УДК 622.273.212.001.57

Рубчевский Юрий Игоревич

аспирант кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2 e-mail: <u>yura1991gs@mail.ru</u>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ЗАКЛАДОЧНОМ МАССИВЕ

Аннотация:

В работе рассмотрено Яковлевское месторождение богатых железных руд, отрабатываемое комбинированной системой разработки, предусматривающей на первом этапе отработку слоев с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. На базе упругопластической модели определены напряженнодеформированные состояния (НДС) закладочного массива и рассмотрено формирование НДС вокруг выработки в зависимости от глубины разработки рудной залежи.

Ключевые слова: железные руды, закладочный массив, напряженно-деформированное состояние

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.065

Rubchevsky Yury I.

postgraduate student of mining facilities and underground structures construction department, The National mineral resources university (Mining University), 199106, St Petersburg, Vasiljevsky island, 21st Line, 2 e-mail: <u>yura1991gs@mail.ru</u>

GEO-MECHANICAL PROCESSESS MODELING DURING MINING WORKINGS DRIVING IN THE FILLING MASS

Abstract:

The description of Yakovlevsky rich iron ore deposit, mined by combined system, providing for layers development with filling worked-out area by hardening mixtures at the first stage is considered in the article. In terms of elastic and plastic model the filling mass stressed-deformed state (SDS) is determined and the SDS formation around the mining working, depending on the depth of ore deposit development is cited.

Key words: iron ores, filling mass, stressed-deformed state

Введение

Яковлевское месторождение Курской магнитной аномалии (КМА) по ценности и запасам богатых железных руд, по сложности горнотехнических, геологических и гидрогеологических условий является уникальным [1 – 3].

Оно состоит из пород кристаллического фундамента и покрывающей осадочной толщи мощностью порядка 550 м [4 – 6].

Разработка месторождения на первом этапе осуществляется слоевой системой с последующим переходом на высокопроизводительную камерную систему разработки. При этом возникает необходимость проведения и поддержания подготовительных выработок в закладочном массиве. Для описания модели поведения рудного и закладочного массивов было использовано численное моделирование с применением метода конечных элементов (МКЭ) [7].

Методика

Задача по определению НДС закладочного массива решена в плоской постановке. Реальный массив заменялся весомой конечной областью (рис. 1). Выбран способ задания граничных условий, при котором запрещаются перемещения по боковым граням области по оси x и по нижней грани по оси y. Естественное напряженно-деформированное состояние массива задавалось вертикальными и горизонтальными напряжениями, приложенными к граням конечно-элементной модели. Величина вертикальных напряжений принята на основании ранее выполненных расчетов НДС неоднородного рудного массива после проведения работ по осушению первоочередного участка отработки на границе «известняки карбона – рудное тело» [8].



Рис. 1 – Расчетная схема конечно-элементной модели

Коэффициент бокового распора определялся по формуле:

$$\lambda = \mathrm{tg}^2 \frac{90 - \varphi}{2}, \tag{1}$$

где ф – угол внутреннего трения рассматриваемой руды.

Таким образом, вертикальные напряжения составили $\sigma_y = 7$ МПа, а горизонтальные $\sigma_x = \lambda \gamma H = 3$ МПа.

Модель представляет собой участок массива размером 140×200 м, который разбивался на 51359, 57067, 67659 и 72599 плоских четырехузловых элемента в зависимости от постановки задачи. На рис. 2 представлен один из вариантов моделирования – конечно-элементная сетка при нисходящей отработке 3 слоев под защитным перекрытием. Размеры элементов в районе выработки составляли 0,2 м, а по мере удаления увеличивались и на границах модели доходили до 5 м.

Для обоснования геомеханической модели закладочного массива были проведены экспериментальные исследования образцов керна закладочного материала марок прочности М100 и М40. На основании полученных диаграмм можно было выделить два ярко выраженных участка: упругий участок (1) и предельное состояние (2), которые охарактеризовали упруго-пластическое деформирование закладочного материала, что позволяет применить упруго-пластическую модель для изучения геомеханических процессов в закладочном массиве [9].



Рис. 2 – Фрагмент сетки конечных элементов при нисходящей отработке 3 слоев под защитным перекрытием

Физико-механические свойства закладочного материала марок М100 и М40 и рыхлых железнослюдково-мартитовых руд, применяемые в модели, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование руд и материалов		Модуль деформации Е, МПа	Коэффициент Пуассона µ	Удельный вес ρ, MH/м ³	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения ф, град
Рыхлая железнослюдково- мартитовая руда		1300	0,26	0,034	2,9	25
Закладочный материал	M100	7200	0,20	0,019	2,38	22
	M40	5500	0,18	0,019	1,11	20

Физико-механические свойства рыхлых железнослюдково-мартитовых руд и закладочного материала

Результаты

При постановке задачи было решено рассмотреть четыре варианта моделирования НДС закладочного массива вокруг выработки: при ее расположении во 2-м, 3-м, 4-м и 5-м слоях под защитным перекрытием (соответственно, гор. -378 м, -382 м, -386 м, -390 м). Пример выработки, пройденной в закладочном массиве в 4-м слое под защитным перекрытием приведен на рис. 3.



Рис. 3 – Выработка, пройденная в закладочном массиве, в 4-м слое (гор. -386 м), при отработке четырех слоев под защитным перекрытием

При отработке 2, 3, 4 и 5 слоев под защитным перекрытием решение, соответственно, состояло из 20, 26, 32 и 38 последовательно выполняемых шагов.

