

УДК 622.241.54

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

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХСВЯЗНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ПРОЧНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Разработка месторождений полезных ископаемых, в частности угля и горючих сланцев, производится, как правило, в массивах осадочных горных пород. В нём сооружается большое количество вырезов – горных выработок и их систем различных форм поперечных сечений. При этом, в первую очередь, необходимо оценить устойчивость этих систем выработок, т.е. их способность сохраняться, не разрушаясь, что определяется напряжённым состоянием массива в их окрестности.

Задачу о напряжённом состоянии в окрестности выреза сформулируем так: в бесконечном массиве в непосредственной близости выреза, расположенного на глубине H действуют напряжения естественного поля (гравитационные, тектонические). Требуется найти напряжённое состояние в любой точке массива в окрестности вырезов. Если их длина, значительно превышает поперечные размеры, то породы в окрестности таких протяжённых вырезов находятся в условиях плоского деформированного состояния. Для решения поставленной задачи авторы использовали численный метод граничных элементов, вытекающий из численного решения граничного интегрального уравнения краевой задачи теории упругости [1, 2]. Этот метод даёт непрерывное поле напряжений, что является необходимым условием для формулирования условий прочности в массиве с регулярными поверхностями ослабления.

Характеризующий поле тензор напряжений σ_{qm} в точке k расчётной области массива, построенной в окрестности выреза в виде сетки, определяется на основе принципа суперпозиции

$$\sigma_{qm,k} = \sigma_{qmt,ij} a_{t,j}^* + \sigma_{qm,k}^e, \quad (1)$$

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

где σ_{qm}^e – компоненты тензора естественного поля напряжений в окрестности выреза, которые в массиве горных пород без тектонических напряжений принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^e &= \lambda\gamma H + \nu(1+\lambda)\gamma H, \quad \sigma_{22}^e = \lambda\gamma H, \\ \sigma_{33}^e &= \gamma H, \quad \sigma_{12}^e = \sigma_{13}^e = \sigma_{23}^e; \end{aligned}$$

γ – объёмный вес горных пород; H – глубина заложения выреза; λ – коэффициент бокового давления; ν – коэффициент Пуассона; σ_{qmt} – тензор напряжений от единичной нагрузки (тензор Кель-

вина), определяемый из [1]; $a_{q,j}$ – вектор фиктивной нагрузки, приложенной к поверхности выреза и определяемый из статических граничных условий; $q, m, t=2, 3; x_1$ – координата, отсчитываемая вдоль оси выработки, x_2, x_3 – оси поперечного сечения выработки; δ_{qm} – символ Кронекера ($\delta_{qm}=1$ при $q=m$, $\delta_{qm}=0$ при $q \neq m$); r – расстояние между серединой граничного элемента и точкой расчётной области.

Массивы с упорядоченными поверхностями ослабления разрушаются в окрестностях вырезов, прежде всего, вдоль них, образуя зоны нарушения сплошности, в которых условие прочности формулируем согласно теории Мора-Кузнецова [3]

$$\tau_\nu \geq \sigma_\nu n + K, \quad (3)$$

где n и K – соответственно коэффициенты внутреннего трения и сцепления поверхностей ослабления, а τ_ν и σ_ν – соответственно касательное и нормальное напряжения по поверхности ослабления, которые определяются с учётом всех компонентов тензора напряжений σ_{qm} , действующих в окрестности выреза (системы вырезов)

$$\sigma_\nu = \sigma_{qm} l_q l_m,$$

$$p_\nu^2 = \sum_{q=2}^3 (\sigma_{qm} l_m)^2 + (\sigma_{11} l_1)^2,$$

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

где l_q, l_m – направляющие косинусы углов нормали к поверхности ослабления, выражаются через углы падения α и простирания β [1], с координатными осями x_1, x_2, x_3 , p_ν – полное напряжение по поверхности ослабления.

Области вокруг вырезов, в которых произошло разрушение пород согласно критерию прочности (3), образуют так называемые зоны нарушения сплошности. Для оценки нарушенности массива в окрестности вырезов и устойчивости целиков между ними введём критерии, представленные коэффициентом нарушенности k_n и интенсивностью нарушения k_n'

$$k_n = S_n / S, \quad k_n' = k_n / a, \quad (4)$$

где S – площадь поперечных сечений вырезов, S_n – площадь зоны нарушения сплошности, a – расстояние между контурами вырезов.

Введённые критерии создают методическую основу для исследования любых модельных многосвязных сред в зависимости от их параметров.

