УДК 622.831

В.Д.БАРЫШНИКОВ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, vbar@misd.nsc.ru*
Л.Н.ГАХОВА, *старший научный сотрудник*
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск

V.D.BARYSHNIKOV, *PhD in eng. sc., senior research assistant, vbar@misd.nsc.ru*
L.N.GAKHOVA, *senior research assistant*
Institute of Mining Art SO RAS, Novosibirsk

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ЗОН НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

С использованием данных натурных наблюдений получены значения критериальных параметров для определения потенциальных зон разрушения по критерию Кулона – Мора. Приведен пример прогноза состояния очистных заходок при выемке запасов рудного тела кимберлитовой трубки с применением слоевой восходящей системы отработки.

Ключевые слова: зоны запредельных деформаций, критерии разрушения, математическое моделирование.

EVALUATION AND PREDICTION OF ZONES OF INELASTIC DEFORMATIONS AROUND MINE WORKINGS

Using the in situ observation results and the Coulon – Mohr criterion, the authors have obtained the criteria for the determination of probable failure zones in rock masses. An example is given of prediction of stress state of advanced ore extraction of the kimberlite pipe with using the ascending method of mining.

Key words: zones of post-failure deformations, criteria of failure, mathematical modeling.

Многообразие горно-геологических условий разработки месторождений в большинстве случаев требует индивидуального подхода к геомеханическому анализу состояния горных выработок. Качество прогноза устойчивости подготовительных и очистных выработок, основанного на использовании классификаций массивов горных пород по фактору устойчивости [2, 3, 9], нельзя считать удовлетворительным из-за неучета взаимовлияния выработок. Разработка надежных методов оценки их устойчивости возможна только на основе анализа особенностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива приконтурной зоны как инструмента геомеханического прогнозирования для конкретных горно-технических и горно-геологических условий отработки месторождений.

Прогнозировать изменения геомеханического состояния в процессе ведения горных работ и, в конечном итоге, влиять на принятие тех или иных технических решений можно на основе результатов численного моделирования НДС в окрестности выработок на различных этапах отработки месторождения. Для определения потенциальных зон запредельного деформирования горных пород могут быть использованы различные критерии разрушения. Использование инструментальных и визуальных наблюдений за деформациями и разрушениями массива дает возможность уточнять параметры математической модели его поведения и критерии безопасного состояния.

На основе полученных критических значений параметров, позволяющих для определения потенциальных зон разрушения

воспользоваться критерием Кулона – Мора, выполнен анализ состояния очистных заходок при разработке кимберлитовой трубки «Интернациональная» АК «АЛРОСА».

Для подземной выемки запасов на руднике применяются варианты слоевой системы разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Месторождение по глубине разделяется на этажи, в пределах которых для обеспечения производительности добычи руды одновременно может отрабатываться несколько подэтажей. Комбайновая выемка запасов в слое осуществляется тупиковыми заходками по камерно-целиковой схеме. В зависимости от устойчивости рудного массива может применяться как восходящий, так и нисходящий порядок отработки слоев.

Прогноз опасных проявлений горного давления при недостаточной изученности геомеханических условий разработки, свойственной начальному этапу освоения месторождения, может производиться по результатам математического моделирования НДС в окрестности горных выработок, позволяющим дать предварительную оценку состояния приконтурной части и проследить характер его изменения на различных этапах отработки. Точность полученных оценок определяется соответствием принятых в расчетной модели параметров реальному состоянию и свойствам массива.

В задачах о математическом моделировании НДС массив горных пород может рассматриваться как сплошная упругая среда с заданными механическими свойствами [4, 5, 8]. Такой подход не всегда отражает реальную ситуацию. Однако для задач горной практики, связанных с анализом изменения НДС массива под влиянием техногенных воздействий, предположение о сплошности упругой среды позволяет получить достаточно хорошо согласующиеся с практикой результаты [1, 7].

Для численного решения задач использован метод граничных интегральных уравнений. Параметры естественного поля напряжений приняты следующие: вертикальные напряжения $\sigma_z = \gamma H$, горизонтальные $\sigma_x = \sigma_y = \lambda\gamma H$, где H – глубина разработки; γ – объемный вес пород; λ – коэффициент бокового распора. На глубине 700 м рудника «Интернациональный» при $\lambda = 0{,}7$ величины напряжений в нетронутом массиве составили: $\sigma_z = -18$ МПа, $\sigma_x = \sigma_y = -12{,}6$ МПа.

