

УДК 622.272

Д.Ю. Рыбаков**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ САМООБРУШЕНИЙ ПОРОД КРОВЛИ ПОЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ, ОСРЕДНЕННЫХ ПО НАКЛОННЫМ ПЛОЩАДКАМ**

Развиваются существующие исследования состояния горного массива на основе выявления условий самообрушения пород кровли выработки с использованием критерия Кулона-Мора для оценки средних напряжений по косой площадке вблизи границ выработки.

Ключевые слова:

Неделя горняка

При добыче полезных ископаемых в пластовых месторождениях большое внимание уделяется мероприятиям по предотвращению самообрушения пород в кровле. Подобные явления, так или иначе, связаны с перераспределением напряжений в горном массиве. Поскольку в настоящее время нет достоверных данных, позволяющих судить о напряженном состоянии горного массива, требуется теоретическое исследование этого вопроса. Данная работа развивает существующие исследования [1,2] состояния горного массива на основе выявления условий самообрушения пород кровли выработки с использованием критерия Кулона-Мора для оценки средних напряжений по косой площадке вблизи границ выработки. Это оправдано, так как, исходя из данных натурных наблюдений известно, что породы кровли разрушаются скорее вдоль некоторой площадки, отклоненной от вертикали, чем строго вдоль самой вертикали.

При этом в работе при проведении расчетов и построении графиков использовалась система символьных вычислений Математика 5.0.

1. Постановка задачи

Постановка задачи соответствует модели горного массива, рассмотренной в работах [1] и [2]. При отсутствии выработки, напряжения нетронутого массива записываются:

$$\sigma_x^0 = -\alpha\gamma(H - y), \quad \sigma_y^0 = -\gamma(H - y), \quad \tau_{xy}^0 = 0,$$

где α - коэффициент бокового отпора в нетронутом массиве.

Текущие напряжения в массиве обозначим через $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, а дополнительные через X_x, Y_y, X_y .

Компоненты дополнительного напряжения, выраженные через комплексные потенциалы, и сами потенциалы имеют вид:

$$\Omega(z) \equiv 0$$

$$X_x = 2 \operatorname{Re}\Phi(z) - 2y \operatorname{Im}\Phi'(z) \quad (2)$$

$$Y_y = 2 \operatorname{Re}\Phi(z) + 2y \operatorname{Im}\Phi'(z)$$

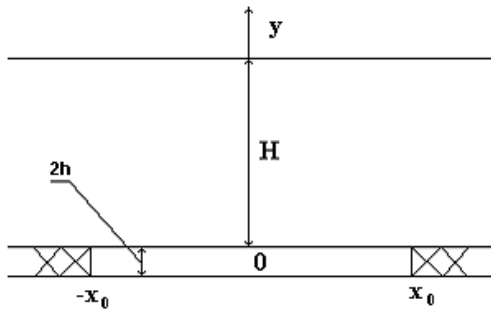


Рис. 1

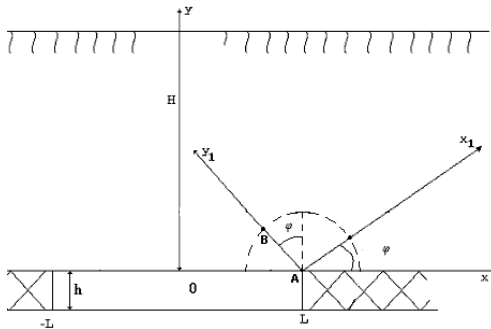


Рис. 2

$$X_y = -2 \operatorname{Re} \Phi'(z)$$

$$\Phi(z) = \frac{\gamma H}{2} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 - x_0^2}} \right) \quad \Omega(z) \equiv 0 \quad (3)$$

2. Формулы для среднего по произвольной косоугольной площадке нависающего слоя касательного и нормального напряжения у границы выработки

Для исследования напряженного состояния горного массива вблизи границ выработки будем рассматривать напряжения на отрезке некоторой длины, с одним концом в точке правого верхнего угла выработки и наклоненной под произвольным углом к горизонту. С площадкой свяжем переносную систему координат x_1, y_1 как показано на рис. 2.

