УДК 622. 28

Д.Н.ПЕТРОВ, В.И.МОИСЕЕВ, Р.И.ЛАРИОНОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ОДИНОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ В НЕОДНОРОДНОМ МАССИВЕ

Рассмотрено формирование естественного напряженно-деформированного состояния в массиве, сложенном различными средами, и изменение его вследствие проведения горной выработки. Задача решена математическим моделированием, основанным на методе конечных элементов. При моделировании было рассмотрено шесть схем с различными углами падения пород.

The question on formation of the natural is stress-strain condition in a file combined by various environments and its change owing to carrying out of mountain development is considered. The problem is solved by the mathematical modeling based on a finite-element methods. At modeling 6 schemes with various corners of falling of breeds have been considered.

Начальное напряженно-деформированное состояние массива пород и изменение его вследствие ведения горно-строительных работ является важной информацией для проектирования и расчета подземных конструкций. В общем случае массив горных пород представляет собой сложную физическую среду, напряженное состояние которого обуславливается многими структурно-механическими особенностями. Это обстоятельство делает затруднительным математическое описание подобной среды строгими аналитическими методами. В настоящее время большое распространение получили численные методы. Один из них – метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет учесть различные геологические и инженерно-технические факторы и существенно снизить трудоемкость расчета.

Рассмотрим задачу о распределении начальных напряжений и в ослабленном выработкой массиве, сложенном из трех различных пород (сред). Породы моделируются изотропными линейно деформируемыми средами с модулем деформации $E = 1{,}3 \cdot 10^4$; $3 \cdot 10^4$; $5 \cdot 10^4$ МПа соответственно, коэффициент Пуассона для всех сред принят равным 0,25.

Для уточнения расчетной схемы и размеров элементов, сравним результаты, полученные аналитическим и численным методами. В табл.1 приведено распределение вертикальных напряжений в однородном упругом массиве вокруг выработки кругового очертания. Как видно, погрешность между решениями не превышает 7 %, поэтому примем результаты, полученные для данной модели, за базовые. В дальнейшем по ее параметрам НДС определяются коэффициенты концентрации вертикальных и горизонтальных напряжений в любой точке моделируемой области.

Таблица 1

Закономерности распределения напряжений около контура выработки

Метод расчета	Напряжения σ_y, МПа, на расстоянии от контура выработки, м									
	0	2	4	6	8	10	12	14	18	22
Аналитический метод	32,00	14,75	13,04	12,55	12,34	12,23	12,17	12,13	12,08	12,06
МКЭ	29,93	14,71	12,92	12,40	12,19	12,09	12,05	12,03	11,97	11,96
Погрешность, %	6,47	0,28	0,92	1,19	1,23	1,18	0,93	0,83	0,90	0,77

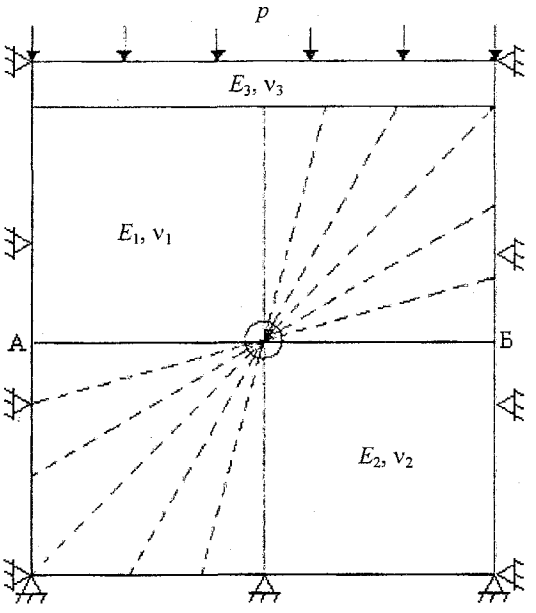


Рис.1. Расчетная схема

Моделирование сводится к двум этапам: задание в массиве начального напряженного состояния путем приложения к верхней грани плоскости вертикального давления $p = 12$ МПа и удаление из массива