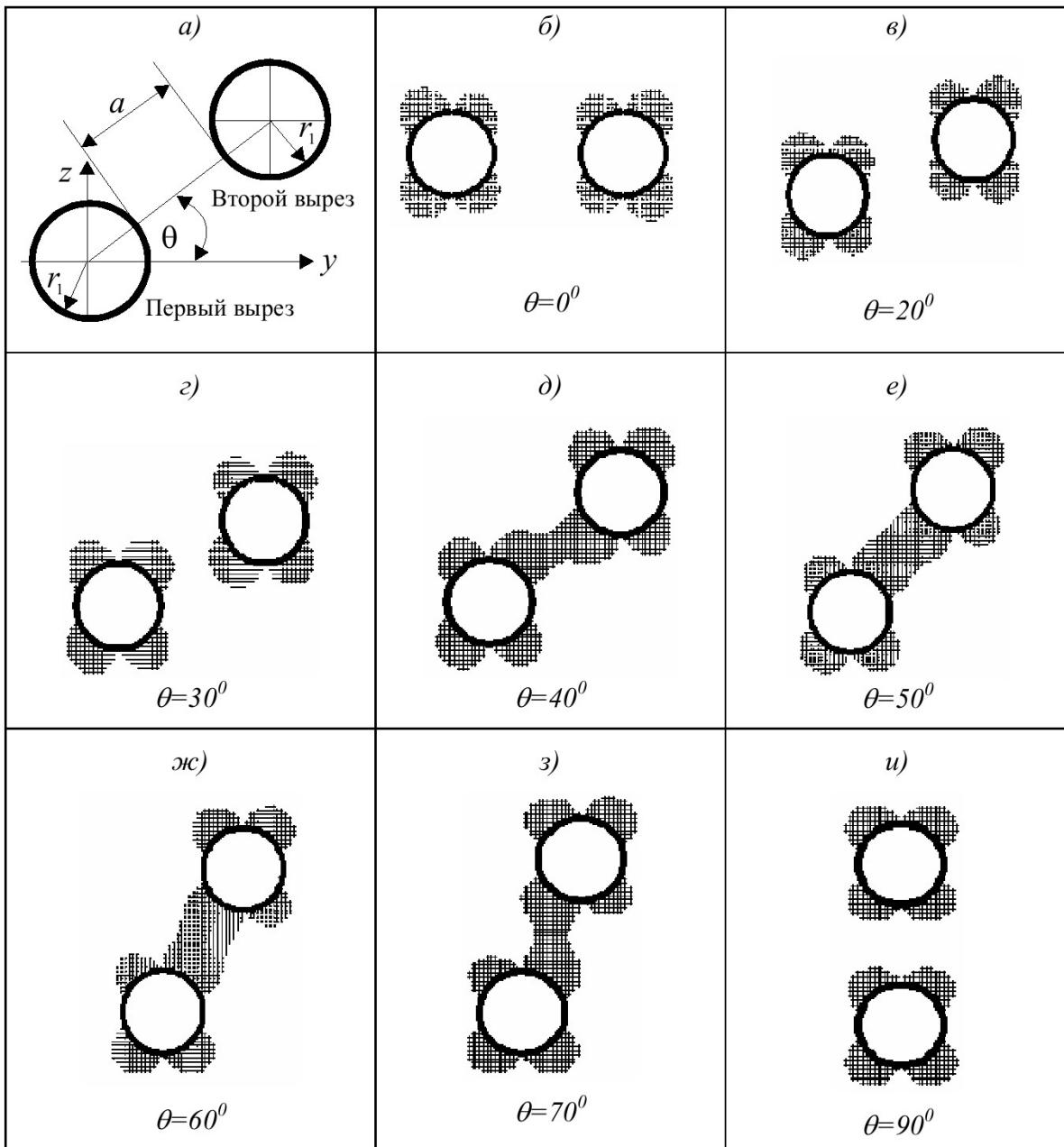


Рис. 1. Расчётная схема двухсвязного массива с круглыми вырезами (а) и картины нарушения сплошности в окрестности вырезов

Под многосвязной средой понимаем массив, вмещающий систему протяжённых вырезов, расположенных в непосредственной близости друг к другу. При определённых характеристиках массива, а также вариантах взаимного расположения вырезов могут возникать ситуации, при которых образующиеся вокруг них зоны нарушения сплошности, сливаются (смыкаются) в единую зону (область неустойчивости). Целик между вырезами, попадающий в область неустойчивости, разрушается, что приводит к образованию единого выреза больших размеров. Исходная система нескольких вырезов перестаёт существовать. Вследствие этого важно установить состояния вырезов, приводящие к образованию областей неустойчивости и определить их положение и размеры. Дан-

ную задачу решаем посредством вычислительного эксперимента, который проводится согласно расчётной схеме рис. 1 (а) при последовательном повороте одного выреза относительно другого и изменяющемся расстоянии между контурами вырезов.

