

**В.В. КАРПЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, [agapita@inbox.ru](mailto:agapita@inbox.ru)  
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

**V.V. KARPENKO**, PhD in eng. sc., associate professor, [agapita@inbox.ru](mailto:agapita@inbox.ru)  
Saint-Peterburg State Mining Institute (Technical University)

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗОН, ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ПО НАКОПЛЕНИЮ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЛОИСТОЙ КРОВЛЕ ВЫРАБОТОК, ПРИ СОВМЕШНОМ ДЕЙСТВИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЗРЫВНЫХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

Рассматривается трансформация зон, потенциально опасных по накоплению повреждений, в слоистой кровле системы горных выработок при совместном действии геостатического давления и взрывных волн напряжений. Предполагается, что фронт взрывной волны параллелен границам раздела сред непосредственной кровли. При таком допущении рассматривается влияние уровня критических напряжений и глубины расположения выработки на изменение формы зон, потенциально опасных по накоплению повреждений в слоях непосредственной кровли.

**Ключевые слова:** системы выработок, целик, взрывные волны, напряжения, повреждение.

## THE TRANSFORMATION OF ZONE OF POTENTIALLY DANGEROUS ACCUMULATIVE WRECKS IN A LAYEKED MINING ROOF WHEN COMBINED EFFECT OF THE ROCK PRESSURE AND SHOCK STRESS WAVES

The transformation of potentially dangerous zone of wrecks accumulation in the layered roof of the mining system is considered, in the time of combined action of geostatic pressure and tension shock wave. The explosion wave front is suggested to be parallel to the proximate hanging roof environs discontinuity. Under this condition in the article is considered the influence of levels of critical stress and the depth of opening location on the change of implicitly dangerous zone of faults accumulation in the layers of the roof stone.

**Key words:** system of excavations, pillar, explosion waves, stresses, destruction.

При динамическом воздействии в породах слоистой непосредственной кровли системы выработок могут возникать и развиваться пластические деформации, расти трещины, провоцирующие хрупкое разрушение пород и динамические явления, сопровождающие горные удары различной интенсивности. Для оценки возможных размеров зон разрушения, возникающих в слоистой кровле,

рассмотрим рудную залежь мощностью 500-1000 м. Механические свойства пород основной кровли и почвы приведены в таблице. Осреднение кинематических и упругих параметров непосредственной кровли позволило представить ее двумя слоями упругих фиктивных сред мощностью  $h_1 = 2,3$  м и  $h_2 = 1,2$  м, причем более тонкий слой примыкал к потолочине выработок.

**Параметры пород основной и непосредственной кровли и почвы**

Местоположение пород и слоев	Геометрические параметры слоев			Механические свойства пород			
	Начальная координата слоя, м	Конечная координата слоя, м	Мощность слоя, м	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Коэффициент Пуассона $\nu$
Основная кровля	0	496,5	496,5	2700	5870	2820	0,35
Почва	500	522	22	2667	5000	2670	0,30
Непосредственная кровля							
Слой 1	496,5	498,8	2,3	2610	2775	1555	0,271
Слой 2	498,8	500	1,2	2560	2210	1250	0,265

При построении математической модели статического и динамического (от гравитационных сил и взрывных волн напряжений) воздействия на горную выработку примем, что горная порода вокруг выработки является идеально упругой или хрупкой средой, а боковая поверхность выработки может быть аппроксимирована цилиндрической поверхностью произвольного поперечного сечения.

Для описания характерных особенностей напряженного состояния породы вокруг выработки, находящейся под действием статических и динамических воздействий, воспользуемся моделью плоского деформированного состояния массива. Особенности такого состояния могут быть определены в результате решения двух плоских задач теории упругости: статической, в которой определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) невесомого массива с цилиндрической полостью, нагруженного на бесконечности равномерными нормальными напряжениями, действующими в плоскости поперечного сечения выработки, и динамической, где определяется НДС массива с цилиндрической полостью при воздействии на нее плоской продольной волны, фронт которой параллелен образующей выработки.

При отсутствии нарушения сплошности и выполнении условия совместности

деформаций статическая задача об определении напряженного состояния среды состоит в интегрировании системы уравнений\*:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{(c)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(c)}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}^{(c)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(c)}}{\partial y} = 0,$$

дополненных граничными условиями отсутствия напряжений на контуре поперечного сечения полости

$$\sigma_{xx}^{(c)} \cos(n, x) + \sigma_{xy}^{(c)} \cos(n, y) \Big|_{\Gamma} = 0,$$

$$\sigma_{xy}^{(c)} \cos(n, x) + \sigma_{yy}^{(c)} \cos(n, y) \Big|_{\Gamma} = 0$$

и заданными значениями напряжений на бесконечности

$$\sigma_{xx}^{(c)} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2} \rightarrow \infty} \rightarrow -\sigma_0^{(c)},$$

$$\sigma_{yy}^{(c)} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2} \rightarrow \infty} \rightarrow -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_0^{(c)}, \quad \sigma_0^{(c)} = \rho gh,$$

где  $h$  – глубина расположения центра выработки;  $g$  – ускорение свободного падения.