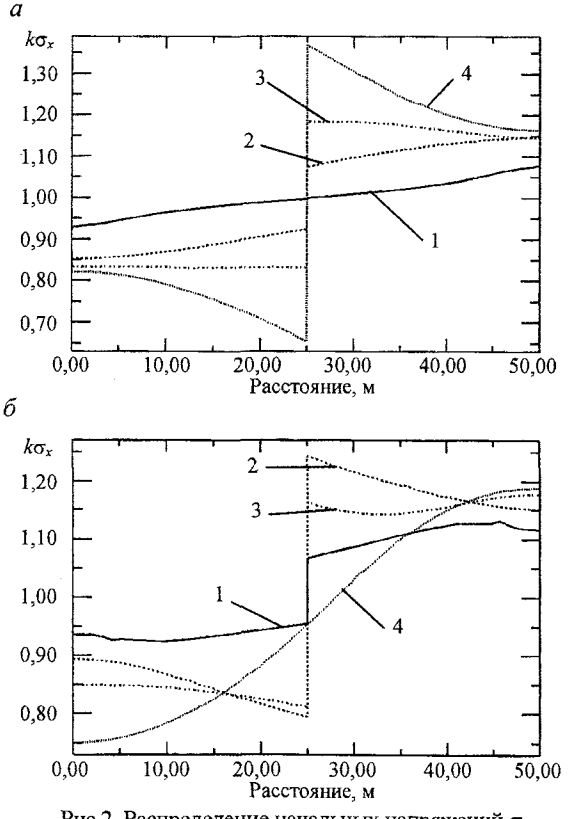


Рис.2. Распределение начальных напряжений σ_y в массиве

1, 2, 3, 4 – углы залегания пород соответственно 15, 45, 60, 90°

элементов, входящих в сечение выработки. По нижней грани моделируемого участка запрещается перемещения по оси y, а по боковым граням – по оси x. Сетка конечных элементов разбивалась таким образом, чтобы на контуре выработки и границе контакта сред размер элементов был наименьшим (≈ 0,2 м), а на периферии – увеличивался до 5 м. Угол залегания пород, для различных вариантов модели менялся от 15 до 90° с интервалом в 15°. Расчетная схема моделируемого участка приведена на рис.1.

Рассмотрим изменение коэффициента концентрации вертикальных σ_y (рис.2, *а*) и горизонтальных σ_x (рис.2, *б*) напряжений в нетронутом массиве, по линии А-Б. При углах залегания пород 15-45° вертикальные напряжения плавно перетекают из одной среды в другую с незначительным скачком на их контакте. По мере удаления от контакта, в слабой среде происходит снижение, а в более жесткой увеличение напряжений σ_y на 10-15 % от базовых. В модели с углом залегания 60° характерно, что величина коэффициента концентрации вертикальных напряжений остается постоянной как в среде, так и на контакте.

При углах залегания до 75 и 90° картина распределения напряжений существенно меняется. В приконтактной зоне происходит резкий скачок напряжений, разница между которыми доходит до 70 %. В слабой среде ярко выражена область разгрузки, напряжения в которой уменьшены на 10-20 % по сравнению с фоновыми. В более жесткой среде значительно усилилась концентрация вертикальных напряжений, с удалением от контакта напряжения постепенно снижаются от максимума (15-25 %) до уровня фоновых.

Характер изменения коэффициента концентрации горизонтальных напряжений: при углах 15 и 30° напряжения увеличиваются в жесткой среде и уменьшаются в слабой, при 45° – принимают максимальные (до 1,25) и минимальные (до 0,8) значения соответственно, при больших углах падения напряжения в приконтактной зоне выравниваются. В боках с увеличением угла падения пород в слабой среде концентрация напряжений σ_x уменьшается, в жесткой – увеличивается.

