

УДК 622.831.244

А.Б. Владыко, О.Е. Хоменко, С.А. Козлов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОЧИСТНЫХ КАМЕР В УСЛОВИЯХ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ЗАО “ЗАПОРОЖСКИЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ КОМБИНАТ”

Проаналізовано теоретичні засади розрахунку фільтрації води в напружено-деформованому масиві, що оточує очисну камеру. Виконано прогноз стійкості очисних камер за допомогою метода кінцевих елементів. Визначено величини напружень на різних глибинах залежно від фізико-механічних властивостей масиву.

Проанализированы теоретические основы расчета фильтрации воды в напряженно-деформированном массиве окружающим очистную камеру. Выполнен прогноз устойчивости очистных камер с помощью метода конечных элементов. Определены величины напряжений на различных глубинах в зависимости от физико-механических свойств массива.

Theoretical bases to calculate tense - deformed conditions and ground water flow in rocks, surrounding the clearing chamber are analyzed. Stability of clearing chambers is forecasted by the final element. Methods tense - deformed conditions around the chamber, pressure on various depths are determined by modeling depending on physical and mechanical properties of rocks.

Постановка проблемы. Ежегодное понижение уровня горных работ до 20 м повышает общешахтные затраты в себестоимости добычи товарной руды до 53%. Условие минимизации себестоимости выполняется при оптимизации технологических параметров разработки. Это и геометрические размеры очистных камер, скорости проведения подготовительных выработок и другие. Одним из критериев оптимизации является прогнозирование поведения системы “горная выработка – обводненный массив”. Использование современных компьютерных программ позволяет решать задачи прогнозирования.

Связь проблемы с научно-исследовательскими заданиями. Для решения поставленной задачи требуется более полная информация о строении и свойствах массива горных пород. Важнейшей частью методов прогнозирования являются характеристики напряженно-деформируемого состояния (НДС) нетронутого массива горных пород, а также данные о напряжениях, которые возникают при проведении горных выработок. Используемые методы расчета напряжений и деформаций это методы, которые применяются в теории упругости и пластичности, механике горных пород и других областях науки.

Анализ последних достижений и публикаций. Развитие численных методов прогнозирования опирается на успехи алгебры и прогрессирующее развитие компьютерной техники. Среди численных методов наиболее универсальным является метод конечных элементов (МКЭ), который применяют для моделирования сложных геотехнологических условий разработки как рудных, так и нерудных месторождений. Применительно к подобным задачам метод применялся В.И. Бондаренко, Ж.С. Ержановым, А.Б. Фадеевым, О.М. Шашенко, Г.В. Бабиюком и др. [1].

Выделение нерешенной задачи. Увеличение глубины разработки месторождения повышает величину напряжений в массиве, а наличие остаточной воды в породах ведет к существенному уменьшению их несущей способности даже в условиях осушения запасов. Это замедляет темпы проходки подготовительных и нарезных выработок и зачастую приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Постановка задания. Одним из способов решения задачи является управление состоянием массива на основе прогнозных моделей НДС горных пород и фильтрации в них. Задачи прогноза фильтрации в горных породах, находящихся в НДС состоянии тесно связаны между собой. Процессы фильтрации влияют на свойства горных пород и, соответственно, на формирование НДС вокруг выработки. В свою очередь, изменения напряжений в массиве горных пород влияют на проницаемость горных пород. Таким образом, расчет прочности окружающих пород необходимо выполнять с учетом насыщенности массива водой.

Основная часть. При расчете НДС массива наибольшее распространение в мировой практике получил МКЭ. Применительно к задачам механики горных пород МКЭ дает возможность более естественно учесть структурные особенности пород (неоднородность состава, трещиноватость, анизотропию, фильтрацию), конструктивный характер взаимодействия крепей с окружающими породами и т.д.

К преимуществам МКЭ относится и то, что после формулировки конкретной задачи и соответствующей аппроксимации исследуемой области конечными элементами процесс последующего расчета строится по стандартному образцу. При расчетах для выбранных форм конечных элементов формируется матрица жесткости элемента, которая устанавливает

связь между узловыми силами и перемещениями в направлении действия сил. Далее строится разрешающая система алгебраических уравнений, решение которой позволяет определить неизвестные перемещения узлов, что позволяет вычислить деформированное и напряженное состояние исследуемой области массива.

Методика расчета НДС. Малые напряжения и деформации могут быть связаны известными соотношениями Гука. При возникновении пластической деформации эти соотношения нарушаются. В общем случае связь описывается критериями Кулона. Используя МКЭ, можно решить две задачи совместно. При расчете НДС формируем замкнутую область, в которой задаются пространственные координаты выработки и параметры вмещающих слоев, а также уровень грунтовых вод [2, 3].

