УДК 622.241.54

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

## СРАВНЕНИЕ НАРУШЕННОСТИ АНИЗОТРОПНОГО И ИЗОТРОПНОГО МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТОК

м ассив осадочных горных пород, как правило, имеет упорядоченные поверхности ослабления, по которым характеристики прочности существенно ниже, чем по основной породе. Прочность таких пород хорошо иллюстрируется векторной диаграммой прочности [1]. Для пород с одной системой поверхностей ослабления векторная диаграмма представлена на рис. 1, где  $\sigma_0$  предел прочности основной породы, а о предел прочности образца с поверхностями ослабления, составляющими угол  $\theta$ =  $\pi/4 - \varphi/2$ -с линией действия силы,  $\varphi$  - угол внутреннего трения по поверхности ослабления. Если поверхности ослабления направлены под углом друг к другу, векторную диаграмму получают, накладывая диаграммы типа 1a, повернутые под соответствующими углами. На рис. 1, б такая диаграмма построена для породы, имеющей три системы поверхностей ослабления, углы между которыми равны  $60^{\circ}$ . При увеличении поверхностей ослабления и соответственно уменьшении угла между ними векторная диаграмма будет стремиться к окружности радиуса о, т.е. порода превращается в квазиизотропную с пределом прочности о, меньшим оо. Так объясняется «структурное ослабление» пород массива.

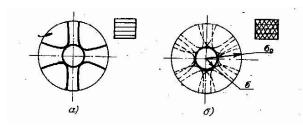
В соответствии со свойством «структурного ослабления» породы в окрестности выработки разрушаются, прежде всего, по поверхностям ослабления, образуя

зоны нарушения сплошности, в которых условия разрушения формулируется согласно теории прочности Мора-Кузнецова следующим образом [1]

$$\tau_{v} \ge \sigma_{v} n + K, \dots \sigma_{v} \ge \sigma_{p},$$
 (1)

где n и K- соответственно коэффициенты внутреннего трения и сцепления,  $\sigma_p$  — предел прочности на разрыв поверхности ослабления, а  $\tau_v$  и  $\sigma_v$  - соответственно касательное и нормальное напряжения по ним, которые определяются с учётом всех компонентов тензора напряжений  $\sigma_{qm}$ , действующих в окрестности.

Плоская задача о напряжённом состоянии в окрестности выреза в геомеханике формулируется аналогично задаче о бесконечной плоскости с отверстием, по сторонах нагруженной гравитационными напряжениями на глубине заложения выработки [2]. Для определения напряжений в окрестности протяженной одиночной выработки применяются аналитические методы, в частности, метод функций комплексного переменного, либо метод граничных элементов (МГЭ), которые позволяют рассчитать непрерывное поле напряжений, необходимое для оценки прочности по регулярным поверхностям ослабления. Положение этих поверхностей (плоскостей) задаётся углами падения а и простирания  $\beta$  (рис. 2). Ось x – ось вы-



работки, а оси y, z — оси её поперечного сечения.

Разрушенные области или зоны нарушения сплошности в окрестности выработки определяются как совокупности точек, в которых произошло разрушение по поверхностям ослабления пород по критериям (1). Степень нарушенности массива в окрестности выработки характеризуется коэффициентом нарушенности  $k_n$ , равного для протяжённых выработок отношению площади зоны нарушения сплошности к площади поперечного сечения выработки.

Задачи по расчёту зон нарушения сплошности массива с одной регулярной системой поверхностей ослабления в окрестности протяженных выработок и их сопряжений выработок решены в [3]. Ниже приведены результаты построения и анализа зон нарушения сплошности массива с несколькими системами поверхностей ослабления в окрестности выработок квадратного и круглого поперечных сечений пролётом в две еди-

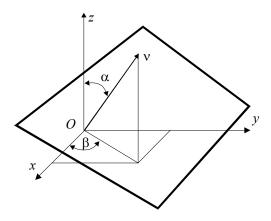


Рис. 1. Векторные диаграммы прочности пород при одной (а) и трех (б) системах поверхностей ослабления

ницы. Зоны нарушения сплошности, полученные посредством суперпозиции зон от каждой отдельной систе-

мы поверхностей ослабления.

Вычислительный эксперимент проведён для двух типах выработок со следующими параметрами среды: поле напряжений гидростатическое –  $\lambda$ =

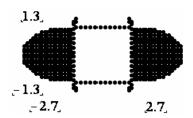
=1, коэффициент сцепления на поверхностях ослабления принят K=0, угол внутреннего трения  $\phi=20^0$ . Углы падения и простирания выбраны так, чтобы параметры зон (размеры и конфигурация) приблизить к квазиизотропному массиву, в котором зоны нарушения сплошности построены согласно критерию Кулона—Мора.

