

УДК 622.241.54:539.3

Н.В. Черданцев, В.А. Федорин

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ПОВЕРХНОСТЯМИ ОСЛАБЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КОМПЛЕКСА ПРОТЯЖЁННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Применение геотехнологии HIGHWALL [1] позволяет отрабатывать угольные пласты в приконтурной части карьера. По этой геотехнологии с вертикального уступа по пласту угля без крепления проходят последовательно с помощью роторных агрегатов параллельные выработки квадратного (прямоугольного) сечения на глубину до 300 м (угольный разрез "Распадский", Кузбасс). Одной из основных проблем при разработке пласта является проблема устойчивости выработок. Массив осадочных горных пород с вмещающими угольными пластами представляет собой среду, имеющую упорядоченную систему поверхностей ослабления, по которым, как правило, происходит разрушение. Расчётной схемой такой среды является пластина, пронизанная системой поверхностей ослабления и нагруженная на краях гравитационными напряжениями (рис. 1).

Выработка не устойчива, если за контуром выработки образуются зоны нарушения сплошности

сти (ЗНС) некоторой области, в которой не выполняется условие прочности Кулона–Мора–Кузнецова [2]:

$$\tau_v \leq K + \sigma_v \tan \varphi, \quad (1)$$

где  $\tau_v, \sigma_v$  – касательное и нормальное напряжения по поверхности ослабления с нормалью  $v$ ,  $K$  – коэффициент сцепления,  $\varphi$  – угол внутреннего трения пород на поверхностях ослабления.

Для построения зоны нарушения сплошности вначале решается задача о распределении напряжений вокруг выработок в изотропной упругой среде, которая формулируется следующим образом: в бесконечном массиве имеются несколько протяжённых параллельных выработок. К массиву на бесконечности приложены вертикальные  $\sigma_{22}^{\infty} = \gamma H$  и горизонтальные  $\sigma_{11}^{\infty} = \sigma_{33}^{\infty} = \lambda \gamma H$  компоненты тензора напряжений ( $\lambda$  – коэффициент бокового давления). Поскольку выра-

