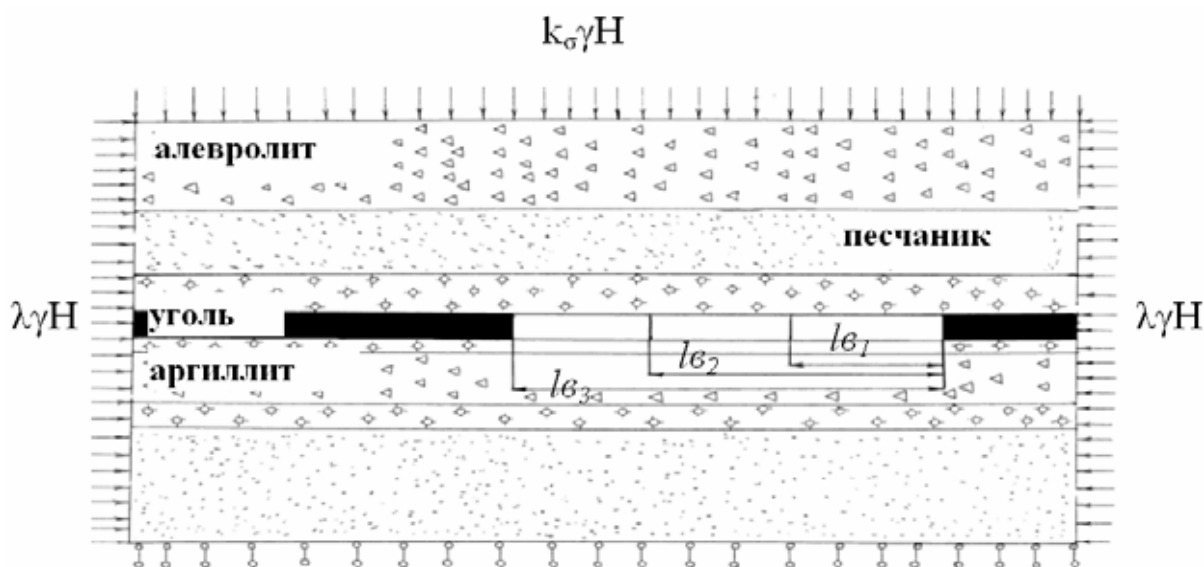


Рис. 1 – Расчетная схема к решению задачи определения величины генерального обрушения

Рассматривалось среднее сечение лавы, перпендикулярное линии очистного забоя. Имеющаяся же в действительности трехмерность исследуемого объема была учтена путем введения в плоскую расчетную схему коэффициента пригрузки k_σ , который позволяет учитывать неравномерность нагружения каждого сечения лавы в зависимости от его расстояния до местоположения дополнительной концентрации напряжений [4], при этом $k_\sigma=1,3$.

Таким образом, согласно выбранной математической модели, исследуемый породный массив представлен весомой упругой плоскостью, нагруженной нормальной равномерно распределенной нагрузкой с интенсивностью $q=k_\sigma \gamma H=1,14 \cdot 10^6$ кг/м² по верхней границе. По боковым границам исследуемый массив нагружен нагрузкой с интенсивностью $\lambda \gamma H$, где λ – коэффициент бокового распора, определяемый по формуле $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$; μ – коэффициент Пуассона горных пород [5].

В произвольной точке массива опасность разрушения среды определялась на основе точечного критерия прочности, путем сравнения величины эквивалентного напряжения σ_e с пределом прочности пород на одноосное сжатие R_c . На каждом этапе увеличения выработанного пространства определялись так называемые условные зоны неупругих деформаций, т.е. совокупность точек (узлов), в которой выполняется неравенство:

$$\sigma_e \geq R_c k_c, \quad (1)$$

где R_c – предел прочности на одноосное сжатие; k_c – коэффициент структурного ослабления, учитывающий неоднородность породного массива; σ_e – напряжение эквивалентное одноосному состоянию. Эквивалентное напряжение в точке определяется в соответствии с критерием прочности [6]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi}. \quad (2)$$

Здесь σ_1, σ_3 - компоненты тензора напряжений, $\psi = \frac{R_c}{R_p}$, где ψ - коэффициент хрупкости, R_p - предел прочности на одноосное растяжение.

Определив в каждой точке массива значения эквивалентных напряжений и связанные с ними значения запаса прочности, можно оценить размеры и местоположение условных зон разрушения для сравнительного анализа изменений, которые произошли в массиве на каждом этапе подвигания очистного забоя (линия 2 на рис. 2).

