

УДК 622.241.54

## ОЦЕНКА НАРУШЕННОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ЩЕЛЕВЫХ ВЫРЕЗОВ

Н. В. Черданцев, В. Т. Преслер, В. Ю. Изаксон

Институт угля и углехимии СО РАН, 650610 Кемерово

E-mail: v.izaxon@kemsc.ru

С использованием метода граничных интегральных уравнений и критерия разрушения Мора — Кузнецова проведен сравнительный анализ нарушенности массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности протяженных вырезов, представляющих собой щели прямоугольного поперечного сечения. В качестве критерия нарушения массива принят коэффициент нарушенности.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, вырезы в массиве горных пород, зона нарушения сплошности, коэффициент нарушенности.

Для разгрузки породного массива в окрестности выработки используются вырезы различных поперечных сечений. Вытянутые прямоугольные вырезы (щели), располагаемые в непосредственной близости от выработки [1], используются также для дегазации угольного пласта. Для количественной и качественной оценки степени разгрузки необходимо провести расчет устойчивости массива горных пород, т. е. определить поле напряжений в окрестности выреза и установить области, в которых критерии прочности не выполняются.

Будем полагать, что массив горных пород как среда обладает прочностной анизотропией [2], т. е. имеет упорядоченные регулярные поверхности ослабления, характеристики прочности которых существенно ниже характеристик прочности основной породы. Даже на стадии упругости такая среда разрушается прежде всего по этим поверхностям, образуя зоны нарушения сплошности. В соответствии с теорией прочности Мора — Кузнецова условие прочности формулируется следующим образом:

$$\tau_n \leq \sigma_n n + K. \quad (1)$$

Здесь  $\tau_n$ ,  $\sigma_n$  — касательное и нормальное напряжения на поверхности ослабления соответственно;  $n$ ,  $K$  — коэффициенты внутреннего трения и сцепления поверхностей ослабления. Будем полагать также, что разрушение массива по поверхностям ослабления не приводит к перераспределению напряжений.

Поскольку вырез является достаточно протяженным, т. е. его длина  $2l$  значительно превышает длину контура поперечного сечения, породы в окрестности выреза, за исключением малых участков в окрестности торцевых сечений, находятся в условиях плоского деформированного состояния. Поэтому решается плоская задача теории упругости. Предположим, что на бесконечности действуют вертикальные напряжения  $\sigma_{33}^\infty = \gamma H$  и горизонтальные напряжения  $\sigma_{11}^\infty = \sigma_{22}^\infty = \lambda \gamma H$  ( $\lambda$  — коэффициент бокового давления;  $\gamma$  — плотность породы;  $H$  — глубина заложения выреза) (рис. 1). Для решения поставленной задачи используется метод граничных элементов, применяющийся в некоторых задачах геомеханики, например в расчетах породного массива в окрестности сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения [3]. При использовании этого метода рассматри-

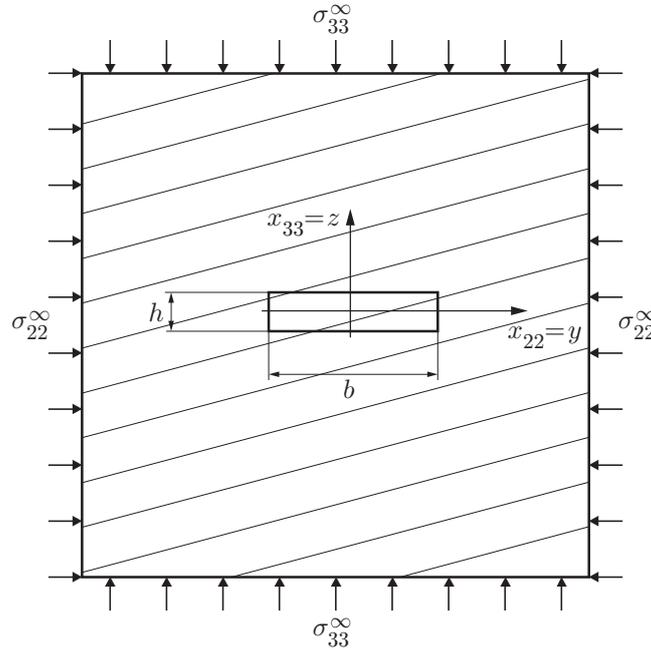


Рис. 1. Расчетная схема задачи:  
наклонные линии — поверхности ослабления

ваемая задача сводится к решению граничного интегрального уравнения второй внешней краевой задачи теории упругости [4–6]:

$$\frac{1}{2} a_q(Q_O) - \int_L \Gamma_{qm}(Q_O, M_O) a_m(M_O) dL_{M_O} = n_q(Q_O) \sigma_{qq}^\infty - F_q(Q_O). \quad (2)$$

