



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД**

Л. С. Шамганова¹, В. Н. Токсаров², Н. А. Самоделкина², С. В. Кузьменко³

¹*Институт горного дела имени Д. А. Кунаева, E-mail: shamls@mail.ru,
просп. Абая 191, г. Алматы 050046, Казахстан*

²*Горный институт УрО РАН, E-mail: toksarov@mi-perm.ru,
ул. Сибирская 78а, г. Пермь 614007, Россия*

³*АО “ССГПО”, E-mail: main@ssgpo.enrc.com,
ул. Ленина 26, г. Рудный 111500, Республика Казахстан*

Для проектирования углубки Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров и вовлечения в разработку новых участков месторождений потребовалось детальное изучение геомеханических условий добычи руды. С целью уточнения геомеханической модели Сарбайского карьера выполнена оценка напряженно-деформированного состояния пород. Контроль напряжений в прибортовом массиве осуществлялся на основе использования эффекта Кайзера в горных породах при нагружении стенок скважины гидродомкратом Гудмана. Для Южно-Сарбайского карьера проведено математическое моделирование методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Массив, напряжения, боковое давление, устойчивость, моделирование, свойства

**USING ACOUSTIC MEMORY EFFECT FOR EVALUATION
OF STRESS STATE OF FRACTURED HARD ROCKS**

L. S. Shamganova¹, V. N. Toksarov², N. A. Samodelkina², and S. V. Kuz'menko³

¹*Kunaev Institute of Mining,
E-mail: shamls@mail.ru, ul. Abaya 191, Almaty, 050046 Republic of Kazakhstan,*

²*Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
E-mail: toksarov@mi-perm.ru, ul. Sibirskaya 78a, Perm 614007, Russia,*

³*JSC SSGPO,
E-mail: main@ssgpo.enrc.com, ul. Lenina 26, