

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
«ПИОНЕР-КАМЕРЫ» ЛЕЖАЧЕГО БОКА**

**Введение.** Потери руды при подземной разработке месторождений полезных ископаемых системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород вызваны тем, что часть отбитой руды при выпуске остается на лежащем боку залежи, формируя так называемую «мертвую зону». Для уменьшения объема руды, остающейся на лежащем боку залежи разработана технология предварительной отработки в лежащем боку залежи очистной «пионер-камеры», имеющей сводообразную потолочину с наклонной плоскостью свода [1]. Формирование в лежащем боку залежи очистной «пионер – камеры» для извлечения «условно потерянных» руд «мертвой зоны», вызывает изменение естественного гравитационно-тектонического поля напряжений рудного массива.

**Постановка задачи.** Проблема установления поля напряжений, которое возникает в массиве горных пород в результате проведения подземных выработок, является важнейшим фактором при определении напряженно-деформированного состояния горного массива. Результаты этих исследований являются необходимым звеном при аналитическом решении задач по определению устойчивости обнажений подземных горных выработок.

**Метод решения.** Результаты численного моделирования представляются в виде распределения изолиний главных минимальных и максимальных напряжений и относительных деформаций горного массива, окружающего очистную «пионер – камеру» лежачего бока.

Напряжения в массиве горных пород вокруг очистной «пионер – камеры» лежачего бока со сложной формой поперечного сечения вычислялись при помощи метода конечных элементов с использованием специального программного обеспечения на базе программного комплекса ANSYS 6.1.

Использование метода конечных элементов дает возможность учитывать неоднородность свойств деформируемой области, включая свойства рудного и породного массивов, а также свойства налегающих обрушенных пород.

Данный метод позволяет рассчитывать области сколь угодно сложной конфигурации, в том числе и при условии многофакторного влияния горногеологических, технологических и физико-механических параметров исследуемого массива.

Для корректного сравнения распределения напряжений в горном массиве при формировании «пионер – камер» сложной конфигурации, вместо абсолютной величины напряжений принимались соотношения действующего в данной точке напряжения к аналогичным напряжениям в нетронутым массиве на границе формирования «пионер – камеры» лежачего бока.

При математическом моделировании горного массива исходными характеристиками исследуемых руд явились модуль упругости Юнга, находящийся в пределах  $E = 3,64 - 5,45 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,18 - 0,31$ . Для обрушенных налегающих пород  $E = 10,0 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup>,  $\mu = 0,30$ .

Численные исследования проведены для двух вариантов очистной «пионер – камеры» лежачего бока.

Первоначально моделировался горный массив с формированием в лежащем боку очистной «пионер – камеры» треугольной формы, рис. 1. Данная форма была выбрана как более простая в оформлении при ведении буровзрывных работ.

Размеры вертикальных и горизонтальных обнажений зависят от высоты обрабатываемой панели и угла наклона залежи. Для удобства сравнения вместо абсолютных величин рассматривается отношение высоты камеры  $h_k$  к ее ширине  $l_k$  на уровне потолочины.

Характер распределения напряжений в потолочине зависит, прежде всего, от ее толщины. Для удобства вычислений толщина потолочины задавалась условной величиной, равной отношению абсолютной толщины потолочины  $h_n$  к ее ширине  $l_n = l_k$ .

Картина распределения изолиний главных максимальных  $\sigma_1$  и главных минимальных  $\sigma_3$  напряжений представлена на рис. 1. Напряжения со знаком (+) являются растягивающими.