Тензор влияния  $\Gamma_{qm}(Q_O, M_O)$  определяется в виде

$$\Gamma_{qm} = \frac{1}{4\pi(1-\nu)r^2} \left[ (1-2\nu)(x_q n_m - x_m n_q) + \left( (1-2\nu)\delta_{qm} + 2 \frac{x_q x_m}{r^2} \right) \frac{x_t n_t}{r} \right].$$

Здесь  $\nu$  — коэффициент Пуассона; индексы  $q, m, t$  принимают значения 1, 2, 3;  $Q_O, M_O, r$  — точки на контуре исследуемого выреза и расстояние между ними соответственно;  $\delta_{qm}$  — символ Кронекера;  $\sigma_{qq}^\infty$  — тензор напряжений на бесконечности;  $L$  — контур поперечного сечения выреза;  $n_q, n_m$  — направляющие косинусы нормали к контуру выреза в точках  $Q_O, M_O$ ;  $F_q(Q_O)$  — вектор реакции крепи, в случае если она установлена;  $\mathbf{a}$  — вектор фиктивной нагрузки.

Уравнение (2) решается численно. Сначала контур выреза заменяется конечным числом  $N$  линейных элементов, а интеграл заменяется суммой. Затем по каждому элементу проводится интегрирование, при этом полагается, что в пределах элемента интенсивности  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{F}$  постоянны. В результате получаем

$$\frac{1}{2} (a_q^*)_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (\Gamma_{qm})_{ij} (a_m^*)_j \Delta L_i = (n_q)_i (t_{qq}^\infty)_i - (F_q^*)_i, \quad (3)$$

где индекс  $i$  соответствует номеру точки на контуре выреза, в которой формулируется граничное условие, индекс  $j$  — номеру текущей точки на контуре; суммирование проводится

по всем точкам контура, за исключением  $j = i$ ; индекс “\*” соответствует результирующим усилиям, приложенным в центрах граничных элементов:

$$(a_q^*)_i = (a_q)_i \Delta L_i, \quad (a_m^*)_j = (a_m)_j \Delta L_j, \quad (t_{qq}^\infty)_i = (\sigma_{qq}^\infty)_i \Delta L_i, \quad (F_q^*)_i = (F_q)_i \Delta L_i.$$

После решения уравнений (3) относительно  $(a_q^*)_j$  в любой точке  $i$  расчетной области массива тензор напряжений  $\sigma_{qm}$  определяется на основе принципа суперпозиции:

$$(\sigma_{qm})_i = (\sigma_{qmt})_{ij} (a_t^*)_j + (\sigma_{qq}^\infty)_i. \quad (4)$$

В (4)  $\sigma_{qmt}$  — результат интегрирования по  $x_1$  от  $-l$  до  $+l$  решения Кельвина (тензора Кельвина) задачи о действии единичной силы на упругое пространство при  $l \rightarrow \infty$  [6]. В результате решение плоской задачи о действии силы принимает вид

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

В окрестности выреза разрушенные области, или зоны нарушения сплошности, называемые также областями неустойчивости массива, находятся как совокупность точек, в которых согласно критерию прочности (1) произошло разрушение массива по поверхностям ослабления пород. Степень нарушенности массива в окрестности выреза (коэффициент нарушенности  $k_n$ ) определяется отношением объема зоны нарушения сплошности к объему выреза (для протяженного выреза это отношение можно заменить отношением соответствующих площадей). В случае регулярной сетки расчетной области

$$k_n = N_n/N_c,$$

где  $N_n$  — число разрушенных узлов в расчетной области;  $N_c$  — число узлов расчетной области, которые можно расположить в пределах прямоугольного выреза.

Ниже приведены результаты численного эксперимента для вырезов прямоугольного и крестообразного поперечных сечений, площадь каждого из которых равна единице. Полагается, что поле напряжений гидростатическое ( $\lambda = 1$ ), поверхности ослабления горизонтальные, коэффициент сцепления  $K = 0$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 20^\circ$ .