Динамическая задача об определении НДС массива с системой цилиндрических полостей, состоит в определении компонентов динамического тензора напряжений  $\sigma_{xx}^{(1)}$ ,

\* Новожилов В.В. Теория упругости. Л., 1958. 372 с.  
Novozhilov V.V. Theory of elasticity. Leningrad, 1958. 372 p.

$\sigma_{yy}^{(1)}$  и  $\sigma_{xy}^{(1)}$  отраженных и дифракционных волн, которые формируются в массиве в результате натекания плоской волны на выработку. Компоненты тензора  $\sigma_{xx}^{(1)}$ ,  $\sigma_{yy}^{(1)}$ ,  $\sigma_{xy}^{(1)}$  напряжений удовлетворяют условиям динамического равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial y} = \rho U_x^{\bullet\bullet}; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(1)}}{\partial y} = \rho U_y^{\bullet\bullet}.$$

На контуре поперечного сечения полости нормальный и касательный компоненты суммарного тензора напряжений равны нулю:

$$(\sigma_{nn}^{(0)} + \sigma_{nn}^{(1)})|_{\Gamma} = 0; \quad (\sigma_{nt}^{(0)} + \sigma_{nt}^{(1)})|_{\Gamma} = 0.$$

На бесконечности при  $\sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$  компоненты тензора отраженных и дифракционных волн удовлетворяют условиям

$$\sigma_{xx}^{(1)} \rightarrow 0, \quad \sigma_{yy}^{(1)} \rightarrow 0, \quad \sigma_{xy}^{(1)} \rightarrow 0.$$

Начальные условия для них и параметров движения среды в невозмущенной области примем нулевыми.

Компоненты тензора напряжений отраженной и дифракционной волн связаны с компонентами тензора плоской деформации законом Гука.

Алгоритм численного решения упругой динамической задачи основан на ее редукции к конечно-разностному аналогу. Для решения статической задачи использован подход, основанный на переходе от статической задачи к динамической и определении предела компонентов тензора динамических напряжений при  $t \rightarrow \infty$ . В таком случае для решения статической и динамической плоской задачи теории упругости можно использовать универсальный алгоритм.

Расчеты выполнялись для системы выработок высотой 5 м и шириной 4 м, расположенных на глубинах 250, 500 и 750 м. При расчетах величина нормальных

суммарных растягивающих критических напряжений  $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(p)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ , при которой могло происходить накопление повреждений, принималась равной 4-7 МПа. В качестве прямой продольной взрывной волны напряжений принималась волна с амплитудой 11,9 МПа, длительностью фаз сжатия и растяжения 1,2 и 1,25 мс соответственно.

Анализ выполненных расчетов эпюр волн напряжений преломленных слоистой кровлей и отраженных от потолочины выработки, показывает следующее. В приконтурном массиве слоистой кровли выработок, расположенных на глубине 250 м, на расстояниях от потолочины от 0,7 до 2,8 м и протяженностью по горизонтали от вертикальной оси симметрии выработки от 1,2 до 0,8 м формируются зоны растягивающих напряжений (рис.1).

С увеличением глубины размещения выработки в породном массиве до 500-750 м зоны возможных разрушений трансформируются по форме и размерам по ширине (до 0,8 м) и по высоте (до 0,9 м). Уменьшение размеров зон максимальных растягивающих напряжений связано с увеличением горного давления и сопровождается незначительным удалением от потолочины (до 0,9 м). При критическом значении нормальных суммарных растягивающих напряжений  $\sigma_{xx} = 4 \text{ ППа}$  в тонком и толстом слое непосредственной кровли формы зон максимальных величин растягивающих напряжений, в которых может происходить накопление повреждений с увеличением глубины, меняются (рис.2, а). Если принять величину нормальных суммарных растягивающих напряжений в слое мощностью 2,3 м, следующим за слоем, примыкающим к потолочине, равной 7 МПа, то разрушения в нем возникать не будут. Разрушение будет происходить только в тонком слое, причем может распространиться на всю его толщину (рис.2, б).