Существующие теории прочности позволяют определять разрушение горных пород при любом виде напряженного состояния на основании опытных данных, полученных при каких-либо простейших видах нагружения, например, при одноосном растяжении и сжатии. Применительно к горным породам наиболее часто используется критерий прочности Кулона – Мора и различные его обобщения [6], позволяющие определить размеры области неупругих деформаций путем сравнения сдвигающих напряжений массива в окрестности выработки со сцеплением массива:

$$\sigma_{\text{сд}} \le C_{\text{м}}; \sigma_{\text{сд}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\cos\varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\operatorname{tg}\varphi,$$

где φ – угол внутреннего трения; $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$.

Наиболее достоверная оценка критического значения параметра разрушения $C_{\text{м}}$ может быть получена по данным визуальных наблюдений за разрушениями контура выработок. В качестве примера такой оценки приведем анализ фактического состояния очистных заходок при отработке первого разрезного слоя на руднике «Интернациональный».

Поперечное сечение рудной трубки на участке разрезки имеет овальную форму с размерами 60 × 80 м. Комбайновая отработка разрезного слоя осуществлялась тупиковыми заходками 5 × 5 м по камерно-целиковой схеме (ширина целика 5 м) без применения крепления. При выемке первых трех заходок первой очереди (№ 2, № 4, № 6, рис.1) разрушений их приконтурной части не отмечено. При отработке 4-й и 5-й заходок (№ 8, № 10) отмечено разрушение оставленных целиков (боков заходок), наиболее интенсивно развивающееся в центральной части трубки (рис.2).

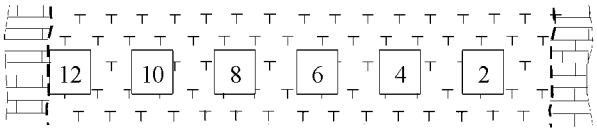


Рис.1. Отработка заходок первой очереди в слое

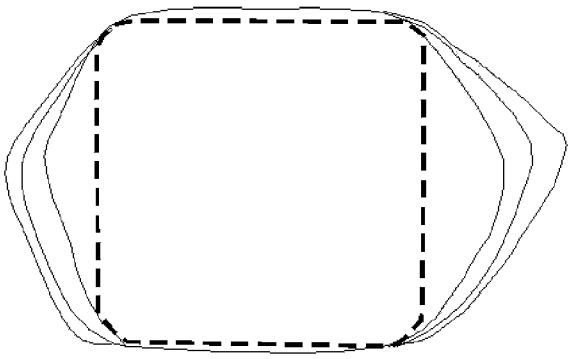


Рис.2. Изменение контура центральной заходки во времени

Расчеты НДС рудного массива в процессе развития очистных работ в разрезном слое показали, что на всех этапах отработки первичных заходок в их кровле отмечается разгрузка от действия горизонтальных напряжений. НДС целиков определяется действием сжимающих вертикальных напряжений σ_z. Наибольшие сжимающие σ_z в целике между центральными заходками возникают при отработке четырех параллельных заходок (рис.3, *а*). Увеличение их числа не приводит к значительным изменениям напряженного состояния в целике. При этом в бортах заходки $\sigma_{сд}$ достигают 8 МПа (рис.3, *б*).

Результаты наблюдений и данные расчетов $\sigma_{сд}$ позволили принять за критическое значение сдвигающих напряжений $\sigma^{к}_{сд} = 4$ МПа.

Выполнен анализ состояния заходок, отработанных без крепления, при выемке второго слоя подэтажа в восходящем порядке (рис.4). В центральной части трубки прогнозируемая зона неупругих деформаций в ее кровле не превысила 0,3 м (рис.4, *а*). Обрушения и расслоения кровли не наблюдались. Выемка запасов в приконтактной области заходкой с плоской формой кровли могла привести к распространению зоны неупругих деформаций до 5 м вглубь массива (рис.4, *б*). Изменение формы кровли заходки на куполообразную привело к значительному уменьшению зоны неупругих деформаций, о чем свидетельствуют и визуальные наблюдения. Оценка устойчивости кровли заходок второго слоя подтвердила правильность выбора критериального значения $\sigma^{к}_{сд}$, что позволило использовать его для анализа геомеханической ситуации в процессе развития очистных работ.

Выполнена прогнозная оценка устойчивости кровли заходки в центральной части рудного тела при отработке подэтажа на глубине 700-730 м (рис.5). Результаты расчетов НДС потолочины на различных этапах ведения очистных работ при выемке запасов в восходящем порядке и анализа размеров зон неупругого деформирования в кровле центральных заходок, отрабатываемых без крепления, обобщены и представлены в виде графиков (рис.6), позволяющих оценить толщину потолочины, допустимую по условиям безопасности отработки. Показана необходимость крепления заходок или перехода на нисходящий порядок отработки при толщине потолочины ≤ 15 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены значения критериальных параметров для прогнозирования разрушения конструктивных элементов слоевой системы отработки запасов рудного тела трубки «Интернациональная» с использованием критерия Кулона – Мора.