На рис. 3, 4: a,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ , e построены зоны нарушения сплошности под действием одной системы поверхностей (ПО) ослабления различной ориентации в пространстве (шесть положений), на рис. 3, 4:  $\mathcal{H}$ ,  $\mathcal{H}$ ,  $\mathcal{H}$  под действием двух систем ПО, на рис. 3, 4:  $\mathcal{H}$ ,  $\mathcal{H}$  под действием трёх систем ПО, а рис. 3, 4:  $\mathcal{H}$  отражает квазиизотропный случай.

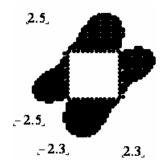
Как следует из рисунков при воздействии двух систем ПО (рис. 3, 4: ж, 3, и) наибольший эффект разрушения даёт схема, представленная

рис. 3, 4: a,  $\delta$ , на которых зоны нарушения «взаимно перпендикулярны». Отличие от квазиизотропного случая составляет менее 5 %. Наименьший эффект разрушения дают системы, представленные на рис. 3, 4: a, a. Отличие от квазиизотропного случая составляет менее 20 % для квадратного сечения и менее 14 % для круглого.

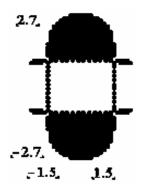
Рис. 2. Положение поверхности ослабления в пространстве



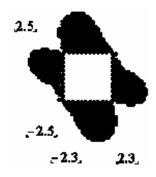
a) 
$$\alpha_1 = 90^{\circ}$$
,  $\beta_1 = 50^{\circ}$ ,  $k_n = 1,52$ 



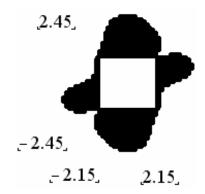
$$\epsilon$$
)  $\alpha_1 = 50^0$ ,  $\beta_1 = 40^0$ ,  $k_n = 1.88$ 



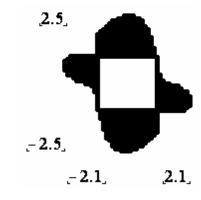
6) 
$$\alpha_2 = 30^0$$
,  $\beta_2 = 0^0$ ,  $k_n = 1.52$ 



$$\partial$$
)  $\alpha_2$ =-50°,  $\beta_2$ =40°,  $k_n$ =1,88



$$e$$
)  $\alpha_3=30^0$ ,  $\beta_3=50^0$ ,  $k'_n=1,71$ 



e) 
$$\alpha_3 = -30^{\circ}$$
,  $\beta_3 = 50^{\circ}$ ,  $k_n = 1,71$ 

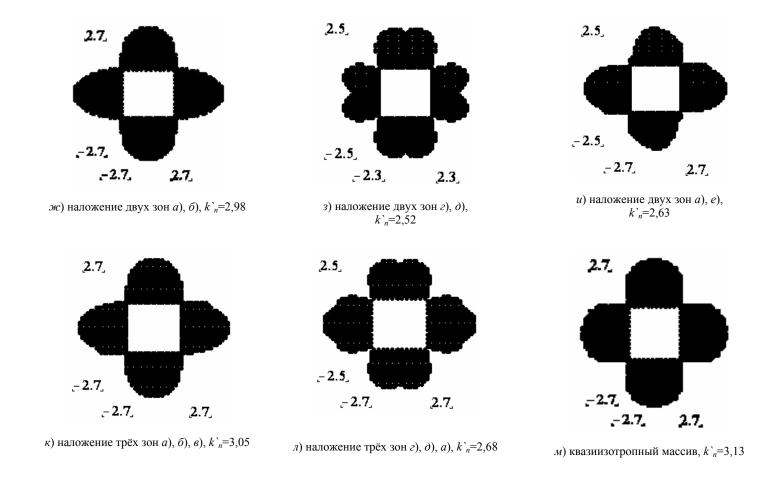
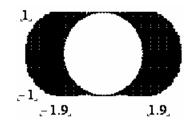


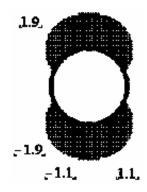
Рис. 3. Зоны нарушения сплошности в окрестности выработки квадратного сечения



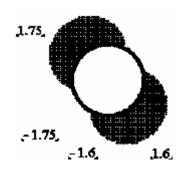
a) 
$$\alpha_1 = 90^{\circ}$$
,  $\beta_1 = 50^{\circ}$ ,  $k_n = 1,198$ 



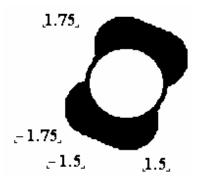
$$\varepsilon$$
)  $\alpha_1 = 50^{\circ}$ ,  $\beta_1 = 40^{\circ}$ ,  $k_n = 1,307$ 



