

УДК 622.831.24

Н.И. Лобков¹, А.И. Сергиенко¹, Е.Н. Халимендигов²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРУШЕНИЯ ТРУДНОУПРАВЛЯЕМОЙ КРОВЛИ В ЛАВАХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ ДОНБАССА

¹Институт физики горных процессов НАН Украины

²ОАО «Угольная компания «Шахта «Красноармейская-Западная № 1»

На підставі досліджень, приведено розробку алгоритму розрахунку параметрів обвалення важкокерованої покрівлі.

Ключові слова: очисний вибій, важкообвалююча покрівля, параметри обвалення, алгоритм розрахунку, граничний прогін, характер обвалення

N.I. Lobkov, A.I. Sergienko, E.N. Halimendikov

UNHANDY ROOF FALL PARAMETERS IN FLAT SEAMS OF DONETSK BASING

Computational procedure for determination of unhandy roof fall parameters was developed.

Keywords: longwall, unhandy roof, computational procedure, roof fall

По мере выемки угля происходит сдвигение породных слоев над выработанным пространством лав, приводящее к разрушению пород в зоне опорного давления. В зависимости от вида разрушающих напряжений кровля обрушается в призабойном пространстве мелкими фракциями или крупными блоками и относится к трудноуправляемой [1]. Высыпание пород в призабойное пространство и сдвигение блоков приводят к аварийным остановкам очистного забоя, потерям добычи угля, снижению безопасности работ. Затраты на ликвидацию аварийных ситуаций повышают себестоимость угля.

Анализ потерь рабочего времени, по данным диспетчерских служб шахт Донбасса, показал, что зафиксировано до 60% остановок лав из-за обрушения кровли. Одна из основных причин подобных явлений – отсутствие надежного метода определения параметров обрушения кровли в очистных забоях. Поэтому целью данной работы является установление параметров обрушения трудноуправляемой кровли в лавах пологих пластов Донбасса.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести исследования проявлений горного давления и характера обрушения пород при первичной посадке кровли;
- 2) на моделях из эквивалентных материалов изучить характер взаимодействия породных слоев кровли над выработанным пространством;
- 3) исследовать механизм формирования разрушающих напряжений при прогибе слоев;
- 4) разработать обобщенный метод расчета прогиба слоев над выработанным пространством и определить параметры обрушения пород в призабойном пространстве.

Инструментальные наблюдения проводили на добычных участках шахты «Красноармейская-Западная №1». Для примера приведены наблюдения за изменением высоты подготовительных выработок добычного участка №1 (6-я южная лава блока 6, пласт d_4). В табл. 1 представлены характеристики пород кровли пласта d_4 на данном участке шахтного поля.

Таблица 1

Характеристики пород кровли пласта d_4 по скважине №3951

Глубина залегания, м	Мощность, м	Наименование пород
664,50	2,40	Угольный пласт d_4
662,10	4,10	Песчаник
658,00	0,20	Угольный пласт d_4^0
657,80	11,20	Песчаник
646,60	0,40	Угольный пласт d_4^1
646,20	21,80	Песчаник
624,40	14,40	Сланец песчаный (кучерявчик)

В подготовительных выработках периодически по мере отхода лавы впереди очистного забоя через определенное расстояние проводили замеры высоты штрека. Увеличение вертикальной деформации выработок наблюдается при отходе лавы от разрезной печи до 120 м. В этот момент отмечалась посадка основной кровли, сопровождавшаяся обрушением пород крупными блоками в выработанном пространстве. При дальнейшем подвигании очистного забоя величина смещений кровли выработок уменьшилась, при удалении лавы от разрезной печи на 130 м наблюдался рост вертикальных деформаций (рис. 1).

На рис. 2 показаны изменения высоты подготовительной выработки на трех замерных станциях. По мере подхода лавы к замерной станции наблюдается увеличение вертикального смещения выработки, обусловленное опусканием пород кровли пласта. Пологие участки кривых говорят об уменьшении горного давления из-за обрушения пород.

Проведенные натурные наблюдения позволяют предположить, что на деформацию подготовительных выработок и на обрушение кровли в очистных забоях существенное влияние оказывает сдвигание породных слоев над выработанным пространством.