Качественная оценка прочности пород, выполненная на основе точечного критерия, позволяет оценить степень опасности напряженного состояния элементарного объема породного массива с точки зрения разрушения. Однако, целостность системы «лава-породный массив», как структурного элемента геомеханической системы, можно определить лишь на основе некоторого интегрального критерия прочности.

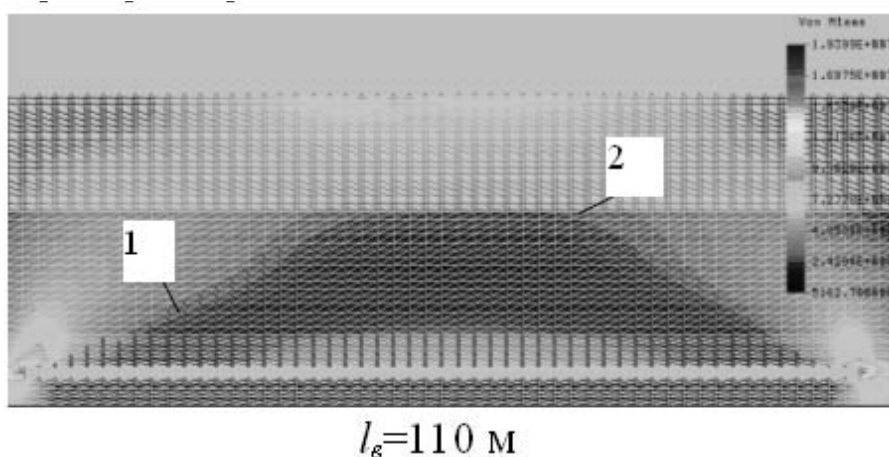


Рис. 2 – Качественная картина условных зон разрушения кровли угольного пласта представленные куполообразной формой при $l_g=110$ м – всю основную кровлю

В рассматриваемом случае при наличии в кровле пласта мощного слоя крепкого песчаника разрушение конструкции начинает развиваться под влиянием растягивающих сил. То есть, в образующемся своде, который предположительно имеет параболическое очертание (рис. 3) вес пород в его пределах удерживается силами сцепления пород по поверхности свода.

Разрушающими являются массовые силы, которые возрастают по мере увеличения ширины образующейся полости. Прогнозируемой формой обрушения при некотором критическом значении ширины полости $l_{кр}$, является разрушение с образованием свода обрушения.

Вес пород в пределах свода обрушения удерживается силами сцепления по-

род по поверхности свода, который в случае плоской задачи имеет форму параболического цилиндра (см. рис. 3). Породы по поверхности цилиндра в самом общем случае работают на отрыв (растяжение) и на сдвиг. При этом условия прочности по высоте свода неодинаковы. Для упрощения расчетной схемы принимаем, что породный массив по линии обрушения работает только на растяжение. Эта предпосылка является определяющей и идет в запас прочности.

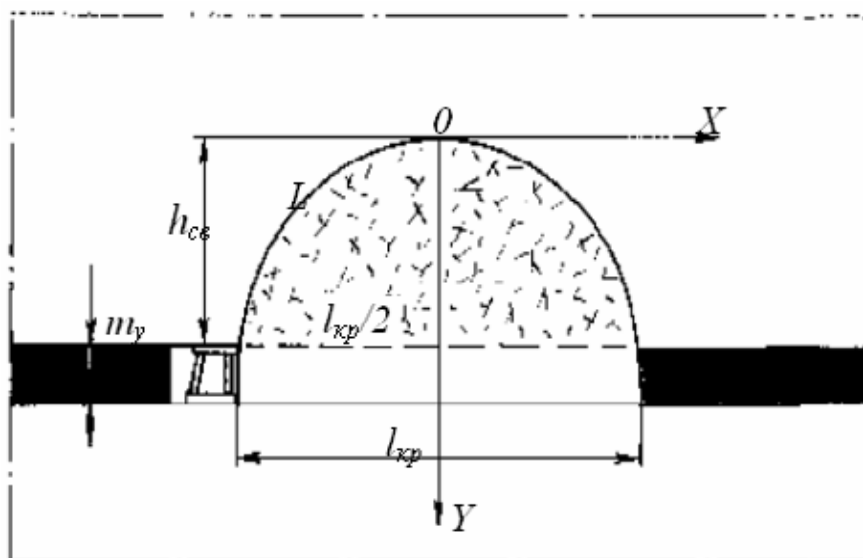


Рис. 3 – Расчетная схема обоснования интегрального критерия прочности при генеральном обрушении

Запас прочности для рассматриваемой расчетной схемы определяется по формуле [1]

$$Z = \frac{R_c^k k_c}{2\gamma_{кр}} \quad (3)$$

Как следует из теории свода естественного равновесия и формулы (3), устойчивость выработки не зависит от глубины заложения выработки [1].