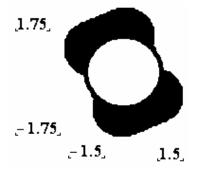
$$δ$$
)  $α_2=30^0$ ,  $β_2=0^0$ .  $k_n=1,374$ 



$$\partial$$
)  $\alpha_2 = -50^{\circ}$ ,  $\beta_2 = 40^{\circ}$ ,  $k_n = 1,307$ 



$$e$$
)  $\alpha_3 = 30^0$ ,  $\beta_3 = 50^0 k_n = 1,246$ 



e) 
$$\alpha_3 = 30^0$$
,  $\beta_3 = 50^0 \, k_n = 1,246$ 

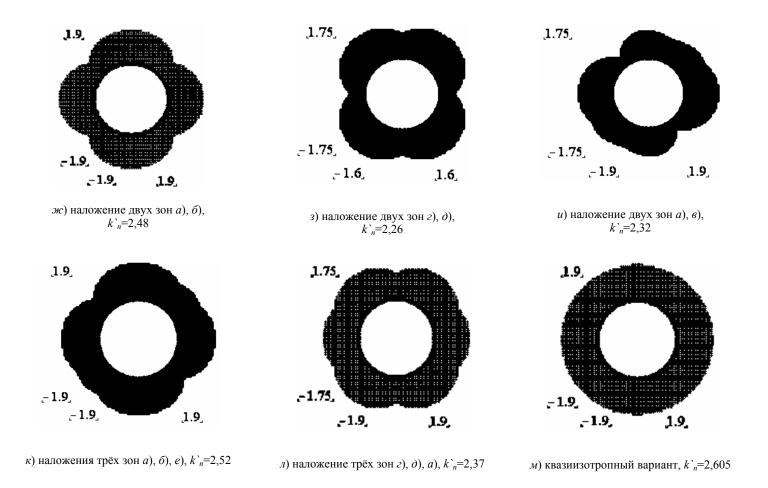


Рис. 4. Зоны нарушения сплошности в окрестности выработки круглого сечения

При наличии трёх систем ПО (рис. 3, 4: к, л) наибольший эффект разрушения даёт суперпозиция зон, представленных на рис. 3. 4: a,  $\delta$ ,  $\epsilon$ . Отличие от изотропного случая составляет около 2,5 % для квадратного сечения и менее 3,3 % для круглого сечения. В то же время наложение третьей системы ПО лишь незначительно **у**величивает нарушения ПО сравнению C cyперпозицией двух систем. Сравнение рис. 3, 4: ж, к даёт только 2 % увеличения площади разрушения для квадратного

сечения и 1,5 % для круглого. Таким образом, суперпозиция уже двух систем ПО, дающая «взаимно перпендикулярное» размещение зон относительно друг друга по вертикали и горизонтали приближает область разрушения к квазиизотропному случаю. Следует отметить, что суперпозиция двух других систем ПО хотя и дающих «взаимно перпендикулярное» размещение зон относительно друг друга под наклоном к вертикали и го-

ризонтали дают меньший эффект разрушения, не смотря на то, что индивидуальные показатели разрушения у них выше. Так сопоставление рис. 3 *а* и *б* рис. 3 *б* и *в* показывает, что индивидуальные показатели разрушения при наклонном разметели разрушения при наклонном разметели

щении зон, выше показателей при горизонтальном и вертикальном размещении примерно на  $20\,\%$ , а суперпозиционный эффект ниже на  $18\,\%$ .

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1. Размеры и конфигурация зон нарушения сплошности существенно зависят от ориентации поверхностей ослабления.
- 2. Уже системы трёх поверхностей ослабления образуют в окрестности выработок зоны нарушения сплошности по размерам и форме близкие к квазиизотропному массиву с такими же характеристиками прочности как на поверхностях ослабления.
- 3. В ряде случаев оказывается, что и две системы ПО образуют зоны нарушения сплошности, практически совпадающие с зонами в квазиизотропном массиве, в котором характеристики прочности такие же как на поверхностях ослабления.
- 4. Размеры и конфигурация зон нарушения сплошности квазиизотропного массива являются предельными для массива с любыми системами поверхностей ослабления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 2. Динник А.Н., Моргаевский А.В., Савин Г.Н. //Тр. совещания по управлению горного давления. М.: АН СССР, 1928. C. 28-39.
- 3. *Черданцев Н.В., Изаксон В. Ю.* Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики. Кемерово: КузГТУ, 2004. 190 с. **ПЛЭ**

## Коротко об авторах

Черданцев Н.В. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Преслер В.Т. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,

*Изаксон В.Ю.* – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки России, лауреат Государственной премии Республики Саха (Якутия),

Институт угля и углехимии Сибирского отделения РАН.

Статья представлена Институтом угля и углехимии Сибирского отделения РАН.

<sup>1.</sup> Ержанов Ж.С., Изаксон В.Ю., Станкус В.М. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчёт устойчивости. - Кемерово: Кемеровское книжное изд–во, 1976. - 216 с.