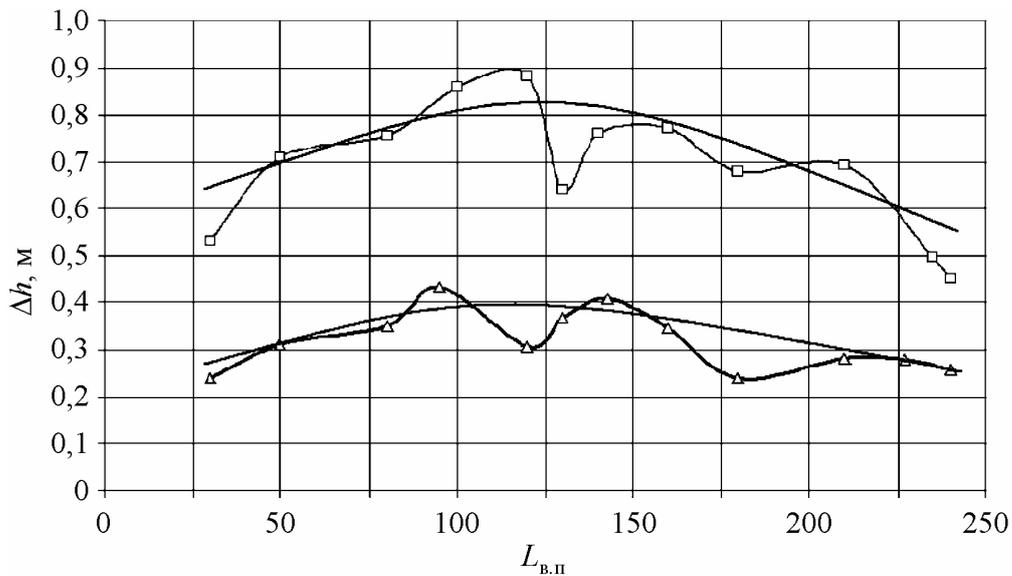


Рис. 1. Изменение вертикальной деформации Δh подготовительных выработок в зоне сопряжения с очистным забоем участка №1 при увеличении выработанного пространства $L_{в.п.}$: — — характер изменения высоты штреков; \square и \triangle — фактические изменения высоты соответственно вентиляционного и конвейерного штреков

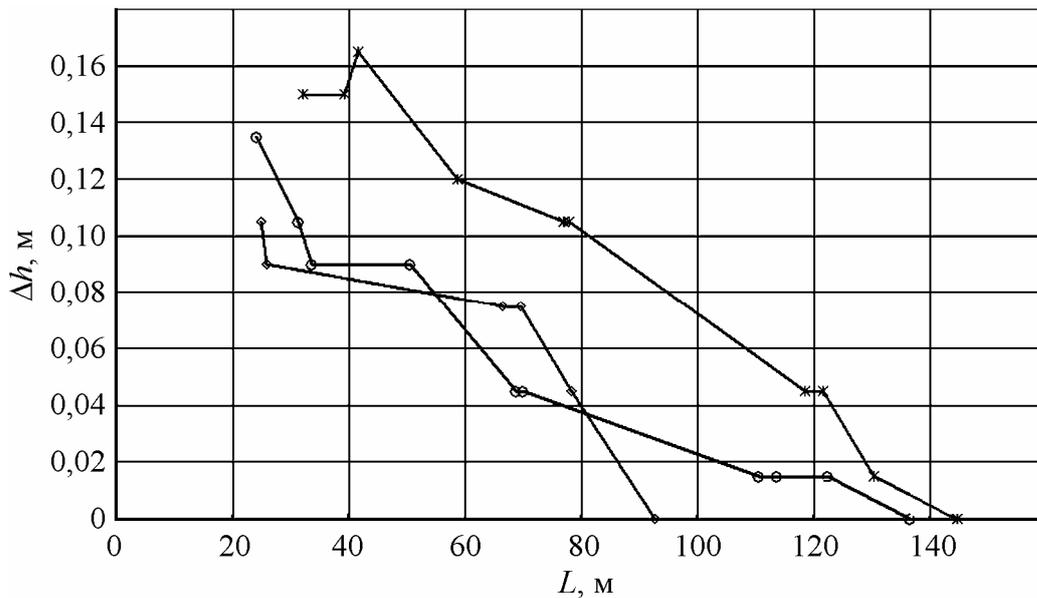


Рис. 2. Изменение высоты конвейерного штрека Δh при подходе очистного забоя L : \ominus , \odot , \ast — кривые замеров на станциях соответственно 1, 2, 3

Характер поведения породных слоев в процессе выемки угольного пласта представляется возможным исследовать на моделях из эквивалентных материалов. Для моделирования принят участок шахтного поля шахты «Красноармейская-Западная №1», разрабатывающей пласт d_4 . Строение породного массива определено по скважине №3951. Масштаб моделирования 1:300.