Экспериментально-аналитический подход позволил определить потенциальные зоны разрушения заходок в центральной и приконтактной областях рудного тела при слоевой восходящей выемке запасов.

Работа выполнена при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00113).

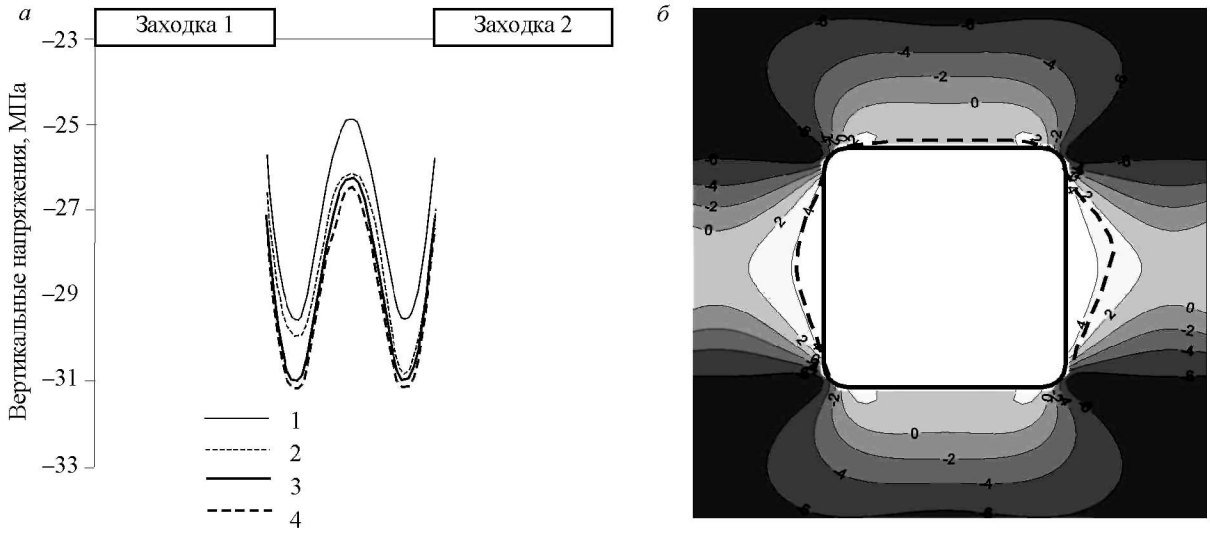


Рис.3. Вертикальные напряжения в целике между центральными заходками (*а*) и сдвигающие напряжения в окрестности центральной заходки (*б*)

1-4 – отработаны 2; 3; 4; 6 заходок

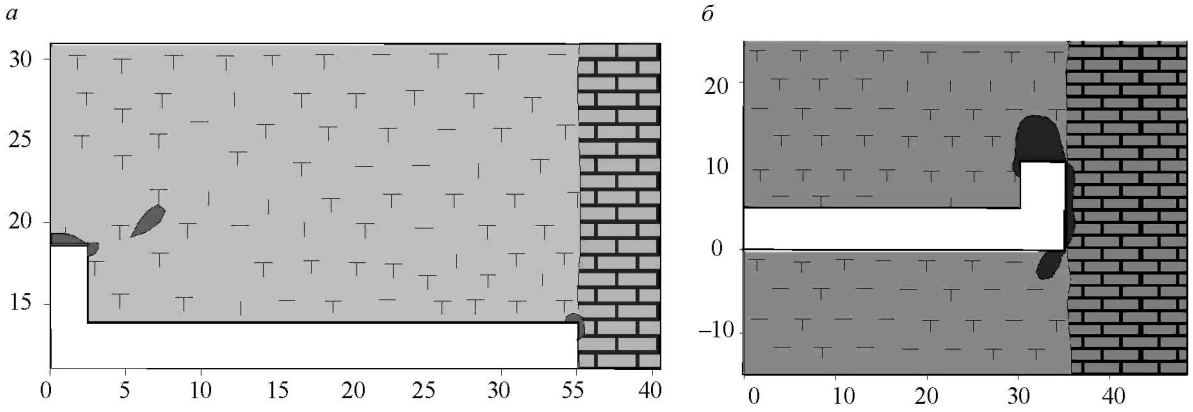


Рис.4. Формирование зон неупругих деформаций в кровле заходок второго слоя: *а* – в центральной части трубки; *б* – в приконтактной области