Нормальное и касательное напряжения в системе координат, повернутой под произвольным углом φ к горизонту, выражается через полные напряжения в массиве по формулам:

$$\tau_n = \frac{1}{2} \sin 2\varphi (\sigma_y - \sigma_x) + \cos 2\varphi \tau_{xy}$$

$$\sigma_n = \cos^2 \varphi \sigma_x + \sin 2\varphi \tau_{xy} + \sin^2 \varphi \sigma_y$$

Для получения среднего по длине площадки касательного и нормального

напряжения нужно осреднить σ_y , σ_x и τ_{xy} . $\tau_{xy_{cp}} = \frac{1}{|AB|} \int_A^B (-2y \operatorname{Re} \Phi'(z)) \Big|_{y=y(x_1, y_1)}^{z=z(z_1)} \Big|_{x_1=0} dy_1$,

откуда:

$$\frac{\tau_{xy_{cp.поAB}}}{\gamma H} = \frac{t \cos \varphi}{\sqrt[4]{A^2 + B^2}} \left(\sin \varphi \cos \frac{\phi}{2} + \cos \varphi \sin \frac{\phi}{2} \right), \quad (6)$$

где $\cos \phi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$, $A = \sin^2 \varphi - 2t \sin \varphi + \cos^2 \varphi$, $B = 2 \cos \varphi (t - \sin \varphi)$.

Аналогично:

$$\frac{\sigma_{x_{cp.поAB}}}{\gamma H} = 1 - \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \cos \frac{\phi_1}{2} + \frac{t \cos \varphi}{\sqrt[4]{A^2 + B^2}} \left(\cos \varphi \cos \frac{\phi}{2} - \sin \varphi \sin \frac{\phi}{2} \right) - \alpha + \frac{\alpha R}{2H}, \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{y_{cp.поAB}}}{\gamma H} = 1 - \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \cos \frac{\phi_1}{2} - \frac{t \cos \varphi}{\sqrt[4]{A^2 + B^2}} \left(\cos \varphi \cos \frac{\phi}{2} - \sin \varphi \sin \frac{\phi}{2} \right) - 1 + \frac{R}{2H}, \quad (8)$$

где $\cos \phi_1 = \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}$, $A_1 = 1 - 2t \sin \varphi$, $B_1 = 2t \cos \varphi$.

Таким образом, формулы среднего по кривой площадке, наклоненной под углом φ , для касательного и нормального напряжений, согласно (5), (6), (7) и (8) имеют вид:

$$\tilde{\tau}_{cp} = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \left(\frac{\sigma_{y_{cp.лоAB}}}{\gamma H} - \frac{\sigma_{x_{cp.лоAB}}}{\gamma H} \right) + \cos 2\varphi \frac{\tau_{xy_{cp.лоAB}}}{\gamma H} \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma}_{cp} = \cos^2 \varphi \frac{\sigma_{x_{cp.лоAB}}}{\gamma H} + \sin 2\varphi \frac{\tau_{xy_{cp.лоAB}}}{\gamma H} + \sin^2 \varphi \frac{\sigma_{y_{cp.лоAB}}}{\gamma H}$$

3. Использование критерия Кулона-Мора для оценки напряженного состояния

После рассмотрения упругой модели горного массива перейдем к построению критерия разрушения горного массива, на основе которого можно было бы построить подобно к решению задачи о прогнозировании обрушения пород кровли. В основе такого критерия лежит идея исследования условий, при которых в рамках нашей упругой постановки задачи для некоторой области в среднем касательные напряжения соответствуют предельным касательным напряжениям по Кулону-Мору. Появление такой области будет пониматься нами как условие разрушения горного массива.