В качестве исходных материалов для модели применяли кварцевый песок, молотую слюду. Связующим хрупким материалом служила канифоль.

Выемку лавы производили заходкой по 4 см. После выемки каждой заходки фотографировали модель и снимали показания датчиков давления [2], фиксирующих изменение контактного давления между слоями.

Общий вид модели №1 приведен на рис. 3,а. Выемка заходок с интервалом 40–60 мин (время «опроса» датчиков давления) соответствовала продвижению лавы в центральной её части со средней скоростью не более 2,0–3,0 м/сут.

Наблюдения за сдвижением породных слоев на моделях из эквивалентных материалов показали, что по мере отхода очистного забоя от разрезной печи слои изгибаются в восходящем порядке от пласта к поверхности. Обрушение слоев произошло в течение короткого времени. Первым обрушился слой основной кровли, затем с небольшой задержкой – вышележащие слои, образуя зону сдвижения над выработанным пространством (рис. 3,б). Зона сдвижения пород ограничивается линиями обрушения и изгиба слоев, проведенными соответственно под углами обрушения $\psi = 75\text{--}78^\circ$ и изгиба $\phi = 45\text{--}46^\circ$ пород к плоскости залегания пласта.



Рис. 3. Состояние модели до обрушения кровли (а) и после посадки кровли (б)

Прогибаясь, слои формируют повышенные напряжения на краевую часть пласта (рис. 4). Волнообразное изменение давления на краевую часть пласта перед первичной посадкой кровли служит подтверждением упругого деформирования слоев перед обрушением. Поочередное обрушение породных слоев дает основание считать вмещающий массив дискретным, состоящим из отдельных слоев. Каждый отдельный слой до хрупкого разрушения деформируется упруго и представляет собой сплошную изотропную среду. В области сдвижения слои могут делиться на группы. Каждая группа состоит из несущего прочного слоя и залегающих выше более слабых слоев, обрушающихся ранее несущего.

Отслаиваясь друг от друга и прогибаясь над выработанным пространством, по мере отхода лавы от разрезной печи породные слои или группы слоев кровли ведут себя, как толстые и тонкие плиты. Часто обрушение породных слоев происходит на границе этих плит. Поэтому, учитывая результаты

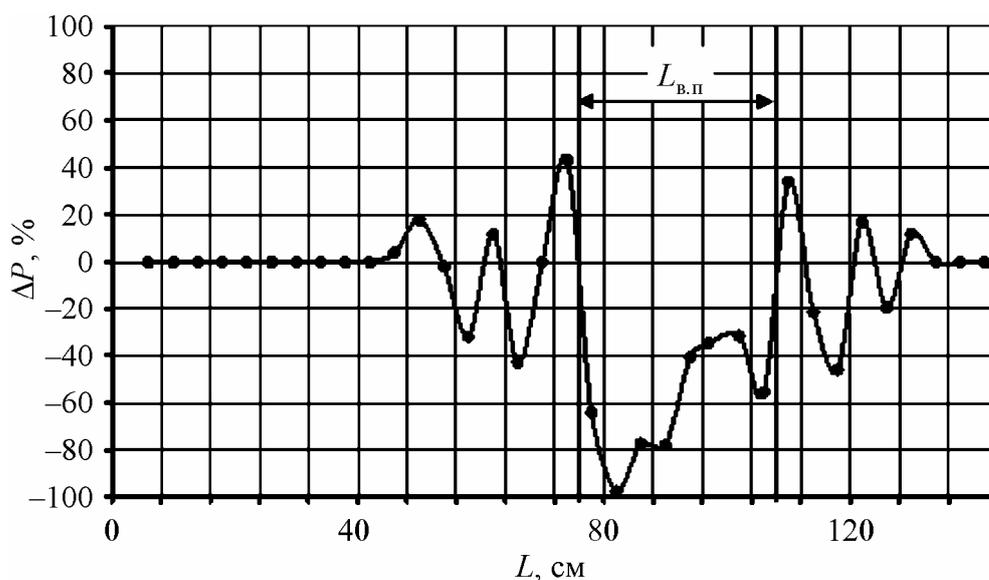


Рис. 4. Изменение давления ΔP на краевую часть пласта перед первичной посадкой кровли (L – длина выемочного поля лавы)