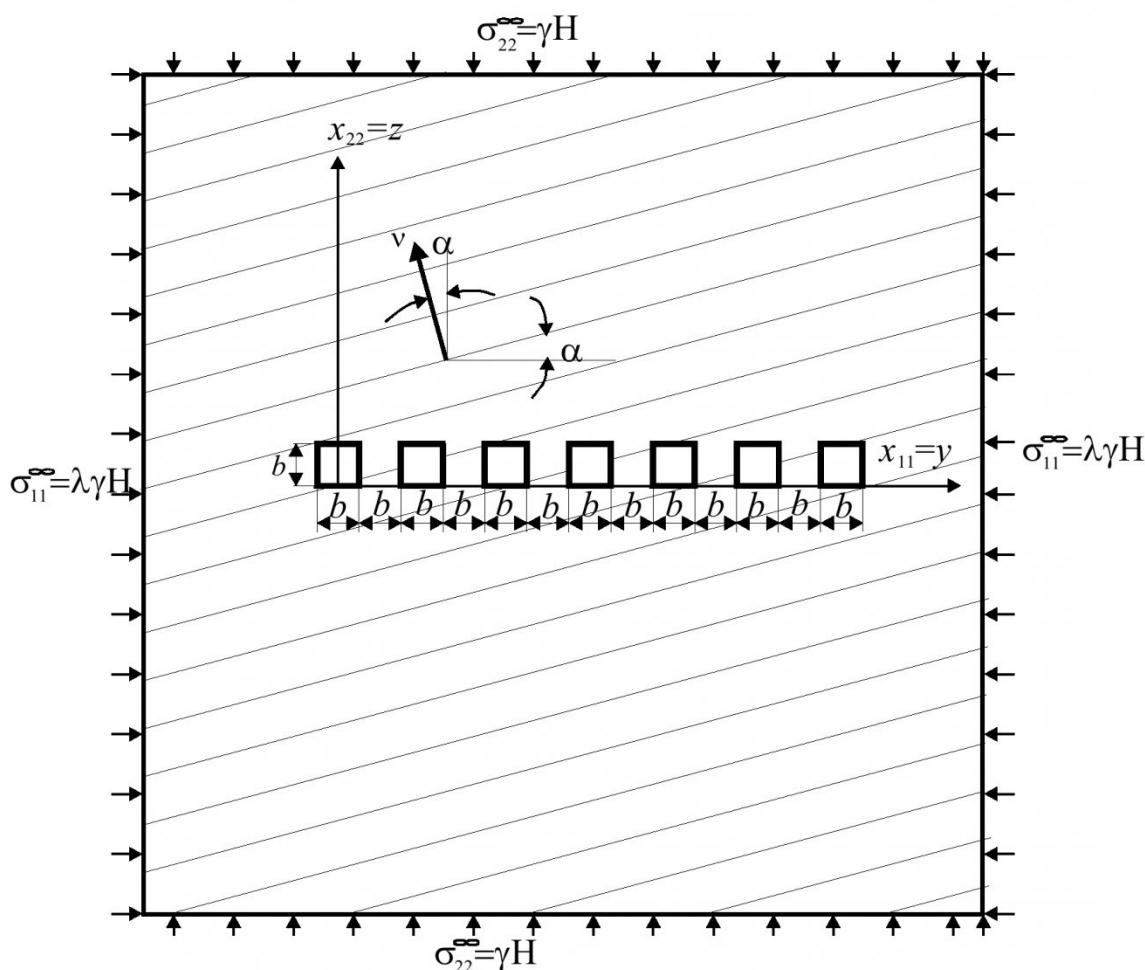


Рис. 1. Расчёчная схема задачи

ботки параллельные, то горные породы в сечениях, перпендикулярных осям выработок, находятся в условиях плоского деформированного состояния.

Для решения поставленной задачи авторы использовали метод граничных интегральных уравнений, сущность которого заключается в следующем [3]. В каждой контурной точке выработок прикладывается подлежащий определению вектор  $a$  компенсирующей (фиктивной) нагрузки. Суммарные напряжения от действия внешней и компенсирующей нагрузок в каждой точке контуров должны удовлетворять силовым граничным условиям. Напряжения от компенсирующей нагрузки определяются интегрированием произведения тензора Кельвина, являющегося решением задачи о единичной силе, приложенной в бесконечной плоскости, на вектор внешней нормали в точке контуров в пределах их длин. В результате чего граничное условие приводится к интегральному уравнению относительно неизвестного вектора  $a$  [3]

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}a_q(Q_0) - \int_L \Phi_{qm}(Q_0, M_0)a_m(M_0)dL_{M_0} = \\ = n_q(Q_0)\sigma_{qq}^{\infty} - F_q(Q_0) \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнении (2)  $F_q(Q_0)$  – реактивный отпор крепи на окружающий массив,  $\sigma_{qq}^{\infty}$  – тензор напряжений на бесконечности,  $a_q(Q_0)$ ,  $a_m(M_0)$  – вектор компенсирующей нагрузки в точках  $Q_0$ ,  $M_0$ ,  $L$  – длина контуров поперечных сечений выработки, индексы  $q$ ,  $m$ ,  $t = 1, 2$  означают номера координатных осей, именно 1 – ось  $x_1=y$ , 2 – ось  $x_2=z$ ,  $r$  – расстояние между точками  $Q_0$  и  $M_0$ ;  $\Phi_{qm}(Q_0, M_0)$  – тензор, получающийся в результате умножения вектора нормали на тензор Кельвина, определяется следующей зависимостью

$$\Phi_{qm}(Q_0, M_0) = \frac{1}{4\pi(1-\nu)r} \left\{ \begin{array}{l} \left( 1 - 2\nu \right) \left( \frac{x_q n_m}{r} - \frac{n_q x_m}{r} \right) + \\ \left[ \left( 1 - 2\nu \right) \delta_{qm} + 2 \frac{x_q x_m}{r^2} \right] \frac{n_t x_t}{r} \end{array} \right\},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\delta_{qm}$  – символ Кронекера ( $\delta_{qm}=1$  при  $q=m$ ,  $\delta_{qm}=0$  при  $q \neq m$ ),  $n_q$ ,  $n_m$  – единичные векторы внешних к контуру нормалей в точках  $Q_0$ ,  $M_0$ ;  $x_q$ ,  $x_m$ ,  $x_t$  – координаты точки  $M_0$  относительно  $Q_0$ .