На рис. 2, *a, б* показаны зоны нарушения сплошности в окрестности щелевых вырезов прямоугольного поперечного сечения при  $A/a = 20$  ( $A$  — размер большей стороны;  $a$  — размер меньшей стороны). Впервые построены зоны нарушения сплошности в окрестности протяженного выреза крестообразного поперечного сечения (рис. 2, *в*). Такой вырез представляет собой комбинацию горизонтальной и вертикальной щелей. На рис. 2 видно, что

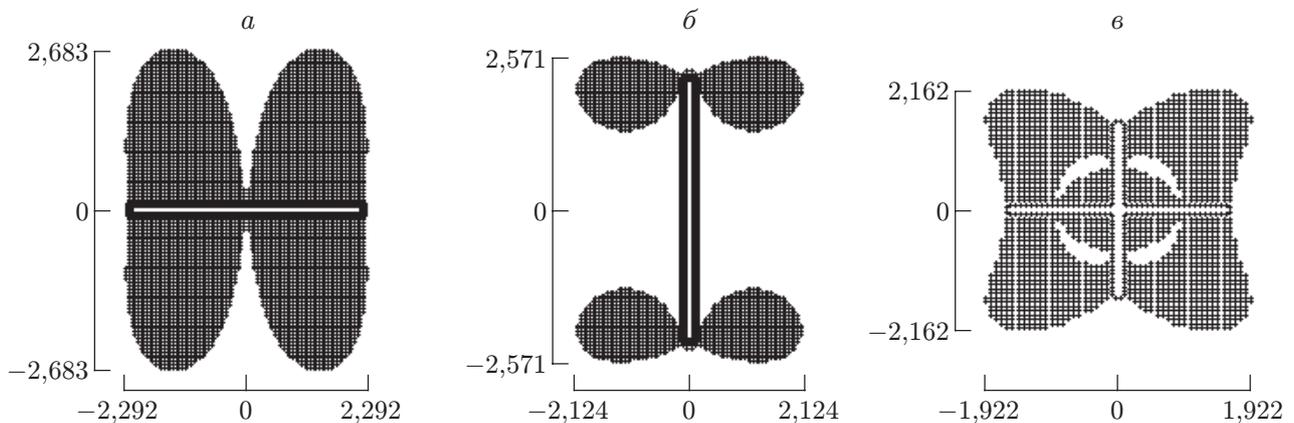


Рис. 2. Зоны нарушения сплошности в окрестности горизонтальной (*a*), вертикальной (*б*) щелей и крестообразного выреза (*в*) при  $A/a = 20$

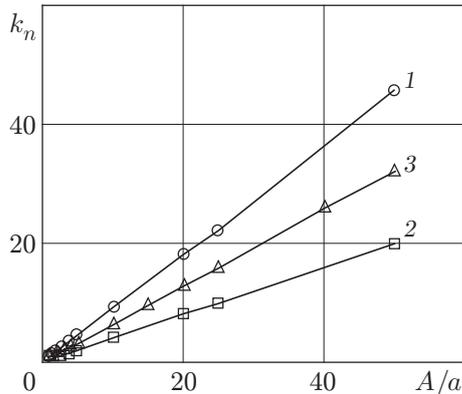


Рис. 3

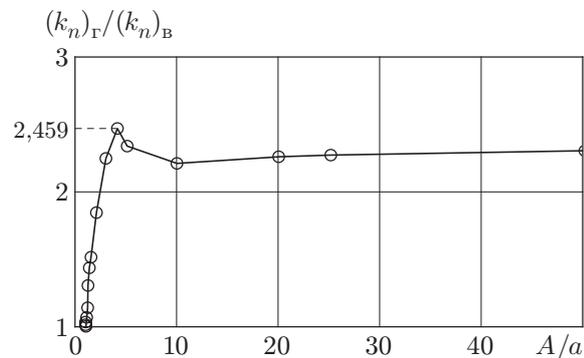


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости коэффициента нарушенности от отношения характерных размеров сечений  $A/a$ :

1 — горизонтальная щель; 2 — вертикальная щель; 3 — крестообразный вырез

Рис. 4. Зависимость отношения коэффициентов нарушенности для горизонтальной  $((k_n)_Г)$  и вертикальной  $((k_n)_В)$  щелей от отношения их характерных размеров