приведенных выше исследований, прогиб породных слоев над выработанным пространством можно рассчитывать как прогиб упругих толстых и тонких плит. Зная параметры области сдвижения пород можем определить величину опорного давления как сумму давлений на опору отдельных слоев или групп слоев, входящих в область [3].

Известные аналитические методы расчета прогибов толстых и тонких плит [4] требуют значительных затрат времени (порядка одного месяца непрерывной работы компьютера). Это препятствует созданию метода оперативного прогноза проявлений горного давления при ведении очистных работ. Для разработки расчетного метода определения параметров обрушения трудноуправляемых кровель необходимо создать упрощенный метод расчета прогиба породных слоев над очистным забоем.

Известно, что над выработанным пространством кровля ведет себя, как плита, жестко защемленная с четырех, трех и двух сторон (рис. 5).

Используя математический аппарат расчета толстой, сплошной, упругой, изотропной плиты размером 200×200 м, определяли ее прогибы. Длину одной стороны изменяли от 20 до 200 м с шагом 20 м. Изменение толщины плиты производили в интервале 5, 10, 20, 30, 40 м. В зависимости от отношения толщины плиты к меньшей стороне считали прогиб толстых и тонких плит. Значения максимального прогиба и напряжений, создаваемых в плите от изгиба, заносили в таблицы. Для примера в табл. 2 приведены результаты расчетов прогибов плит при $h = 5$ и 30 м. Исходя из полученных результатов максимальных напряжений, можно записать соотношения горизонтальных и вертикальных напряжений для защемленной с четырех сторон плиты (см. табл. 2) в виде выражений:

$$\sigma_z^n = (\sigma_x^n + \sigma_y^n) / 4, \text{ МПа}; \quad \sigma_z^n = (\sigma_x^n + \sigma_y^n) / 3,8, \text{ МПа}. \quad (1)$$