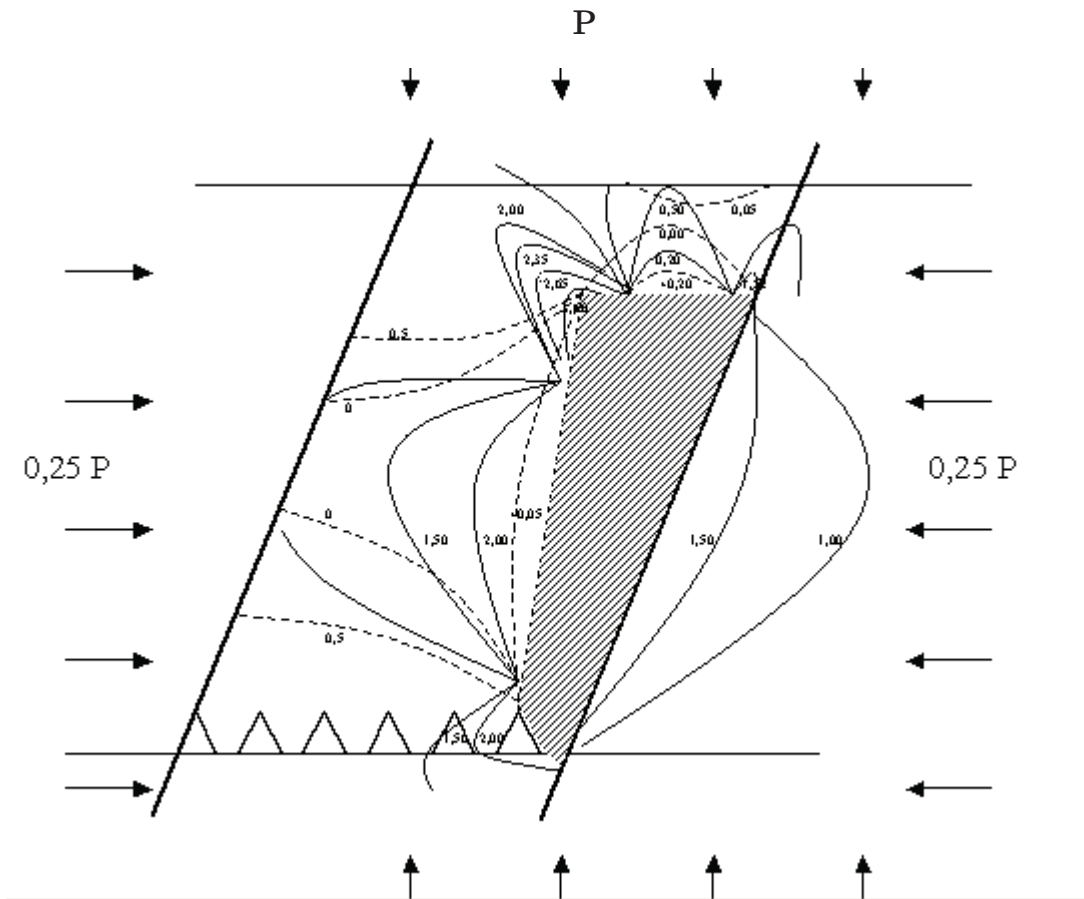


Рисунок 4.2 - Изолинии главных напряжений  $\sigma_1$  (сплошная) и  $\sigma_3$  (пунктирная) в горном массиве вокруг «пионер – камеры» лежачего бока

Наибольшей абсолютной величины напряжения достигают вблизи углов образованной очистной камеры со стороны рудного массива и налегающих обрушенных пород. Коэффициент концентрации напряжений зависит от радиуса закругления угла камеры  $\beta$ . Наблюдается небольшая концентрация напряжений в углах на днище камеры. Появление значительных максимальных напряжений  $\sigma_1$  в углах камеры объясняется действием сжимающих напряжений. С удалением в глубь рудного массива напряжения  $\sigma_1$  уменьшаются, а их характер распределения становится более равномерным.

При отношении  $h_k / l_k > 1$  боковые обнажения очистной камеры характеризуются тем, что в центральной части боковой образующей появляются растягивающие напряжения  $\sigma_3$ . Напряжения  $\sigma_1$  в этом случае уменьшаются от границы камеры в глубь рудного массива.

В то же время, сжимающие напряжения  $\sigma_1$  в потолочине на контуре «пионер – камеры» равны нулю, увеличиваясь по мере удаления от контура камеры.

Под действием продольных деформаций боковая поверхность и кровля камеры становятся выпуклыми и в них появляются растягивающие напряжения.

При размерах потолочины  $h_n / l_n < 0,5$  на контакте между потолочиной и налегающими обрушенными породами также возникают растягивающие напряжения  $\sigma_3$ , которые могут значительно ослабить потолочину, а в некоторых случаях привести к ее обрушению.

При приближении размера потолочины к  $h_n / l_n = 1$  распределение напряжений приближается к распределению в однородной рудной среде и толщина потолочины практически не оказывает влияния на величину напряжений.

Как видно из рис. 1, имеющие место растягивающие напряжения в кровле камеры оказывают наибольшее влияние на их устойчивость. Растягивающие напряжения  $\sigma_3$  наблюдаются по всему контуру потолочины, за исключением сопряжений с боковой поверхностью. Из рисунка видно, что растягивающие напряжения распределяются в средней части потолочины практически по прямолинейному закону распределения. При удалении от контура потолочины «пионер – камеры» растягивающие напряжения  $\sigma_3$  становятся сжимающими.

Численное моделирование главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  позволяет сделать вывод, что плоские горизонтальные потолочины обладают слабой устойчивостью горизонтальных пролетов и не допускают значительных обнажений, которые могут привести к полному или частичному их обрушению.

Следовательно, напряженное состояние массива при формировании очистной «пионер – камеры» лежачего бока зависит от формы поперечного сечения кровли камеры и радиуса закругления сопряжения боковой поверхности с кровлей очистной камеры.

Придавая кровле камеры сводообразную форму с различным радиусом закругления можно в определенных пределах влиять на общую устойчивость формируемой потолочины «пионер – камеры» лежачего бока, обеспечивая ей необходимую устойчивость.

С целью подтверждения высказанных предположений моделировался рудный массив с очистной «пионер – камерой» лежачего бока имеющей сводообразную кровлю.

Распределения напряжений в горном массиве при формировании «пионер – камеры» лежачего бока, согласно разработанной нами технологии, рис. 2.