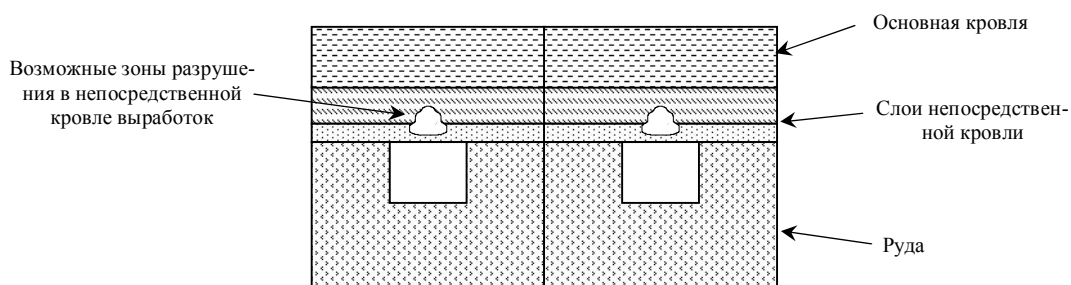


Рис. 1. Схема размещения разрушенных областей в слоистой непосредственной кровле системы расположенных на глубине 250 м прямоугольных в плане выработок

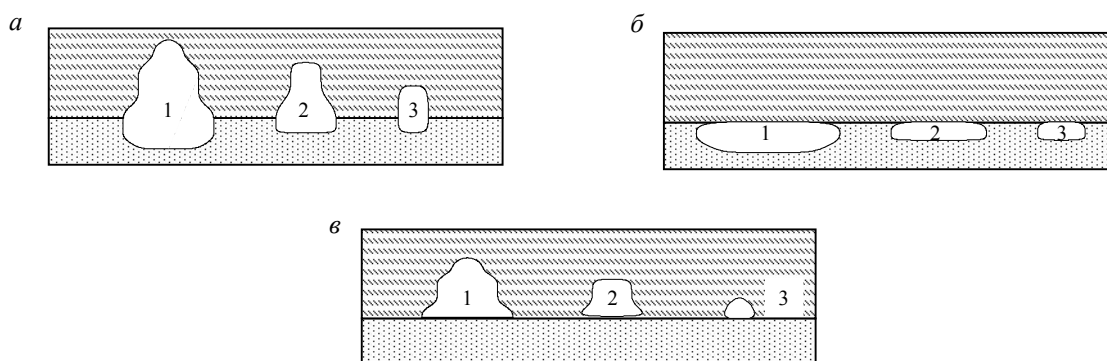


Рис. 2. Эволюция форм и размеров зон разрушения в кровле с увеличением глубины расположения выработки: а – при критическом напряжении в кровле и руде  $\sigma_{xx} = 4$  МПа; б – при  $\sigma_{xx} = 7$  МПа в кровле и  $\sigma_{xx} = 4$  МПа в руде; в – при  $\sigma_{xx} = 4$  МПа в кровле и  $\sigma_{xx} = 7$  МПа в руде

1 –  $h = 250$  м; 2 –  $h = 500$  м; 3 –  $h = 750$  м

На рис.3 изображены эпюры суммарных напряжений, формирующихся в слоистой непосредственной кровле системы выработок. Если принять критические значения величин суммарных растягивающих напряжений в указанных зонах непосредственной кровли равными 4 МПа, то, учитывая, что максимальные расчетные значения суммарных растягивающих напряжений превышают критериальные, в них возможно образование магистральных трещин, параллельных потолочинам выработок, и расслоение непосредственной кровли. Массовые скорости  $U_x^*$  в этих зонах кровли могут достигать 1,6-2,1 м/с. Механический импульс, полученный приконтурными элементами непосредственной кровли, может оказаться достаточным для разрушения уча-

стка ее непрочных пород, примыкающих к потолочине, в результате чего произойдет ее обрушение. Расчеты массовых скоростей  $U_x^*$  (рис.4), которыми будут обладать разрушенные участки непосредственной кровли в момент ее обрушения, показывают, что наибольшими скоростями будут обладать элементы непосредственной кровли, примыкающие к потолочине. При выбранных механических характеристиках свойств и мощности слоев кровли, параметрах взрывной волны напряжений и критериального значения разрушающего нормального напряжения 4 МПа в слоях непосредственной кровли, размеры разрушенной области в ней могут достигать 1,5 м, считая от вертикальной оси выработки, и до 1,0-2,0 м от ее потолочины.