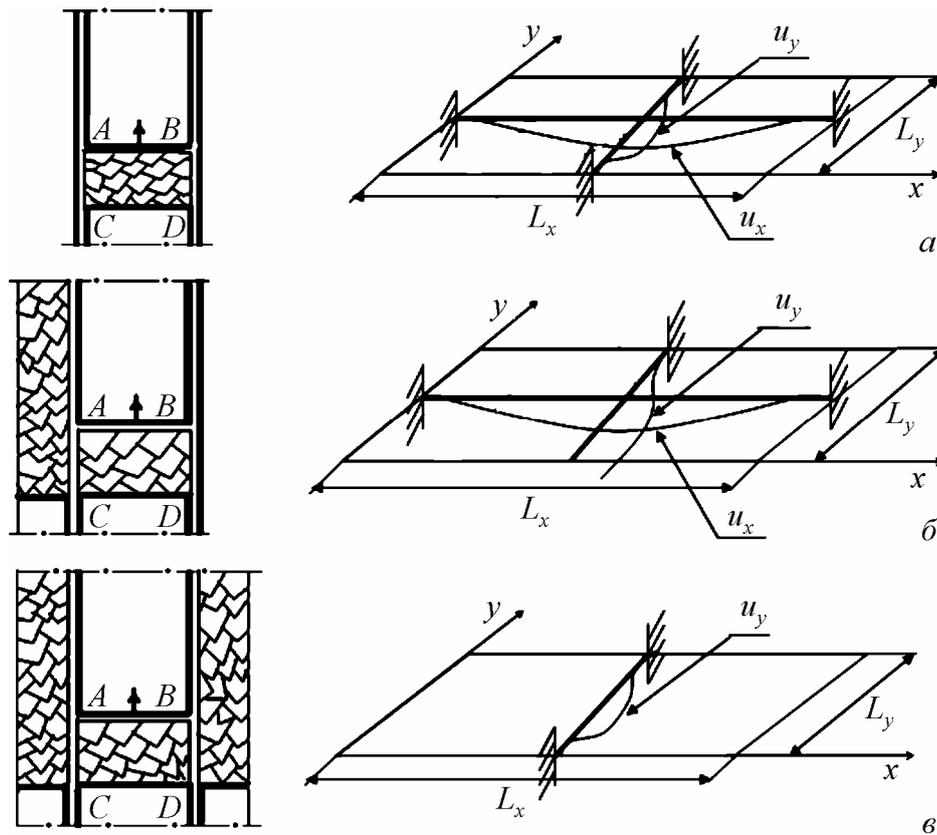


Рис. 5. Виды защемления кровли над выработанным пространством: а – с четырех сторон, б – с трех сторон при свободной одной стороне, в – с двух сторон при свободных двух сторонах; L_x, L_y – размеры сторон плиты, u_x, u_y – смещения балок

Таблица 2

Значения прогибов плит при различных размерах одной из сторон

$L_x, \text{ м}$	Максимальный прогиб плиты $w, \text{ м}$		Напряжения в плите, МПа					
			σ_x^n		σ_y^n		σ_z^n	
	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
10	$0,225 \cdot 10^{-4}$	$0,175 \cdot 10^{-4}$	0,47	0,147	0,31	0,157	0,20	0,675
20	$0,157 \cdot 10^{-3}$	$0,717 \cdot 10^{-4}$	1,54	0,587	0,99	0,379	0,66	0,248
40	0,0017	$0,313 \cdot 10^{-3}$	4,37	1,71	2,87	1,15	1,84	0,722
60	0,0078	$0,821 \cdot 10^{-3}$	9,65	3,25	6,41	2,15	4,08	1,36
80	0,0238	0,0017	17,1	5,18	11,5	3,40	7,33	2,13
100	0,0556	0,0032	26,1	7,36	17,8	4,95	11,3	2,96
120	0,1064	0,0032	36,0	8,96	25,8	6,39	15,6	3,75
140	0,1756	0,0051	45,5	10,9	35,1	8,36	19,7	4,55
160	0,2582	0,0076	53,6	12,6	45,0	10,6	23,2	5,07
180	0,3475	0,0105	60,2	12,7	55,1	11,7	25,8	5,38
200	0,4367	0,0134	64,5	13,6	64,6	13,6	28,1	5,75

Примечание: $h_1 = 5 \text{ м}$, $h_2 = 30 \text{ м}$; σ_x^n , σ_y^n , σ_z^n – максимальные напряжения, создаваемые в плите соответственно по осям x, y, z .

Анализ результатов расчета позволил установить, что максимальный прогиб плиты может быть определен как среднегеометрический максимальный прогиб двух взаимовлияющих балок единичной ширины с учетом корректирующего коэффициента прогиба плиты k_w из выражения

$$w = k_w \sqrt{u_x u_y}, \quad (2)$$

здесь k_w – функция от двух переменных, которую необходимо установить, $k_w = F(L_x/L_y, h)$ (L_x/L_y – отношение сторон плиты ($L_x \leq L_y$), м); u_x, u_y – максимальные прогибы балки единичной ширины, защемленной с двух сторон и расположенной параллельно осям x и y [3]:

$$u_x = \frac{qL_x^4}{384EJ}, \quad u_y = \frac{qL_y^4}{384EJ}, \quad (3)$$

где q – распределенная нагрузка, равная весу единичной длины балки, $q = \gamma ha$, Н/м (γ – объемный вес пород, Н/м³; $a = 1$ м – ширина единичной балки); $J = bh^3/12(1 - \mu^2)$ – момент инерции сечения балки, м² (μ – коэффициент Пуассона).

Для определения максимальных горизонтальных напряжений при прогибе плиты необходимы корректирующие коэффициенты k_x и k_y :

$$\sigma_x^n = k_x \sigma_x^b, \quad (4)$$

$$\sigma_y^n = k_y \sigma_y^b, \quad (5)$$

где σ_x^b, σ_y^b – максимальные горизонтальные напряжения, создаваемые в балках единичной ширины, расположенных параллельно осям x и y соответственно:

$$\sigma_x^b = \frac{M_x h}{2J}, \quad \sigma_y^b = \frac{M_y h}{2J}. \quad (6)$$

Из выражений (2), (4), (5) находим корректирующие коэффициенты при максимальных прогибе и напряжениях балок:

$$k_w = \frac{w}{\sqrt{u_x u_y}}, \quad k_x = \frac{\sigma_x^n}{\sigma_x^b}, \quad k_y = \frac{\sigma_y^n}{\sigma_y^b}. \quad (7)$$

Определение корректирующих коэффициентов для заданных параметров плит [4] позволяет создать алгоритм расчета прогибов тонких и толстых плит с помощью двух взаимозаменяемых балок (табл. 3).