Полагая в (4) $Z=1$, получим формулу для определения предельного (критического) обнажения пород кровли в случае генерального обрушения:

$$l_{кр} = \frac{\sum R_{c_i}^k k_{c_i} h_i}{2\gamma_{ср} \sum h_i} \quad (4)$$

где R_c – среднее значение предела прочности на одноосное сжатие пород кровли, k_c – средневзвешенное значение коэффициента структурного ослабления пород кровли; $\gamma_{ср}$ – средневзвешенное значение объемного веса вмещающих горных пород кровли; h_i – мощность i – го слоя горных пород залегающего в

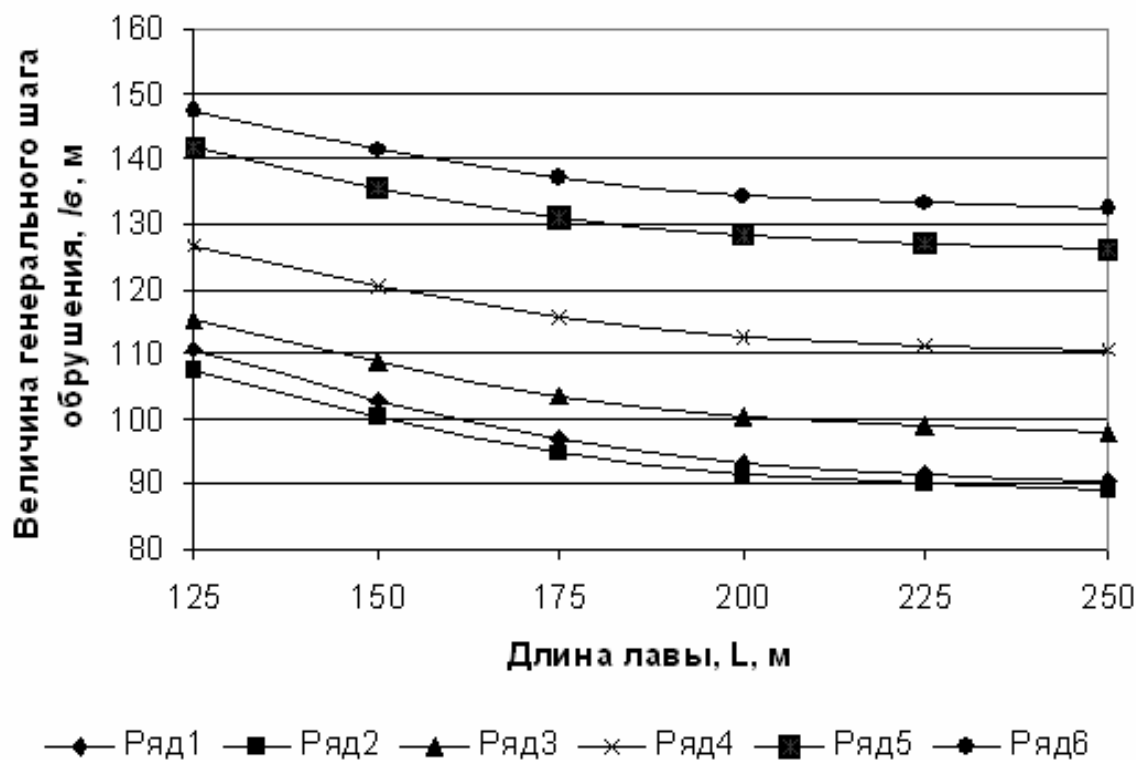
кровле угольного пласта.

Формула (4) по сути, является интегральным критерием прочности пород кровли, пролет которой растет по мере подвигания очистного забоя, достигая некоторого критического значения.

При достижении критического пролета выработки $l_{кр}$ размеры области разрушенных пород (линия 1 рис. 2) совпадают с размерами свода естественного равновесия (линия 2 рис. 2), определенными на основе интегрального критерия прочности (4) при величине запаса прочности, равной 1 ($Z=1$). То есть в кровле выработки формируется свод обрушения некоторой предельной высоты. Этому моменту и соответствует событие обрушения пород кровли.

Расчет устойчивости сложноструктурной кровли угольного пласта при отработке его лавами выполнялся при варьировании h_n и $h_{арг}$ по вышеизложенной методике.

Результаты расчета устойчивости системы «лава-породный массив» сопоставлены с данными практики и результатами лабораторных экспериментов и изложены в [7].