Уравнение (2) решается численно: контур отверстия заменяется конечным числом  $N$  прямолинейных элементов и интеграл заменяется суммой, затем производится интегрирование по каждому элементу, при этом считается, что в пределах эле-

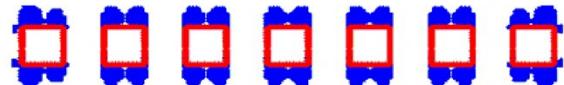


Рис. 2. Зоны нарушения сплошности при горизонтальном расположении поверхностей ослабления:  $\alpha=0^0$ ,  $K=0$ ,  $\lambda=1$

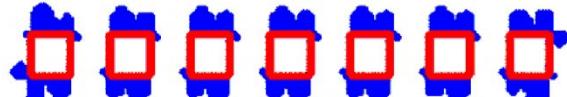


Рис. 3. ЗНС при наклонном расположении поверхностей ослабления  $\alpha=10^0$ ,  $K=0$ ,  $\lambda=1$

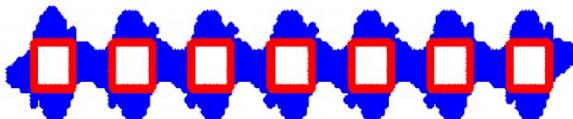


Рис. 4. Зоны нарушения сплошности при наклонном расположении поверхностей ослабления:  $\alpha=30^0$ ,  $K=0$ ,  $\lambda=1$

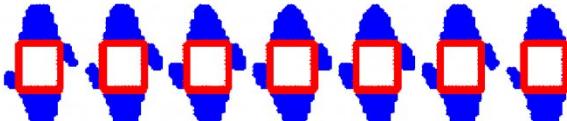


Рис. 5. Зоны нарушения сплошности при наклонном расположении поверхностей ослабления:  $\alpha=30^0$ ,  $K/\gamma H=0,25$ ,  $\lambda=2$

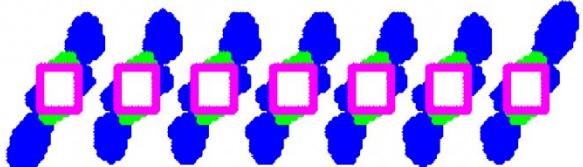


Рис. 6. Зоны нарушения сплошности при наклонном расположении поверхностей ослабления:  $\alpha=30^0$ ,  $K/\gamma H=0,25$ ,  $\lambda=0$

мента значения  $a$  и  $F$  постоянны. В результате этой процедуры граничные условия формулируются в серединах этих элементов, а интегральное уравнение (2) заменяется  $N$  векторными уравнениями [4]

$$\frac{1}{2}a_{q,i}^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Phi_{qm,ij} a_{m,j}^* \Delta L_i = n_{q,i} t_{qq,i}^{\infty} - F_{q,i}^*, \quad (3)$$

где  $i$  – номер точки на контуре, в которой формулируется граничное условие,  $j$  – номер текущей точки на контуре, а суммирование производится по всем точкам за исключением  $j = i$ . В этих уравнениях (также и в дальнейшем) индексы тензоров и векторов отделены точкой от индексов точек контура. В (3) приняты следующие обозначения

$$a_{q,i}^* = a_{q,i} \Delta L_i, \quad a_{m,j}^* = a_{m,j} \Delta L_j,$$

$$t_{q,i}^{\infty} = \sigma_{qq,i}^{\infty} \Delta L_i, \quad F_{q,i}^* = F_{q,i} \Delta L_i.$$