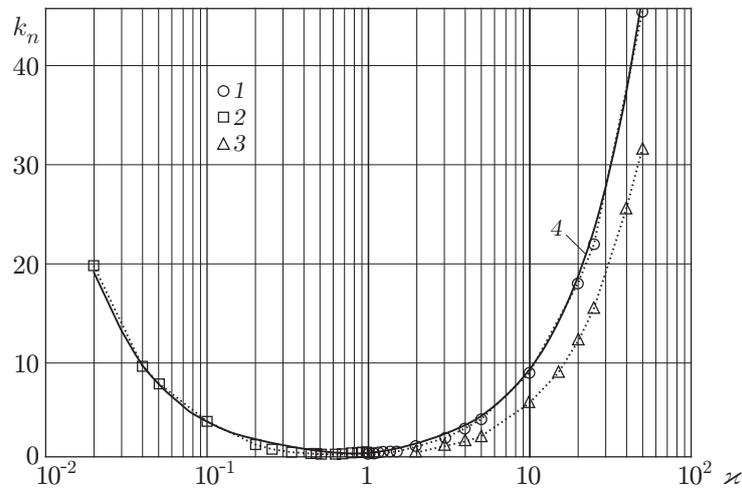


Рис. 5. Зависимости коэффициента нарушенности от  $\varkappa$  (по оси абсцисс шкала логарифмическая):

1 — горизонтальная щель; 2 — вертикальная щель; 3 — крестообразный вырез; 4 — аппроксимирующая зависимость

в случае горизонтальной прямоугольной щели зоны нарушения сплошности расположены вдоль ее большей стороны, а в случае вертикальной щели зоны нарушения сплошности сконцентрированы в окрестности ее торцевых сечений.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента нарушенности  $k_n$  от отношения характерных размеров щелевых вырезов. Видно, что эти зависимости практически линейны и в окрестности горизонтальной щели (линия 1) разрушение массива больше, чем в окрестности вертикальной щели (линия 2).

На рис. 4 представлена зависимость отношения коэффициентов нарушенности массива для горизонтальной  $((k_n)_Г)$  и вертикальной  $((k_n)_В)$  щелей от отношения их характерных размеров. Видно, что при  $A/a > 10$  это отношение монотонно стремится к максимальному значению  $(k_n)_Г / (k_n)_В = 2,459$ , полученному при  $A/a = 4$ .

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента нарушенности от  $\varkappa = b/h$  ( $b$  — горизонтальный размер выреза;  $h$  — вертикальный размер). Кривые коэффициентов нарушенности для щелей хорошо аппроксимируются зависимостью

$$k_n(\varkappa) = \begin{cases} 0,45 + 0,375\varkappa^{-1}, & \varkappa < 1, \\ 1,412 \cdot 10^{-4}\varkappa^2 + 0,916\varkappa + 0,142, & \varkappa > 1. \end{cases} \quad (5)$$

Зависимость (5) при  $\varkappa > 1$  достаточно точно аппроксимирует кривую 1, при  $\varkappa < 1$  — кривую 2.

Из анализа приведенных зависимостей следует:

1. В случае, если щель расположена горизонтально, коэффициент нарушенности массива принимает большее значение, чем в случае вертикального расположения щели. Максимальное значение отношения коэффициентов нарушенности для горизонтальной и вертикальной щелей  $(k_n)_Г/(k_n)_В = 2,459$  достигается при  $A/a = 4$ .

2. Наименьшее значение коэффициента нарушенности  $k_n = 0,915$  получено в окрестности вертикальной щели при  $A/a = 1,5$  (для квадратного выреза  $k_n = 1,077$ ).

3. Значения коэффициента нарушенности для крестообразного выреза занимают промежуточное положение между значениями коэффициентов для горизонтальной и вертикальной щелей и близки к их среднеарифметическим значениям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Эллер А. Ф.** Винтоповоротные проходческие агрегаты / А. Ф. Эллер, В. Ф. Горбунов, В. В. Аксенов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
2. **Ержанов Ж. С.** Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости / Ж. С. Ержанов, В. Ю. Изаксон, В. М. Станкус. Кемерово: Кемеров. кн. изд-во, 1976.
3. **Черданцев Н. В., Черданцев С. В.** Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух горных выработок // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 4. С. 137–139.
4. **Черданцев Н. В., Шаламанов В. А.** Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Изв. вузов. Горн. журн. 2004. № 5. С. 50–54.
5. **Черданцев Н. В.** Некоторые трехмерные и плоские задачи геомеханики / Н. В. Черданцев, В. Ю. Изаксон. Кемерово: Изд-во Кузбас. гос. техн. ун-та, 2004.
6. **Метод** граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике / Под ред. Т. Круза, Ф. Риццо. М.: Мир, 1978.

*Поступила в редакцию 31/VIII 2006 г.,  
в окончательном варианте — 27/II 2007 г.*