$h_{арг}=0; 3,5; 7; 10; 12; 14$ м, $h_{несч}=2; 4; 8; 12; 16; 18$ м

Рис. 4 – График зависимости величины генерального шага обрушения пород кровли угольного пласта от длины лавы: при варьировании величин

В работе [7] в аналитическом виде в первом приближении получена зависимость для определения величины генерального обрушения и представлена следующей формулой:

$$l_g = 0,07h_{apz}^2 - 2,3h_{apz} + 0,13h_n^2 + 2,6h_n + 95. \quad (5)$$

Зависимость (5) получена для условий решения задачи о плоской деформации. Практика же показывает, что на величину генерального обрушения оказывает влияние длина лавы. Влияние это, как показала обработка натуральных данных, не превышает 20-25 % (рис. 4).

С учетом этого величина генерального обрушения определяется следующей зависимостью:

$$l_g = (0,07h_{apz}^2 - 2,3h_{apz} + 0,13h_n^2 + 2,6h_n + 95) \frac{150 + L}{2L}. \quad (6)$$

Результаты расчетов, полученные по формуле (6) имеют достаточно близкую сходимость с результатами лабораторных исследований и натуральных измерений (расхождение не превышает 20 %).

Следует отметить также, что в случае залегания в основной кровле достаточно мощного пласта прочных пород, отрыв пород может происходить по линии контакта с более слабыми породами, залегающими выше этого пласта. И тогда контур обрушения пород в сечении имеет вид трапеции (рис. 2). С небольшой долей погрешности, граница свода обрушения может быть аппроксимирована ломаной кривой, образующей трапецию (рис. 5), боковые линии которой наклонены под углом α к горизонту.

Исходя из условия равенства площадей двух фигур:

$$S_{mp} = S_{nap}. \quad (7)$$

Площади трапеции и параболы соответственно равны:

$$S_{mp} = b(l_{kp} + btg\alpha), \quad (8)$$

$$S_{nap} = \frac{2}{3}l_{kp}b. \quad (9)$$

В соответствии с теорией М.М. Протодяконова положим, что

$$b = \frac{l_{kp}}{2f}, \quad (10)$$

где f – средневзвешенная величина коэффициента крепости пород по М.М. Протодяконову.

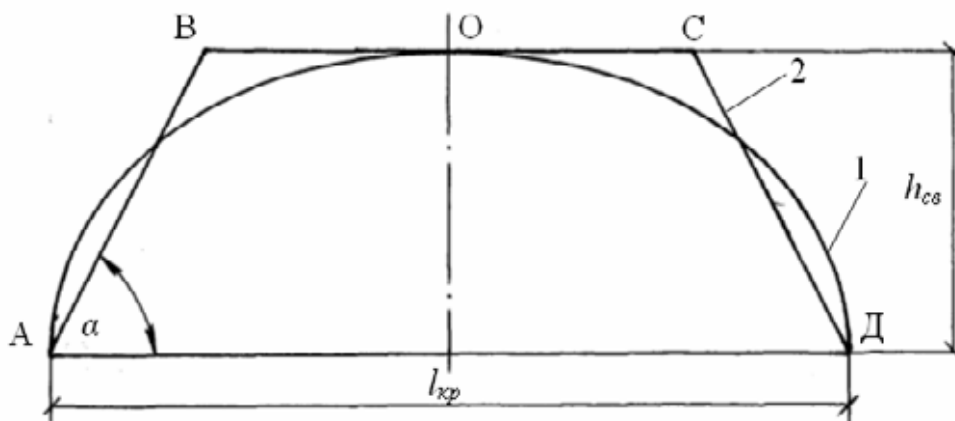


Рис. 5 – Аппроксимация параболического очертания кривой свода обрушения (1) ломаной кривой (2) в форме симметричной трапеции

На рис. 6 показана графическая интерпретация зависимости (10).

Из нее следует, что для широкого диапазона изменения крепости пород ($f=2-6$), величина угла α изменяется от 55° до 75° , что совпадает с ее оценкой А.А. Борисовым [8].

Особенности установившегося обрушения. Геометрические параметры образовавшейся новой геомеханической системы «лава – вмещающий породный массив – выработанное пространство» определяют дальнейшее поведение породного массива при последующей обработке угольного пласта. В соответствии с новой геометрией, определенной параметрами генерального обрушения, меняется НДС пород кровли.