На рис. 1 (б – и) показаны картины с зонами нарушения сплошности в окрестности вырезов при некоторых значениях угла θ и расстояний между контурами $a=2r_1$. Характеристики среды приняты следующими: $\alpha=0^\circ$, $K/\gamma H=0$, $\varphi=20^\circ$, $\lambda=1$.

На рис. 2 приведены графики зависимостей коэффициентов нарушенности от угла θ при его изменении в пределах $0^\circ - 180^\circ$ с интервалом в 5° .

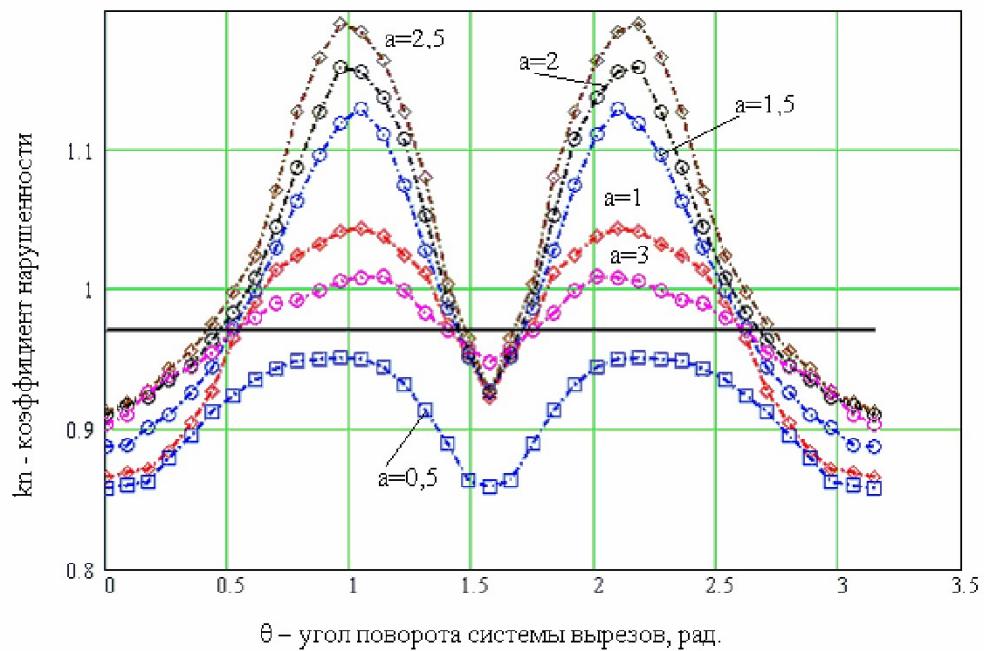


Рис. 2 Графики зависимостей коэффициента нарушенности от угла поворота системы вырезов при различных расстояниях между их контурами