Среднестатистический процент ошибки расчета прогиба плиты по предложенному алгоритму в сравнении с расчетом толстой плиты не превышает 10%. При расчете изгиба слоя и напряжений в нем по разработанному методу получаем картину, представленную на рис. 6.

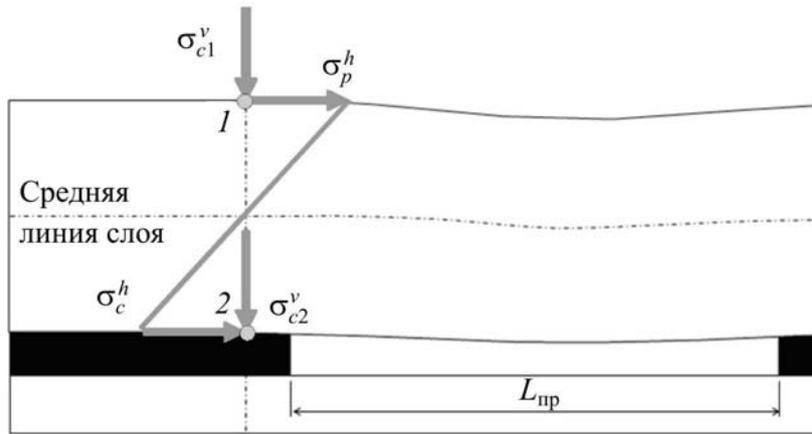


Рис. 6. Схема распределения напряжений в заделке слоя при его изгибе

Таблица 3

Алгоритм расчета прогибов тонких и толстых плит с помощью двух взаимозаменяемых балок

Параметры	Плита, жестко защемленная	
	с 4 сторон	с 3 сторон и одна сторона свободна
Максимальный прогиб плиты, м	$w = k_w \sqrt{u_x u_y}$	
Корректирующий коэффициент	$k_w = a_1 + a_2(L_x / L_y) + a_3(L_x / L_y)^2 + a_4(L_x / L_y)^3$	
Коэффициенты полинома a_1, a_2, a_3, a_4	$a_1 = 2 \cdot 10^{-8} h^4 - 8 \cdot 10^{-7} h^3 + 4 \cdot 10^{-4} h^2 - 1.9 \cdot 10^{-3} h,$ $a_2 = 0.0041 \cdot h - 0.2366,$ $a_3 = -0.0126 \cdot h + 2.1069,$ $a_4 = 0.0033 \cdot h - 1.3571$	$a_1 = 4 \cdot 10^{-5} h^2 + 7 \cdot 10^{-5} h,$ $a_2 = 9 \cdot 10^{-4} h - 9.9 \cdot 10^{-3},$ $a_3 = -2 \cdot 10^{-5} h^2 - 10^{-4} h + 0.17,$ $a_4 = 5 \cdot 10^{-4} h - 0.006$
Максимальные горизонтальные напряжения по оси x	$\sigma_x = k_x \frac{q L_x^2 (1 - \mu^2)}{2 h^2}$	
Корректирующие коэффициенты при определении горизонтальных напряжений по оси x	$k_x = a_x (L_x / L_y)^{b_x},$ $a_x = 0.009 \cdot h + 0.8327,$ $b_x = -0.0103 \cdot h - 0.2602$	$k_x = a_x (L_x / L_y)^{b_x},$ $a_x = 0.0136 \cdot h + 1.102,$ $b_x = -0.0046 \cdot h - 0.165$
Максимальные горизонтальные напряжения по оси y	$\sigma_y = k_y \frac{q L_y^2 (1 - \mu^2)}{2 h^2}$	
Корректирующие коэффициенты при определении горизонтальных напряжений по оси y	$k_x = a_x (L_x / L_y)^{b_x},$ $a_y = 0.0067 \cdot h + 0.6897,$ $b_y = -0.0122 \cdot h + 1.865$	$k_x = a_x (L_x / L_y)^{b_x},$ $a_y = 0.0007 \cdot h + 0.1183,$ $b_y = -0.01 \cdot h + 1.879$
Максимальные вертикальные напряжения по оси z	$\sigma_z = (\sigma_x + \sigma_y) / 4$	$\sigma_z = (\sigma_x + \sigma_y) / 3,8$