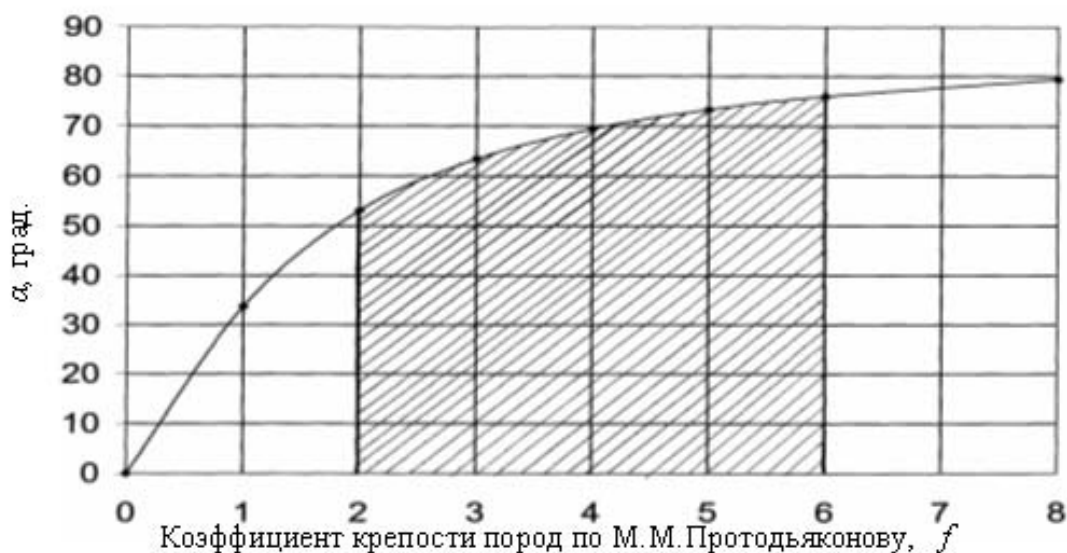
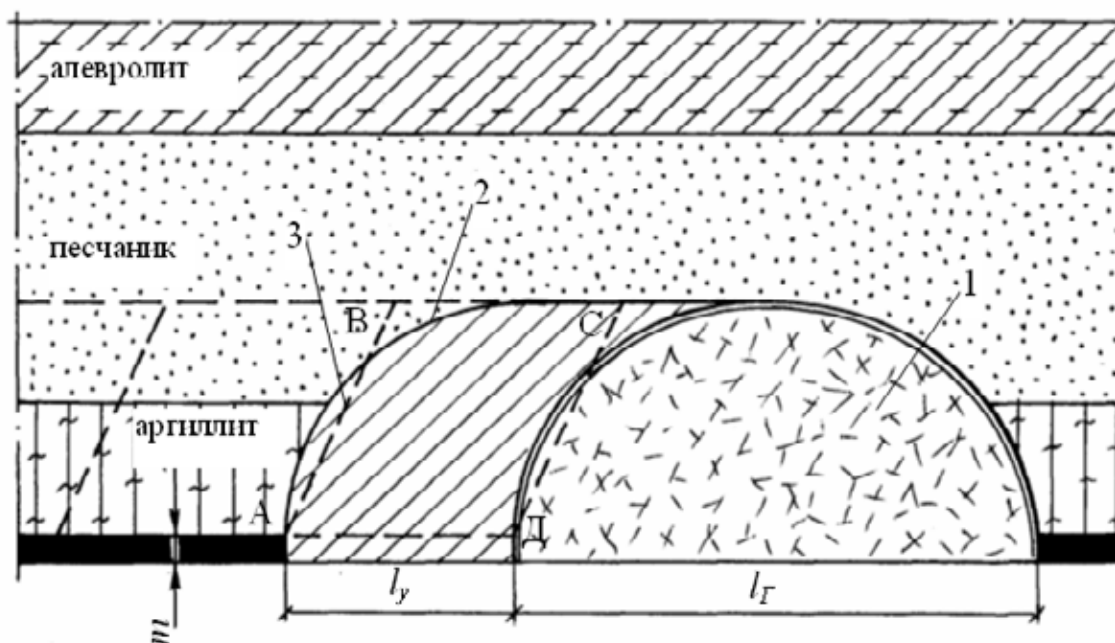


Рис. 6 – График зависимости угла наклона боковых линий аппроксимированной параболы свода обрушения кровли к горизонту от коэффициента крепости пород по М.М. Протодяконову: $\alpha=f$

В кровле формируется блок вторичного обрушения серповидной формы (рис. 7).