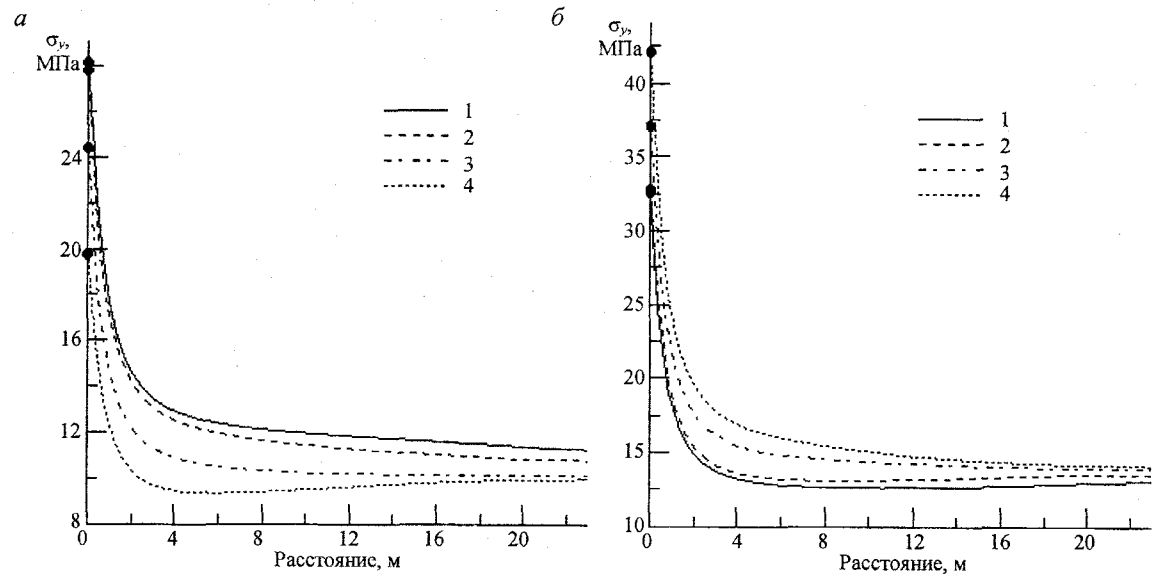


Рис.3. Распределение напряжений σ_y в массиве вокруг выработки кругового сечения

1, 2, 3, 4 – углы залегания пород соответственно 15, 30, 60, 90°

Рассмотрим распределение напряжений в массиве после проведения выработки кругового сечения. На рис.3, *а* показаны эпюры напряжений в слабой среде (слева от выработки), на рис.3, *б* – в более жесткой среде (справа от выработки). Анализируя полученные результаты, приходим к следующим выводам. При углах залегания пород до 60° отличия между эпюрами носят лишь количественный характер. Максимальная концентрация напряжений σ_y происходит на контуре выработки. По мере удаления от контура концентрация напряжений быстро убывает и при $l = 8$ м (4 радиуса выработки) практически исчезает. Коэффициенты концентраций $k_\sigma = \sigma_y/p$ при различных углах залегания пород справа и слева от выработки приведены в табл.2. При схемах с углами больше 60° напряжения σ_y также максимальны на контуре выработки, далее они резко убывают и на расстоянии $l \approx 4$ м (2 радиуса выработки) принимают наименьшие значения, после чего плавно возрастают до уровня фоновых напряжений нетронутого массива.

На рис.4 приведено изменение коэффициента концентрации вертикальных напряжений (по отношению к аналогичному для выработки пройденной в однородном массиве) в боках выработки в зависимости от угла падения пород.

Таблица 2

Значения коэффициентов концентрации в зависимости от угла залегания пород

Среда	Коэффициент концентрации напряжений k_σ при углах залегания пород					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Слабая	2,35	2,32	2,24	2,03	1,81	1,64
Жесткая	2,71	2,73	2,83	3,08	3,35	3,50

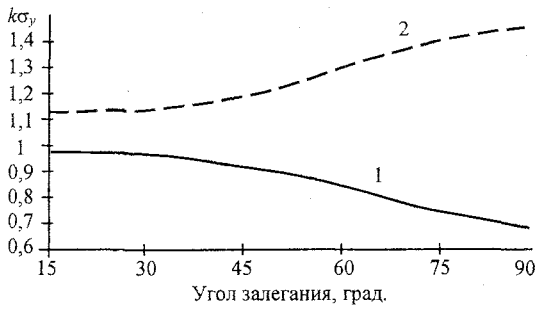


Рис.4. Зависимость коэффициента концентрации вертикальных напряжений от угла падения пород для левого (1) и правого (2) бока

Таким образом, методом конечных элементов выявлены закономерности формирования напряженного состояния неоднородного массива пород при различных углах залегания пород:

- с увеличением угла залегания пород в нетронутом массиве резко увеличивается разность между напряжениями на контакте сред, более жесткая среда характеризуется концентрацией напряжений, слабая – разгрузкой;
- максимальная (минимальная) концентрация напряжений находится на контуре выработки при угле залегания пород 90° в жесткой (слабой) среде и составляет 3,5 (1,64) по отношению к начальному напряженному состоянию однородного массива, по мере уменьшения угла величина концентрации напряжений на контуре выработки выравнивается;
- в массиве, сложенном из различных сред, более жесткая из них служит защитным экраном для менее слабой.