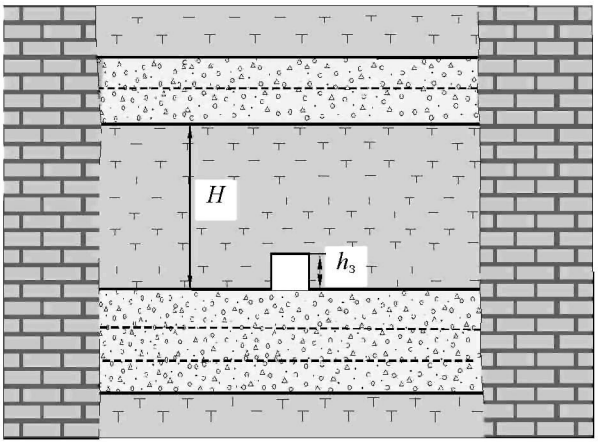


Рис.5. Схема ведения очистных работ при отработке подэтажа: H – высота потолочины; $h_з$ – высота заходки

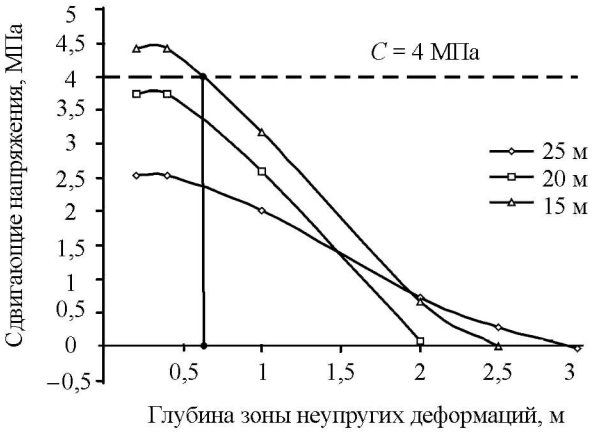


Рис.6. Сдвигающие напряжения в кровле заходок, отрабатываемых в зоне стыковки подэтажей

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барышников В.Д.* Напряженное состояние рудного массива при слоевой системе разработки в восходящем порядке / В.Д.Барышников, Л.Н.Гахова, Н.П.Крамсков // ФТПРПИ. 2002. № 6.

2. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1989.

3. Введение в механику скальных пород / Под ред. Х.Бока. М.: Мир, 1983.

4. *Витке В.* Механика скальных пород. М.: Недра, 1990.

5. *Гудман Р.* Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987.

6. *Курленя М.В.* Расчетный метод построения паспортов прочности горных пород по данным экспериментов / М.В.Курленя, А.М.Коврижных, В.Д.Барышников // ФТПРПИ. 2003. № 1.

7. *Курленя М.В.* Техногенные геомеханические поля напряжений / М.В.Курленя, В.М.Серяков, А.А.Еременко. Новосибирск: Наука, 2005.

8. *Линьков А.М.* Комплексный метод граничных интегральных уравнений теории упругости. СПб: Наука, 1999.

9. Разработка месторождений с закладкой / Под ред. С.Гранхольма. М.: Мир, 1987.

REFERENCES

1. *Baryshnikov V.D.* Stress state of ore massif with layer mining system in ascending order / B.D.Baryshnikov, L.N.Gakhova,N.P.Kramskov // PTPRPI. 2002. № 6.

2. *Bulychev N.S.* Mechanics of underground structures. Moscow: Nedra, 1989.

3. Introduction into mechanics of solid rocks / Edited by Kh.Bock. Moscow: Mir, 1983.

4. *Vitke V.* Mechanics of solid rocks. Moscow: Nedra, 1990.

5. *Gudman R.* Mechanics of solid rocks. Moscow: Stroyizdat, 1987.

6. *Kurlenya M.V.* Calculation method for construction of graphs of rock strengh by data of experiments / M.V.Kurlenya, K A.M.ovrizhnykh, V.D.Baryshnikov // FTPRPI. 2003. № 1.

7. *Kurlenya M.V.* Technogenic geomechanical fields of stresses / M.V.Kurlenya, V.M.Seriakov, A.A.Eremenko. Novosibirsk: Nauka, 2005.

8. Linkov A.M. A complex method of boundary integral equations of the elasticity theory. Saint Petersburg: Nauka, 1999.

9. Deposit mining with packing / Edited by S.Grankholm. Moscow: Mir, 1987.