1 – разрыхленные породы при первичном (генеральном обрушении); 2 – граница серповидного блока при установившемся обрушении пород кровли; 3 – граница ромбовидной фигуры аппроксимации блока обрушения в породах кровли

Рис. 7 – Формирование блока в породах кровли при вторичном (установившемся) обрушении

С небольшой погрешностью его можно аппроксимировать фигурой в виде ромба. Тогда интегральный критерий прочности для установления обрушения будет иметь вид:

$$a = \frac{10R_c k_c^p h \sin \alpha}{\gamma h - 10R_c k_c^p} \quad (11)$$

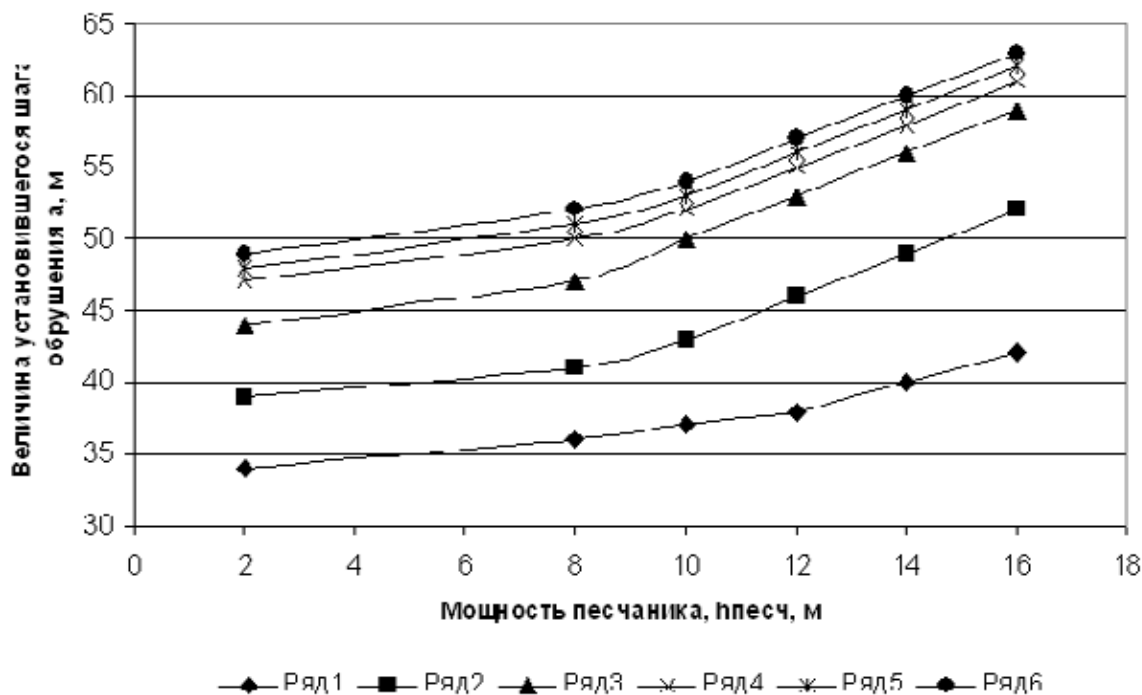
При компьютерном моделировании процесса вторичного обрушения в кровле отчетливо просматривается область обрушения. Смыкание области, внутри которой выполняется точечное условие прочности (2), определенное в соответствии с зависимостью (11), служит признаком потери равновесия, т.е. вторичного обрушения пород кровли.

При компьютерном моделировании варьировались следующие параметры: мощность песчаника – $h_{песч}$, мощность непосредственной кровли – $h_{арг}$, длина лавы – L . Мощность угольного пласта принята постоянной ($h_{уг} = 2,24$ м), поскольку установить влияние этой величины на шаг обрушения не удалось.

На рис. 8 показаны графики зависимости величины установившегося шага обрушения a от мощности залегающего в кровле слоя песчаника при различной мощности непосредственной кровли и длины лавы $L = 175$ м.