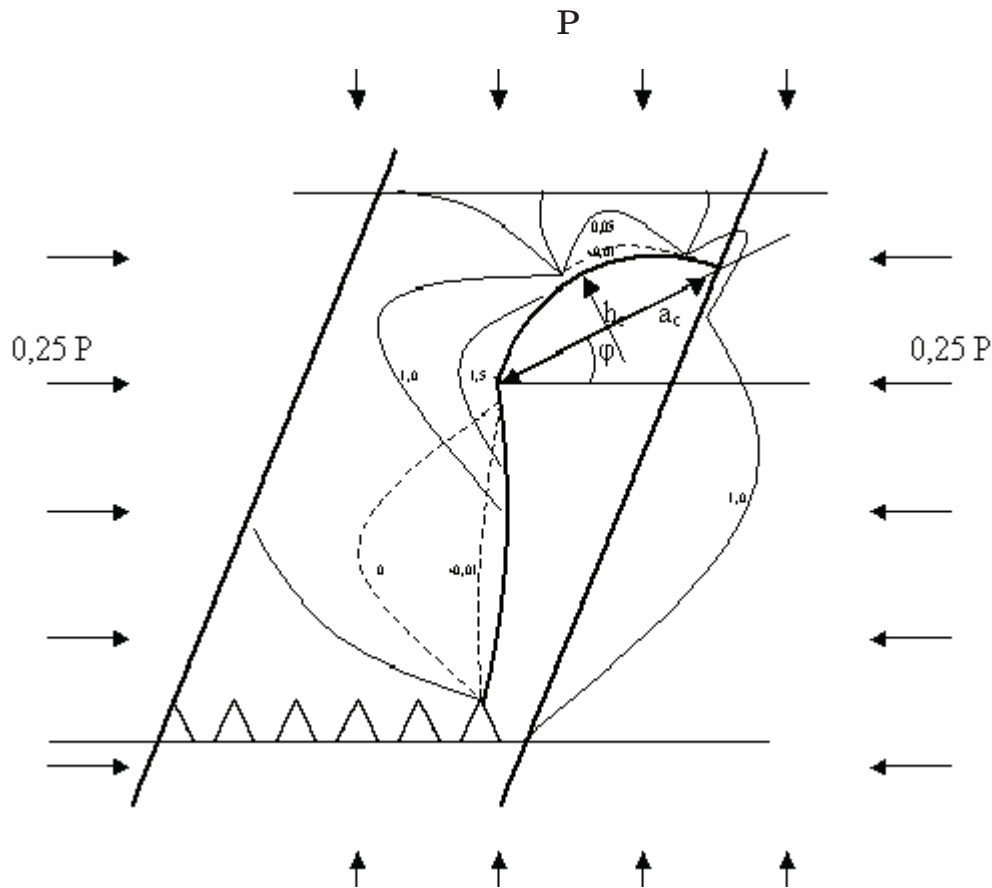


Рис. 2. Изолинии главных напряжений  $\sigma_1$  (сплошная) и  $\sigma_3$  (пунктирная) в горном массиве вокруг «пионер – камеры» лежачего бока

Исходные горногеологические характеристики массива горных пород принимались равными предыдущему эксперименту.

Размеры очистной «пионер – камеры» были адекватны эксперименту с камерой треугольной формы.

Анализ распределения напряжений  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  в горном массиве вокруг «пионер – камеры» лежачего бока позволил утверждать, что изменения напряжений по сравнению с предыдущим вариантом наблюдаются в основном в области сопряжения боковой образующей поверхности и сводообразной верхней части.

В сводообразной потолочине изменяется величина растягивающих напряжений на контуре потолочины, которая зависит от кривизны сводообразной поверхности ( $h_c / a_c$ ) и угла наклона основания плоскости свода ( $\varphi$ ) к горизонтальной поверхности.

### Выводы

Формирование сводообразной потолочины снижает величину растягивающих напряжений по сравнению с плоскими потолочинами. Величина растягивающих напряжений уменьшается на 14 – 42 % при кривизне свода  $h_c / a_c = 0,1$  при углах наклона плоскости свода соответственно  $\varphi = 10^\circ$  и  $\varphi = 25^\circ$ .

При кривизне свода  $h_c / a_c = 0,4$  растягивающие напряжения  $\sigma_3$  уменьшаются на 28 – 84 % при углах наклона плоскости свода соответственно  $\varphi = 10^\circ$  и  $\varphi = 25^\circ$ .

Таким образом, изменение кривизны свода и угла наклона плоскости свода влияет не только на величину растягивающих напряжений, но и на область их распространения.

При сводчатой кровле «пионер – камер» лежачего бока, область распространения и абсолютная величина растягивающих напряжений в потолочине уменьшается с увеличением кривизны свода и увеличением угла наклона плоскости потолочины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат.48630 А, ИА, Е21С41/00. Спосіб розробки рудних покладів / Калініченко В.О., Калініченко О.В. №2001107316; Заявлено 26.10.2001; Опубл. 15.08.2002. Бюл.№8.

Получено 17.09.2007 г.