1. Статическое равновесие в области расчета определяется на основе уравнения

$$L^T \bar{\sigma} + \bar{p} = 0, \quad (1)$$

связывающего пространственные производные шести компонентов напряжения, представленных вектором $\bar{\sigma}$ с тремя компонентами сил тела (вектор \bar{p}). Здесь L^T – транспонированный дифференциальный оператор.

2. Одновременно с уравнением равновесия (1) модель включает кинетическое соотношение:

$$\bar{\varepsilon} = Lu, \quad (2)$$

где u – смещения элементов. Это уравнение связывает шесть компонентов напряжения вектора $\bar{\varepsilon}$ с пространственными производными трех компонентов смещения.

3. Связь между уравнениями (1) и (2) устанавливаем через отношения между напряжениями и деформациями, отражающие свойства и поведение материала

$$\bar{\sigma}' = \bar{M} \bar{\varepsilon}'. \quad (3)$$

Комбинация (1), (2) и (3) дает уравнение второго порядка в частных производных относительно смещения \bar{u} .

4. Удобным способом решения задач является метод, основанный на вариационном принципе Галеркина

$$\int \delta \underline{u}^T \left(\underline{L}^T \bar{\sigma} + \bar{p} \right) dV = 0. \quad (4)$$

В этой формулировке $\delta \underline{u}$ представляет собой кинематическое допустимое изменение смещений.

Методика расчета фильтрации

5. Составляющие в плоско-вертикальном потоке записываются в виде

$$q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}; \quad q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (5)$$

где k_x, k_z – коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях.

6. Напор h определяется следующим образом:

$$h = z - \frac{p}{\gamma}, \quad (6)$$

где z – высота, p – давление жидкости в порах, γ – ее удельный вес.

7. Для установившегося потока уравнение неразрывности принимает вид

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

8. Для одновременного расчета фильтрации в насыщенной и ненасыщенной зонах, в (5) вводится корректирующий множитель k' , который учитывает проницаемость пород в условиях неполного насыщения. Подставляя (5) в (7), получим уравнение стационарной фильтрации в неоднородном массиве

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K' K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K' K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0. \quad (8)$$

9. Напор грунтовой воды в пределах отдельного элемента может быть определен по значениям в узлах

$$\phi(\xi, \eta) = N \phi^e, \quad (9)$$

где N – вектор функций формы, ξ и η – локальные координаты в пределах элемента.

Аппроксимация вида (9) приводит к системе уравнений относительно напора в узлах конечно-элементной сетки. Согласно уравнению (5) удельный расход может быть определен с помощью матрицы, которая содержит пространственные производные интерполируемых функций.

Моделирование НДС и фильтрации массива горных пород. Месторождение богатых железных руд, разрабатываемое ЗАО “Запорожский железорудный комбинат”, представлено крутопадающей залежью мощностью до 90 м. Угол падения залежи составляет около 70°. Висячий блок представлен кварцитами, а лежащий – песчаниками и сланцами. Между ними залегает песчано-сланцевая прослойка мощностью до 10 м.

Целью моделирования было сравнить НДС вокруг очистных камер, заложенных на горизонтах 740 и 940 м. Расчетная схема принятой к моделированию очистной камеры показана на рис. 1, а. Окружающую камеру массив представлен плоской моделью с треугольными конечными элементами. Расчетная область состояла из 195 конечных элементов и 95 узлов.

Для имитации исходного поля гравитационных напряжений на верхнюю границу модели прикладывается продольная нагрузка $\gamma H = 15,5$ на глубине 740 м и $\gamma H = 24,5$ на глубине 940 м. Породный массив представлен пятью слоями, что соответствует реальному залеганию пород вокруг камеры (рис. 1, б). Значения параметров для каждого слоя приведены в табл. Расчет производился для пород естественной влажности 13% и обводненной породы 25%. Зоны сжимающих напряжений, приведенные на рис. 1, б-в соответствуют результатам, полученным с помощью других методов моделирования и наблюдений в натуральных условиях.