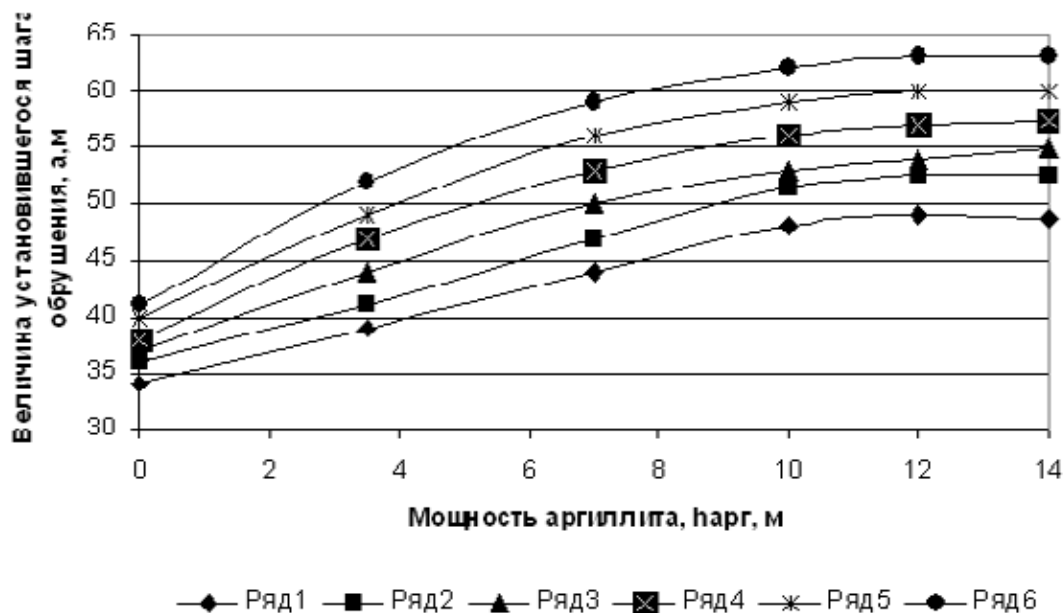
Величина шага обрушения изменяется от 35 до 65 м, увеличиваясь по мере удаления песчаника от кровли пласта. При мощности пород непосредственной кровли, превышающей 14-16 м, влияние песчаника на шаг обрушения несущественно. Это особенно хорошо видно на рис. 9, отражающем зависимость вели-

чины шага обрушения от мощности пород непосредственной кровли при длине лавы $L=175$ м.



ряд 1 – $h_{арг}=0$ м; ряд 2 – $h_{арг}=3,5$ м; ряд 3 – $h_{арг}=7$ м; ряд 4 – $h_{арг}=10$ м;
ряд 5 – $h_{арг}=12$ м; ряд 6 – $h_{арг}=14$ м

Рис. 8 – График зависимости величины установившегося шага обрушения кровли угольного пласта от мощности основной кровли, при $L=175$ м



ряд 1 – $h_{несч}=2$ м; ряд 2 – $h_{несч}=8$ м; ряд 3 – $h_{несч}=10$ м; ряд 4 – $h_{несч}=12$ м;
ряд 5 – $h_{несч}=14$ м; ряд 6 – $h_{несч}=16$ м

Рис. 9 – График зависимости величины установившегося шага обрушения кровли угольного пласта от мощности непосредственной кровли, при $L=175$ м

Длина лавы также оказывает влияние на величину шага обрушения. Из рис. 10 следует, что при изменении длины лавы от 125 до 250 м, т.е. в два раза, шаг обрушения при постоянной мощности пород непосредственной кровли ($h_{арг}=3,5$ м) уменьшается, примерно, на 20-25 %.

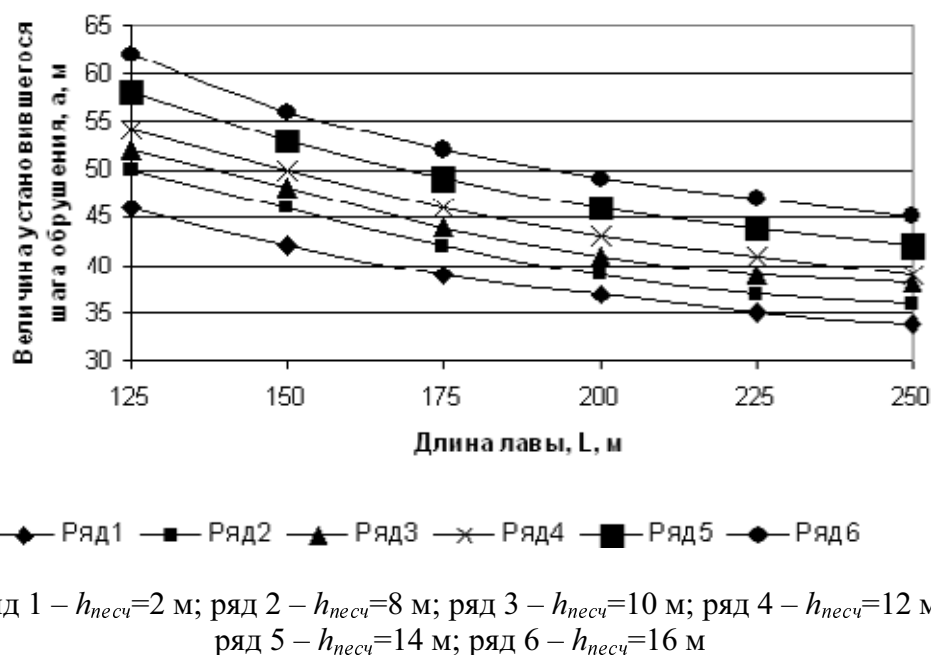


Рис. 10 – Графики зависимости величины установившегося шага обрушения кровли угольного пласта от длины лавы, при $h_{арг}=3,5$ м