В точке 1 происходят сжатие пород от давления вышележащих слоев σ_{c1}^v и растяжение σ_p^h от изгиба самого слоя; в точке 2 – сжатие пород от давления вышележащих слоев на опору, создаваемого при изгибе слоя σ_{c2}^v , а также от изгиба самого слоя σ_c^h .

Вертикальные напряжения для точек 1 и 2 определяются из выражений:

$$\sigma_p^h = |\sigma_c^h| = \sigma_x, \quad \sigma_{c1}^v = \gamma H + P_{op}^{v.s.}, \quad \sigma_{c2}^v = \sigma_{c1}^v + P_{op}^s, \quad (8)$$

где $P_{op}^{v.s.}$ и P_{op}^s – опорное давление соответственно от вышележащих слоев и от изгиба слоя, Па;

$$P_{op}^{v.s.} = \sum_{i=1}^n P_{op}^i,$$

P_{op}^i – давление от вышележащего i -го слоя, участвующего в сдвигении, Па.

Рассматривая элементарный объем породы в точках 1 и 2 (рис. 7) можно сделать вывод, что разрушающими напряжениями на них будут σ_{c1}^v , σ_{p2}^h , σ_{c2}^v .

Величина σ_{c3}^v , равная величине естественного поля напряжений, будет оказывать слабое влияние на разрушение пород. Поэтому для описания предельного состояния пород принимаем критерий прочности Кулона – Мора.

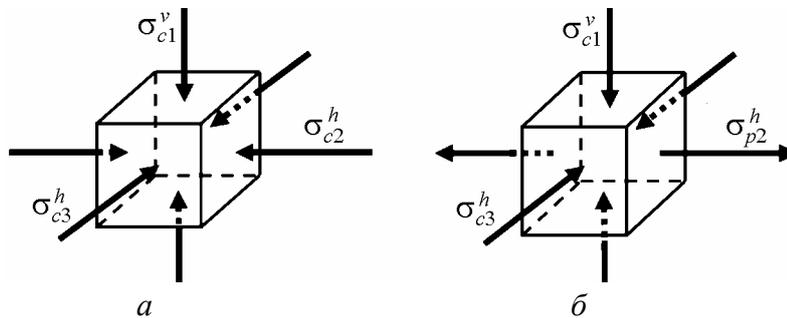


Рис.7. Распределение напряжений в элементарных объемах точек 1 (а) и 2 (б)

Для точки 1 (рис. 7,а) критическое напряжение по одной оси является растягивающим, поэтому сумма напряжений состоит из горизонтальных напряжений, которые получаем из выражения

$$\sigma_p^v + \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \sigma_c^v \leq [\sigma_p]. \quad (9)$$

В точке 2 (рис. 7,б) действующие напряжения по обеим осям – сжимающие, в этом случае имеем равнобедренный прямоугольный треугольник, где катеты представляют собой предельно допустимые напряжения на сжатие. Критерий для двустороннего сжатия получаем из выражения

$$\sigma_c^h + \sigma_c^v \leq [\sigma_c]. \quad (10)$$

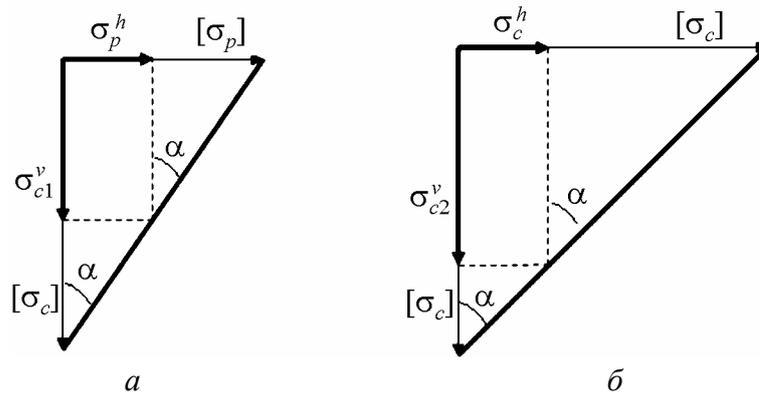


Рис. 8. Критерии предельного состояния для точек 1 (а) и 2 (б)