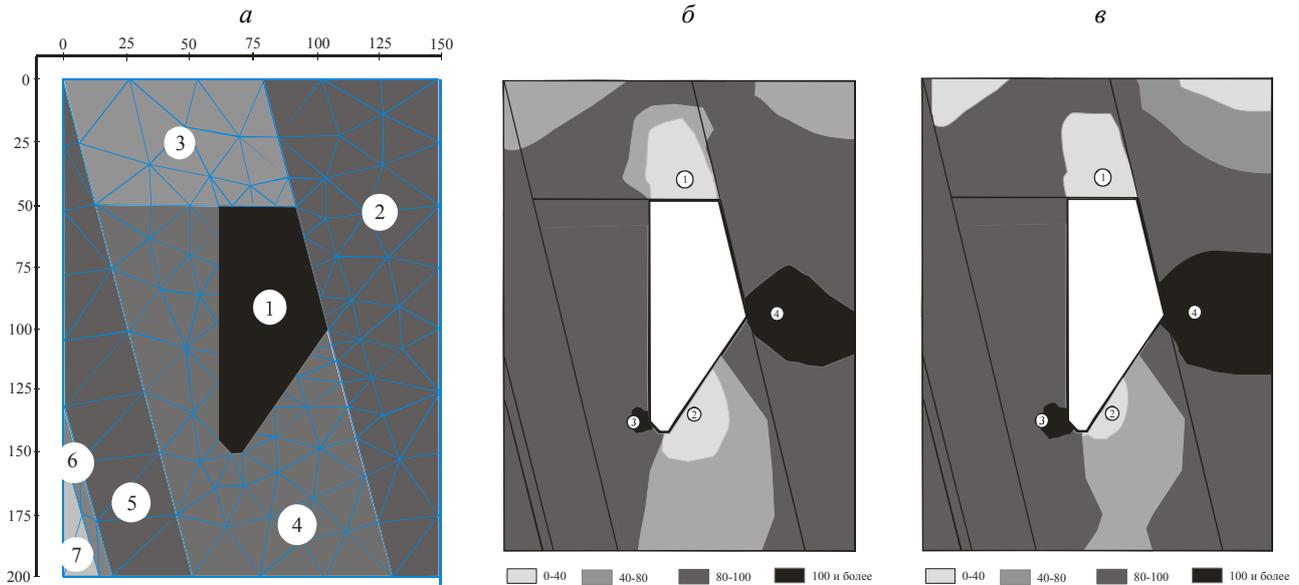


Рис. 1. Расчетная схема принятой к моделированию очистной камеры (а) (камера 1, кварциты 2, закладка 3, железные руды 4, песчаник 5, карбонат-сланцевый прослой 6, сланцы 7; зоны сжимающих напряжений на глубине 740 м (б) и 940 м (в), кН/м²

Таблица

Характеристика слоев пород, вмещающих очистную камеру

Параметр	Индекс	Руда	Кварцит	Сланец	Песчаник	Прослой
Удельный вес пород, кН/м ³	γ_{unsat}	44,0	44,0	32,0	27,0	32,0
Удельный вес насыщенных пород, кН/м ³	γ_{sat}	48,0	48,0	38,0	20,0	38,0
Проницаемость массива в горизонтальном направлении, м/сут.	k_x	0,7*	0,6	0,7	0,9	0,65
		0,8	0,8	0,8	1,0	0,8
Проницаемость массива в вертикальном направлении, м/сут.	k_y	0,8	0,8	0,7	1,1	0,9
		0,9	0,9	0,8	1,0	0,8
Модуль Юнга, кН/м ²	E_{ref}	5026	7164	6192	6052	6192
		6283	9331	7741	7566	7741
Коэффициент Пуассона	ν	0,18	0,25	0,14	0,12	0,14
		0,2	0,3	0,16	0,13	0,16
Сцепление, кН/м ²	c_{ref}	1,8	1,8	1,3	1,7	1,9
		2,0	2,0	1,4	2,0	2,0
Угол трения, град.	φ	55,0	55,0	55,0	54,0	55,0

Примечание: * числитель – горизонт 740 м, знаменатель – 940 м.

Выводы. Расчеты показывают, что с увеличением глубины заложения очистных камер повышается уровень напряженности пород. Для обводненных пород напряжения существенно не изменяются, поэтому приводятся данные для естественной влажности массива 13%. По величине напряжений, представленных на рис. 1, можно выделить четыре основные зоны: зона 1 находится вверху камеры, 2 – внизу. В них напряжения изменяются от 0 до 60 кН/м². Зоны 3 и 4 характеризуются напряжениями от 80 до 100 кН/м² и более. С увеличением глубины зона 1 уменьшается до 15%, а зона 2 – в 2 раза. Зона 3 увеличивается, но остается незначительной. Зона 4 увеличивается до 30%.

Список литературы

1. Бабіюк Г.В. Системне обґрунтування й розробка адаптивних способів забезпечення надійності гірничих виробок: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Д., НГУ, 2004. – 35 с.
2. Молчанов И.Н., Николаенко Л.Д. Основы метода конечных элементов. – К.: Наукова думка, 1989. – 272 с.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 271 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Бузилом 01.02.07