Предельное касательное напряжение согласно условию Кулона – Мора имеет вид:

$$\tau_{пред} = C - tg\rho \sigma_n \quad (10)$$

Здесь C – параметр связности пород кровли, $tg\rho$ – тангенс угла внутреннего трения. В §2 была рассмотрена площадка, отклоненная на некоторый угол от вертикали с началом в правом верхнем углу выработки. На этой площадке были получены формулы для средних по длине касательного и нормального напряжений. Для ответа на вопрос о прочностном состоянии массива воспользуемся критерием Кулона – Мора и оценим напряженное состояние в среднем по всякой такой площадке. При этом, осредненное и обезразмеренное предельное касательное напряжение, согласно (10) имеет вид:

$$\tilde{\tau}_{cp}^{пред} = \frac{C}{\gamma H} - tg\rho \tilde{\sigma}_{cp} \quad (11)$$

Напряжения $\tilde{\sigma}_{cp}$, $\tilde{\tau}_{cp}$ представляют собой функции, зависящие как от горно-геологических параметров – глубины H выработки, удельной плотности пород массива γ , величины пролета L , коэффициента бокового отпора α , – так и от параметров, определяющих положение рассматриваемой площадки в массиве – угла φ наклона площадки и её длины R . Предельное касательное напряжение по Кулону – Мору (11) кроме того зависит еще и от параметра C связности пород и угла внутреннего трения $tg\rho$.

Для исследования напряженного состояния пород горного массива вблизи выработки рассмотрим зависимость напряжений в виде графиков от коэффициента L/R отношения полупролета к длине рассматриваемой площадки осреднения при том условии, что остальные безразмерные коэффициенты в формулах, выражающих напряжения фиксированы.

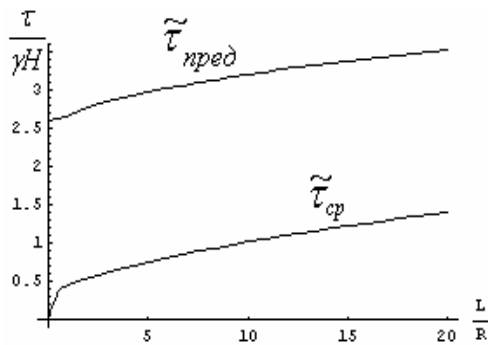


Рис. 3

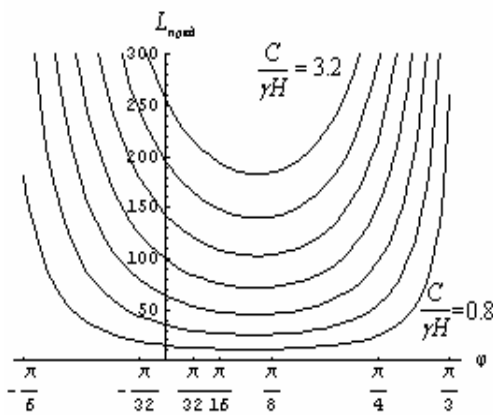


Рис. 4

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента предельного касательного напряжения $\tilde{\tau}_{пред}$ и коэффициента касательного напряжения $\tilde{\tau}_{ср}$ от величины безразмерного параметра L/R при значении тангенса угла внутреннего трения $tg\rho = 0.2$, построенные для $\alpha = 1$, $\frac{R}{H} = 0.004$, $\frac{C}{\gamma H} = 2.4$, на площадке, наклоненной под углом $\varphi = 30^\circ$.

Кривые, соответствующие графикам касательного и предельного по Кулону – Мору касательного напряжения на наклонной площадке АВ могут иметь общую точку. Это значит, что для данного горного массива на площадке данной длины R, отклоненной под заданным углом к вертикали при значении коэффициента L/R , равного абсциссе точки пересечения соответствующих кривых реализуется предельное напряженное состояние в среднем по длине площадки.

4. Исследование предельного напряженного состояния и площадок, на которых оно реализуется

Как показано в §3, функции $\tilde{\tau}_{пред}$ и $\tilde{\tau}_{ср}$, как зависимости от параметра L/R при фиксированном наборе остальных переменных могут иметь общую точку. При этом, очевидно, что иному набору безразмерных коэффициентов, описывающих горный массив и геометрию выработки, расположение забоя и положение площадки осреднения, будет соответствовать иная зависимость напряжений от параметра L/R . Общая точка у графиков функций $\tilde{\tau}_{пред}(L/R)$ и $\tilde{\tau}_{ср}(L/R)$ для каждого нового набора значений параметров задачи, и в частности, для каждой площадки, наклоненной под своим углом φ к вертикали, будет своя, а может и отсутствовать вовсе в физически осмысленном диапазоне изменения коэффициента отношения полупролета выработки к длине рассматриваемой площадки осреднения. Исходя из этого, к построению прогноза обрушения кровли в подземном сооружении предлагается подходить следующим способом. Взять площадку некоторой длины R и для всех значений её угла φ от-