Подставляя в уравнения критерия (9) и (10) значения действующих напряжений, получим два выражения для определения предельного пролета кровли. Механизм разрушения слоя основывается на деформациях отрыва для точки 1 и деформациях сдвига для точки 2:

$$L_{pr}^1 = \exp \left(\frac{\ln \left(2h^2 [\sigma_p] \frac{[\sigma_c - \gamma H]}{a_x q L_z^2 [\sigma_c] (1 - \mu^2)} \right)}{2 + b_x} \right) L_z, \text{ м}, \quad (11)$$

$$L_{pr}^2 = \sqrt{\frac{4h^2}{5(1 - \mu^2)v_x} \left[\frac{h^2}{5(1 - \mu^2)v_x} + \frac{2(\sigma_c - \gamma H)}{q} \right] - \frac{v_y L_z^2}{5v_x} - \frac{2h^2}{5(1 - \mu^2)v_x}}, \text{ м}, \quad (12)$$

где v_x и v_y – корректирующие коэффициенты для напряжений соответственно по осям x и y : $v_x = -0.0008h^2 + 0.029h + 1.5$; $v_y = 0.0004h^2 + 0.002h - 0.021$; q – распределенная нагрузка, действующая на слой кровли, $q = \gamma(h + h_n)$, Н/м^2 ; σ_c – предельно допустимые сжимающие напряжения в слое, МПа ; γ – объемный вес породы в слое, Н/м^3 ; H – глубина ведения очистных работ, м ; L_z – длина лавы, м ; μ – коэффициент Пуассона.

Характер разрушения слоя в точках 1 и 2 можно представить следующими выражениями:

$$R_1 = \frac{\sigma_p^h}{[\sigma_p]} + \frac{\sigma_c^v}{[\sigma_c]}, \quad R_2 = \frac{\sigma_c^h + \sigma_c^v}{[\sigma_c]}. \quad (13)$$

Условия состояния породного слоя:

$R_1 < 1$, $R_2 \leq 1$ – устойчивое состояние;

$R_1 > 1$, $R_2 \leq 1$ – обрушение крупными блоками;

$R_1 \leq 1, R_2 > 1$ – обрушение мелкими фракциями;

$R_1 > 1, R_2 > 1$ – комбинированное обрушение.

Выводы

1. Предлагаемый метод позволяет считать прогиб кровли как толстых, так и тонких плит с учетом механизма взаимодействия слоев.

2. Получены формулы для определения шага первичной посадки кровли в зависимости от разрушающих напряжений и длины лавы. Слабые породы кровли разрушаются под действием касательных напряжений и обрушаются в виде мелких фракций. Крепкие породы разрушаются от растягивающих напряжений и обрушаются в виде крупных блоков.

3. Предложенная методика позволяет определять параметры обрушения трудноуправляемой кровли с погрешностью не более 10%.

1. Глушихин Ф.П. Трудноуправляемые кровли в очистных забоях. – М.: Недра, 1974. – 192 с.
2. Лобков Н.И., Казакова Е.И., Русанов В.Н., Григоренко С.В. Исследования изменения опорного давления // В сб.: Ученые – возрождению Донбасса: Материалы докладов науч.-техн. конф. – Донецк, апрель, 1996, СПЕК. – С. 5–61.
3. Лобков Н.И. К вопросу о механизме формирования горного давления в лавах пологих пластов // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 6 – 2003. – С. 81–87.
4. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. – К.: Наук. думка, 1972. – 506 с.
5. Лобков Н.И., Сергиенко А.И., Сергиенко Л.В., Куцербов В.М., Халимендигов Е.Н. Определение разрушающих напряжений от прогиба слоев над выработанным пространством // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / НАН Украины, Институт физики горных процессов. – Вып. 10. – 2007. – С. 119–127.

Статья поступила в редакцию 14 августа 2008 года