Обработка данных компьютерного моделирования позволила установить общую зависимость величины шага обрушения – a от переменных параметров – $h_{несч}$, $h_{арг}$, L . Эта зависимость имеет следующий нелинейный вид.

$$a = \left(0,9h_{несч} \frac{2h_{арг}^2 + 1}{h_{арг}^2 + 1} + 30 \frac{1,5h_{арг}^2 + 1}{(h_{арг}^2 + 1)^2} \right) \frac{150 + L}{2L} \quad (12)$$

Выводы.

1. Потеря устойчивости пород кровли, как структурного элемента геомеханической системы «лава-породный массив», происходит в том случае, когда точечный критерий прочности реализуется во всех точках пород кровли ограниченных кривой свода естественного равновесия размеры, форма которой определяется интегральным критерием прочности, что позволяет установить закономерности обрушения пород кровли для различных горно-геологических условий.

2. Получены зависимости (6) и (12) для определения величины генерального и установившегося обрушения для конкретных горно-геологических условий, которые позволяет варьировать основными параметрами, влияющими на шаг обрушения: мощность основной и непосредственной кровли, а также длина лавы.

3. Наличие мощного слоя крепких монолитных пород типа песчаника в кровле угольного пласта оказывает влияние на шаг установившегося обруше-

ния, если мощность пород непосредственной кровли не превышает 16 м.

4. Увеличение длины лавы в два раза в одних и тех же горно-геологических условиях приводит к уменьшению шага установившегося обрушения на 20-25 %.

5. Зависимости величины шага генерального и установившегося обрушения (6) и (12) имеют нелинейный вид и с точностью $\pm 15\%$ подтверждается результатами натурных измерений и компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика горных пород: Учеб. пособие/А.Н. Шашенко. – Днепропетровск: НГАУ, 2002. – 302 с.
2. Шашенко А.Н., Хозяйкина Н.В. Закономерности изменения предельного состояния в сложноструктурной кровле угольного пласта при установившемся обрушении / Наукowo-технічний журнал НГУ, Дніпропетровськ, "Науковий вісник", № 4, 2004. – С. 49-52.
3. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Хозяйкина Н.В. О критериях прочности при оценке устойчивости пород кровли в лавах / Научно-технический сборник Криворожского технического университета, «Разработка рудных месторождений», выпуск № 88, 2005. – С. 49-52.
4. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Приходько В.В., Мороз И.Т. – Днепропетровск: изд-во «Наука и образование», 1997. – 180 с.
5. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.:Недра, 1975. – 279 с.
6. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. Методы теории вероятностей в геомеханике. – К: Техника, 1994. – 209 с.
7. Шашенко А.Н., Хозяйкина Н.В. Интегральный критерий генерального обрушения сложноструктурной кровли при отработке пологозалегающих угольных пластов. – Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науковowo-технічний журнал гірничого профілю/Донецьк:ДонНТУ - 2004 вип. 1. – С. 127-130.
8. Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. - М.: Недра, 1964. – 278 с.
9. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Універ. вид-во "Пульсари", 2002. – 304 с.

УДК 552.48:622.031.52]004.14

И.Ю. Петрусенко

ОСВОЕНИЕ ЗАЛЕЖЕЙ АМФИБОЛИТОВОГО СЫРЬЯ В КРИВБАССЕ

Показана доцільність попутного добування і одержання продукції з амфіболітової сировини розкривних порід Інгuleцького залізорудного родовища.

AMPHIBOLITES RAW MATERIAL DEPOSITS DEVELOPMENT IN KRIVBAS

Sense of simultaneous quarrying and products obtaining from amphibolites raw material of overburden rocks in Ingulets iron ore deposit is proved.

Одним из основных путей снижения себестоимости железорудной продукции является вовлечение в переработку сопутствующих полезных ископаемых [1].

В составе вскрышных пород железорудных месторождений Криворожского бассейна присутствуют амфиболиты, которые принадлежат новокриворожской свите. В настоящее время эти породы свозятся в отвал или, в лучшем случае, используются в качестве щебня для нужд горно-обогатительных комбинатов. Вместе с тем амфиболиты являются ценным видом минерального сырья, дефицитного для промышленности Украины и одной из целей решения этой проблемы является их экономически целесообразное попутное извлечение и переработка.