После решения уравнений (3) относительно  $a_{q,i}^*$  определяются напряжения  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  в любой точке  $k$  массива, с помощью принципа суперпозиции:

$$\sigma_{qm,k} = \sigma_{qmt,k} a_{t,j}^* + \sigma_{qq,k}^{\infty}. \quad (4)$$

В формуле (4) используется правило тензорного исчисления: по повторяющимся индексам производится суммирование в пределах изменения этих индексов.  $\sigma_{qmt}$  представляет собой тензор Кельвина, определяемый как [3]

$$\sigma_{qmt} = \frac{1}{4\pi(1-\nu)r^2} \left[ \begin{array}{c} (1-2\nu)(\delta_{mt}x_q + \delta_{qt}x_m) \\ -\delta_{qm}x_t + \frac{2x_qx_mx_t}{r^2} \end{array} \right].$$

Напряжение  $\sigma_{33}$ , направленное вдоль оси выработки, определяется из условия отсутствия деформации  $\varepsilon_{33}$

$$\sigma_{33} = \sigma_{33}^{\infty} + \nu (\sigma_{11} + \sigma_{22}).$$

Нормальные  $\sigma_{\nu}$ , касательные  $\tau_{\nu}$  и полные напряжения  $p_{\nu}$  на поверхности ослабления с нормалью  $\nu$  при плоском деформации определяются по формулам

$$\sigma_{\nu} = \sigma_{qml}l_q l_m, \quad p_{\nu}^2 = \sum_{q=1}^2 (\sigma_{qml}l_m)^2 + (\sigma_{33}l_3)^2,$$

$$\tau_{\nu} = \sqrt{p_{\nu}^2 - \sigma_{\nu}^2},$$

где  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – направляющие косинусы углов между нормалью  $\nu$  и координатными осями  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

Рассмотрен вариант семи равноотстоящих горных выработок квадратных поперечных сечений. Выработки пройдены в массиве горных по-

род с поверхностями ослабления при следующих параметрах поверхностей ослабления: ( $\alpha=0$ ,  $10^0$ ,  $30^0$ ;  $K=0$ ,  $K=0,25$ ,  $\gamma H$ ;  $\varphi=20^0$ ) и значениях коэффициента бокового давления ( $\lambda=1$ ,  $2$ ,  $0$ ). Во всех случаях крепь отсутствует:  $F_q(Q_0)=0$ .

Для решения задачи использован математический программный пакет MATHCAD. Приняты следующие размеры выработок:  $b=4$ м,  $\gamma=25$ кН/м<sup>3</sup>,  $H=100$ м,  $\nu=0,25$ . Контур каждой выработки при численном решении уравнении (3) разбит на 48 интервалов. Для построения зон нарушения сплошности напряжения вычисляются в точках расчётной плоскости, представляющую собой сетку с шагом в направлении  $y$  –  $\Delta y$ , равным 0,1б; в направлении  $z$  шаг  $\Delta z=0,1b$ . В этих же точках проверяется условие Мора–Кузнецова (1). Совокупность точек, в которых оно не выполняется, образуют зоны нарушения сплошности вокруг выработок.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Метод граничных интегральных уравнений позволяет вычислять напряжённое состояние, а критерий прочности Мора – Кузнецова строить зоны нарушения сплошности в многосвязном массиве горных пород.

2. Размеры и конфигурация зон нарушения сплошности вокруг рядом расположенных выработок позволяет находить оптимальные размеры выработок и размеры целиков между ними.

3. Наименьшие размеры зон нарушения сплошности наблюдаются при горизонтальных поверхностях ослабления и гидростатическом поле напряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение системы HIGHWALL для выемки угля с уступа разреза (краткий обзор работ в США и Австралии) //ОГР.–2000,–№ 2.–С. 54-56.
2. Изаксон В.Ю. Методы расчета устойчивости выработок, пройденных комбайнами, в условиях Кузбасса: Дис. ... д-ра. техн. наук / ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1974.
3. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука. – 1970. – 940 с.
4. Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике. Под ред. Т. Круза и Ф. Риццо.–М.: Мир, 1978.

□ Авторы статьи:

<p>Черданцев Николай Васильевич - канд.техн.наук, старший научный сотрудник (Институт угля и углехи- мии СО РАН)</p>	<p>Федорин Валерий Александрович - докт.техн.наук, зав. лабораторией (Институт угля и углехимии СО- РАН)</p>
--	--