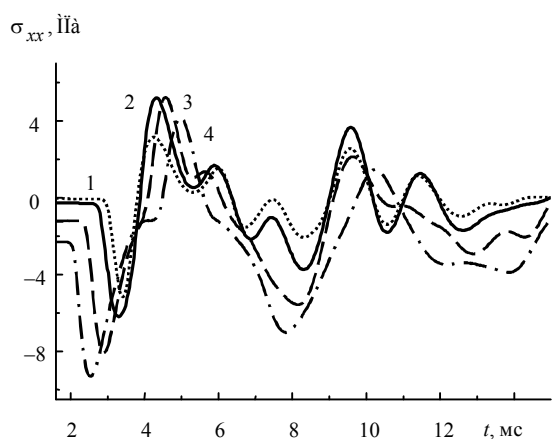


Рис.3. Эпюры суммарных напряжений в точках вертикальной оси симметрии выработки  $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{(p)} + \sigma_{xx}^{(h)}$ , отстоящих от ее контура на расстояние 0,5 м (1), 1 м (2), 2 м (3) и 3 м (4)

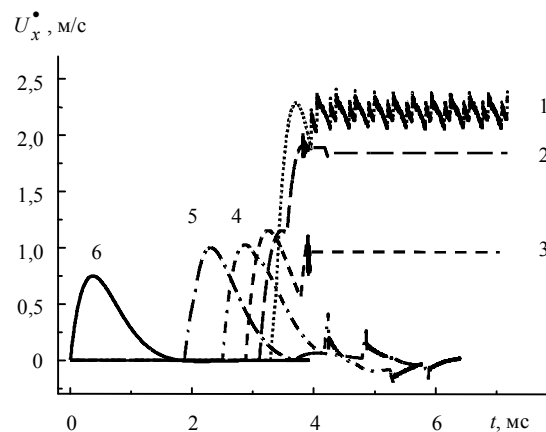


Рис.4. Эпюры массовых скоростей при разрушении непрочных пород непосредственной слоистой кровли на различных расстояниях  $x$  от потолочины  
1 -  $x = 0,1$  м; 2 -  $x = 0,5$  м; 3 -  $x = 1,0$  м; 4 -  $x = 2,0$  м;  
5 -  $x = 4,0$  м; 6 - прямая волна

Рассмотрим теперь воздействие взрывной волны напряжений на систему выработок, в которой слой, примыкающий к потолочине мощностью 1,2 м, более прочный (критическую величину нормальных суммарных растягивающих напряжений в нем примем равной 7 МПа). Слой мощностью 2,3 м менее прочный (критическая величина нормальных суммарных растягивающих напряжений в нем 4 МПа). Эволюция форм зон максимальных величин растягивающих

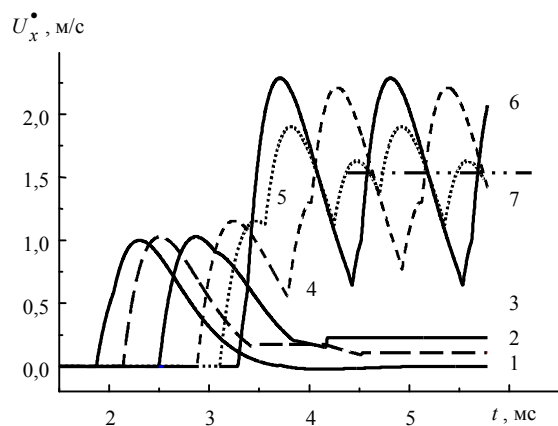


Рис.5. Эпюры массовых скоростей в основной кровле (кривая 1) и слоях непосредственной кровли выработки на расстоянии от потолочины 3,0 м (2), 2,0 м (3), 1,0 м (4), 0,5 м (5) и 0,1 м (6)

напряжений в слоистой кровле с увеличением глубины показана на рис.2, в. Уменьшение размеров зон максимальных растягивающих напряжений связано с увеличением горного давления и сопровождается примыканием границ этих зон к границе более прочного тонкого слоя непосредственной кровли. По мере увеличения глубины расположения выработки максимальное удаление границы зоны растягивающих напряжений от ее потолочины уменьшается с 2,8 до 1,4 м, а максимальная ширина этой зоны сокращается с 2,4 до 0,8 м.

Эпюры массовых скоростей в основной и непосредственной кровле выработки, расположенной на глубине 250 м, свидетельствуют, что при сделанных допущениях разрушение пород непосредственной кровли происходит в менее прочном слое мощностью 2,3 м. Графики эпюр массовых скоростей после образования разрывов в слое (кривые 2 и 3 на рис.5) практически не изменяются, так как произошло отделение пород более прочного тонкого слоя от слоя мощностью 2,3 м. Преломленные в тонкий слой волны продолжают свой бег по тонкому слою мощностью 1,2 м (кривые 4-6 на рис.5).

При этом разрушения пород тонкого слоя непосредственной кровли мощностью 1,2 м не происходит. Средняя скорость движения отделившихся слоев непосредственной кровли может достигать 1,4 м/с (кривая 7 на рис.5).

При выбранных параметрах внешнего воздействия накопление повреждений в целике может наблюдаться только в окрестности угловых точек контура выработки.