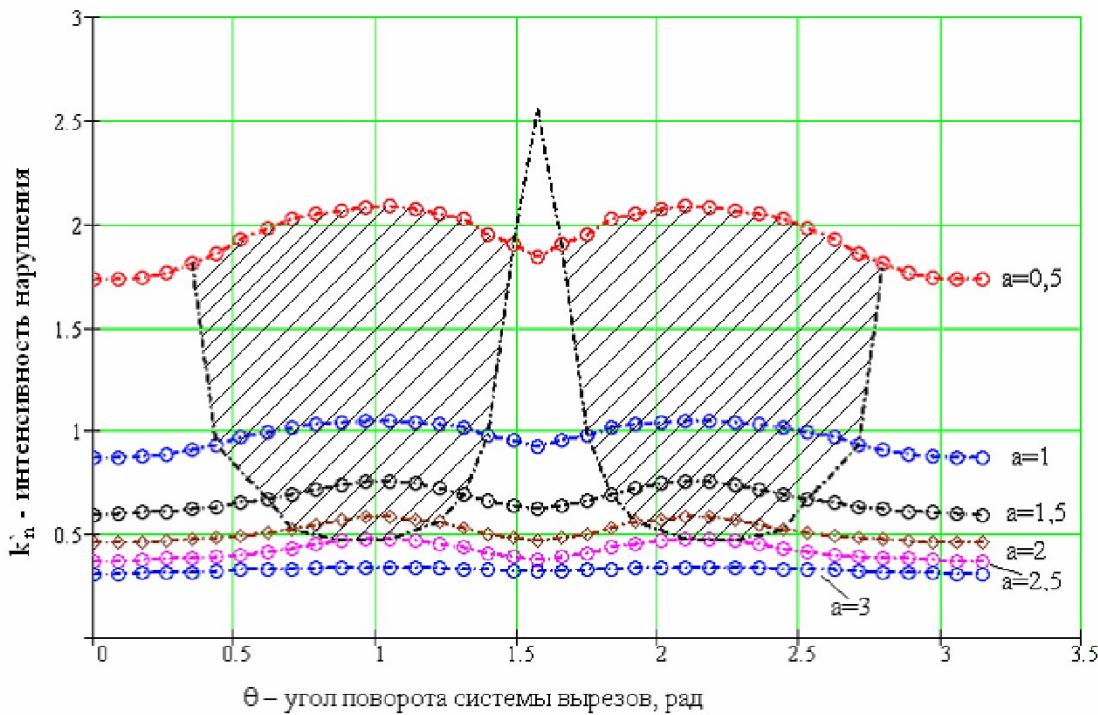


Рис. 3 Графики зависимостей интенсивности нарушения от угла поворота системы вырезов при различных расстояниях между их контурами

Для сравнения показана сплошная линия значения коэффициента нарушенности для круглого одиночного выреза. Графики симметричны относительно вертикали $x=\pi/2$. Из них следует, что по сравнению с одиночным вырезом коэффициент нарушенности имеет большие значения на отдельных участках диапазона изменения угла θ в первой и второй четверти декартовой системы.

Для более детального исследования зон нарушения сплошности в окрестности вырезов и наглядного представления областей неустойчивости использован критерий интенсивности нарушения — k'_n . На рис. 3 показаны диаграммы интенсивностей нарушения в прямоугольной системе для первых двух четвертей, на которых граничные точки начала (конца) смыкания зон нарушения сплошности, соединены линией. Заштрихованная

область является областью неустойчивости системы вырезов и целиков между ними. В третьей и четвёртой четвертях (в нижней координатной полуплоскости) области симметричны относительно оси $\theta=0^\circ$ двум верхним областям.

Как показывают результаты вычислительного эксперимента, четыре области неустойчивости не меняют размеров и формы при повороте поверхностей ослабления на угол α , они лишь перемещаются параллельно исходному состоянию вдоль оси абсцисс, причём, если $\alpha>0$, то области перемещаются вправо, а при $\alpha<0$ – влево.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение коэффициента нарушенности массива в окрестности двух выработок круглого поперечного сечения при изменении положения одной выработки относительно другой в окружном направлении носит периодический, волнобразный характер. При этом наибольшее значение

коэффициента нарушенности достигается, когда угол между поверхностями ослабления и линией, соединяющей центры выработок в первой четверти координатной системы, составляет примерно 55° , а расстояние между ними 2,6 единицы (1,3 пролёта выработки).

2. Области неустойчивости, полученные при горизонтальных поверхностях ослабления и параметрах среды $\lambda=1$, $\beta=90^\circ$, $K/\gamma H=0$, независимо от угла падения α представляют собой диаграмму (выделена штриховой линией и штриховкой на рисунке 3), которая перемещается на угол α при повороте поверхностей ослабления на тот же угол.

3. По значению интенсивности нарушения, вычисленного для конкретных параметров среды и расположения системы вырезов, попадающему внутрь области диаграммы неустойчивости, фиксируется факт неустойчивости массива (целика) около этой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черданцев Н.В., Изаксон В. Ю. Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики. - Кемерово: КузГТУ, 2004.-190 с.
2. Метод граничных интегральных уравнений. Вычислительные аспекты и приложения в механике. Под ред. Т. Круза и Ф. Риццо. - М.: Мир. -1978. - 210 с.
3. 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.

□ Авторы статьи:

Черданцев
Николай Васильевич
- к.т.н., старший научный сотрудник
Института угля и углехимии Сибирского отделения РАН

Преслер
Вильгельм Теобальдович
- д.т.н., ведущий научный сотрудник
Института угля и углехимии Сибирского отделения РАН

Изаксон
Всеволод Юльевич
-д.т.н., проф., главный научный сотрудник Института угля и углехимии Сибирского отделения РАН