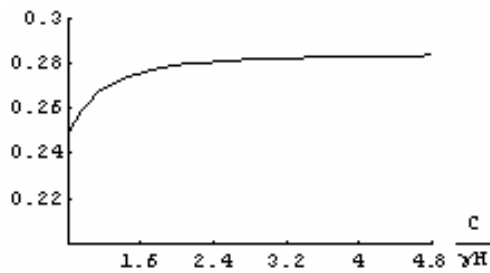


Рис. 5

клонения от вертикали найти свое предельное значение L/R . Таким образом, получается зависимость предельного допустимого значения параметра L/R от выбора площадки. Минимум этой функции дает настоящее предельное значение полупролета $L_{пред}$ (при фиксированной длине R площадки) для заданной выработки, описываемой данным фиксированным набором горно-геологических характеристик. Это действительно так, потому что в случае развития геологических работ таким способом, при котором величина полупролета оказывается равной $L_{пред}$, в кровле уже есть площадка, на которой скальная порода находится в предельном по Кулону – Мору состоянии.

Общая точка графиков функций $\tilde{\tau}_{пред}(L/R)$ и $\tilde{\tau}_{cp}(L/R)$, т.е. предельное значение полупролета подземного сооружения удовлетворяет условию равенства единице функции отношения среднего касательного напряжения к предельному касательному по длине площадки:

$$F\left(\varphi, \alpha, \frac{L}{R}, \frac{C}{\gamma H}, \frac{R}{H}\right) = \frac{\tilde{\tau}_{cp}}{\tilde{\tau}_{пред}} = 1$$

При этом здесь и дальше в работе, значение тангенса угла внутреннего трения $tg\rho$ положено константой.

В силу нетривиальности, уравнение $F=1$ было решено численно с использованием системы символьных вычислений Wolfram Mathematica 5.0.

На рис. 4 представлены результаты расчета значения полупролета при котором на соответствующей площадке, с отклонением от вертикали в диапазоне углов $\varphi \in \left[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}\right]$ реализуется предельное напряженное состояние по Кулону – Мору.

Зависимости получены для различных величин коэффициента $\frac{C}{\gamma H}$ и фиксированных остальных параметрах. Минимум для каждой из этих кривых представляют собой предельное значение полупролета $L_{пред}$, при котором в кровле уже существует в наличии площадка, в среднем по длине которой скала находится в предельном напряженном состоянии.

На рис. 5 представлен график относительной погрешности расчетной допустимой величины полупролета по методике работы [1] по сравнению с нашим способом оценки напряженного состояния в среднем по косым площадкам при изменении коэффициента $\frac{C}{\gamma H}$ для следующих значений параметров задачи: $tg\rho=0.2$, $\alpha=1$, $\frac{R}{H}=0.004$.

Допустимая длина пролета подземного сооружения оказывается примерно на 28% меньше, чем по результатам расчета методом оценки среднего напряжения по толщине кровли.

Заключение

В работе исследованы условия возникновения предельного напряженного состояния в непосредственной толще нависающих пород над выработкой. Развита идея оценки напряженного состояния горного массива по осредненным напряжениям. Предложен новый метод построения прогноза обрушения кровли в подземных сооружениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С.В., Рыбаков Д.Ю., Трофимов В.А. «Определение величины допустимого пролета горной выработки по факту обрушения кровли». Материалы международной конференции. Бишкек, 2007.
2. Кузнецов С.В., Хапилова Н.С.. Об определении момента обрушения кровли. ФТПРПИ. 1969. №5. **ГЛАВ**

Коротко об авторе

Рыбаков Д.Ю. – ИПКОН РАН, Москва, info@ipkonran.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
РАССКАЗОВ Виктор Анатольевич	Прогнозирование показателей надежности большегрузных автосамосвалов в условиях глубоких карьеров	05.05.06	к.т.н.
ПОМИНОВ Константин Петрович	Обоснование взаимосвязи параметров гидропривода и производительности проходческих окмбайнов избирательного действия	05.05.06	к.т.н.