После окончания нисходящей отработки слоев и формирования закладочного массива вокруг последнего происходит перераспределение полей напряжений [10 – 12]. Это, в свою очередь, формирует новые поля вертикальных и горизонтальных напряжений на контуре закладочного массива (рис. 4).

Таким образом, вертикальные напряжения на контуре закладочного массива при отработке 4 слоев под защитным перекрытием составили $\sigma_y = 5,9$ МПа, а горизонтальные $\sigma_x = 2,6$ МПа. Для варианта отработки 2, 3 и 5 слоев под защитным перекрытием величины вертикальных напряжений составили, соответственно, 5,5, 5,7 и 6,0 МПа, а горизонтальных напряжений 2,1, 2,4 и 2,7 МПа.

На заключительном шаге моделирования (20, 26, 32 и 38 шаг моделирования) были получены значения коэффициента концентрации максимальных главных напряжений и смещений на контуре выработки, пройденной в закладочном массиве (рис. 5).



Рис. 4 – Значение вертикальных и горизонтальных напряжений на контуре сформированного закладочного массива при отработке 4 слоев под защитным перекрытием



Рис. 5 – Значение коэффициента концентрации максимальных главных напряжений (а) и смещений (U, мм) (б) на контуре выработки, пройденной в закладочном массиве под защитным перекрытием, при отработке 4 слоев под защитным перекрытием

Выводы

Анализ данных, полученных при моделировании проведения горной выработки в сформировавшемся закладочном массиве, позволяет сделать следующие выводы:

– после слоевой отработки рудного массива и выполнения закладочных работ происходит изменение НДС на границах закладочного массива, что, в свою очередь, влияет на формирование новых полей вертикальных и горизонтальных напряжений на его контуре. При этом вертикальные и горизонтальные напряжения увеличиваются, соответственно, на 9,1% и 28,6 %, от 5,5 МПа и 2,1 МПа при отработке 2 слоев под защитным перекрытием до величины 6,0 МПа и 2,7 МПа при отработке 5 слоев под защитным перекрытием, с ростом глубины разработки (рис. 6);

 необходимо отметить тот факт, что с увеличением глубины разработки рудной залежи происходит рост значений коэффициента концентрации максимальных главных напряжений и смещений на контуре выработки, пройденной в закладочном массиве (см. рис. 5). Коэффициент концентрации максимальных главных напряжения и смещения увеличивается, соответственно, на 7,3 % и 27,8 %, от 3,16 и 9,7 мм для выработки, пройденной в закладочном массиве во 2-м слое, до величин 3,39 и 12,4 мм для выработки, пройденной в закладочном массиве в 5-м слое, с ростом глубины разработки (рис. 7).



Величина вертикальных напряжений на контуре закладочного массива
Величина горизонтальных напряжений на контуре закладочного массива





 Коэффициент концентрации максимальных главных напряжений на контуре выработки

— Величина максимальных смещений на контуре выработки

Рис. 7 – Зависимость изменения коэффициента концентрации максимальных главных напряжений и смещений на контуре выработки, пройденной в закладочном массиве, от глубины разработки

Литература

1. Трушко В.Л. Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения / В.Л. Трушко, А.Г. Протосеня, Р.Э. Дашко // Записки горного института. - 2010. - Т. 185. - С. 9-18.

2. Дашко Р.Э. Исследование возможности прорывов подземных вод из нижнего каменноугольного водоносного горизонта в горные выработки Яковлевского рудника / Р.Э. Дашко, А.В. Волкова // Записки горного института. - 2006. - Т. 168. - С. 142–148.

3. Дашко Р.Э. Инженерно-геологическая характеристика и оценка богатых железных руд Яковлевского рудника / Р.Э. Дашко // Записки горного института. - 2006. - Т. 168. - С. 97–104.

4. Сергеев С.В. Опыт разработки богатых железных руд Яковлевского месторождения КМА / С.В. Сергеев, А.И. Лябах, Д.А. Зайцев // Научные ведомости БелГУ. - 2011. - №3 (14). - С. 200 - 208.

5. Зыков Д.Б. Исследование прочностных и деформационных свойств гидрогематитовых руд Яковлевского месторождения / Д.Б. Зыков, Д.Н. Петров // Записки Горного института. - 2005. - Т. 167. - С. 141 - 144.

6. Зубов В.П. Концепция отработки Яковлевского железорудного месторождения на участках богатых железных руд / В.П. Зубов, А.А. Антонов // Записки Горного института. - 2006. - Т. 168. - С. 203 - 210.

7. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

8. Потемкин Д.А. Моделирование процессов сдвижения массива горных пород при нисходящем порядке отработки рудного тела Яковлевского месторождения / Д.А. Потемкин // Записки Горного института. - 2007. – Т. 168. - С. 137 - 141.

9. Трушко В.Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния закладочного массива при проведении подготовительных выработок / В.Л. Трушко, Ю.И. Рубчевский // Естественные и технические науки. - 2015. - № 11. - С. 241 - 250.

10. Петров Д.Н. Формирование напряженно-деформированного состояния горного массива до и после осушения / Д.Н. Петров // Записки Горного института. - 2011. – Т. 190. - С. 232 - 239.

11. Трушко О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива Яковлевского рудника при ведении горных работ под защитным перекрытием / О.В. Трушко, А.В. Стрелецкий // Записки Горного института. - 2012. - Т. 199. - С. 60 - 63.

12. Синякин К.Г. Оценка вертикальных смещений рудного массива при ведении горно-строительных работ по созданию защитной потолочины / К.Г. Синякин // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Сер. «Науки о земле». - 2009. - Вып. 4. - С. 173 - 176.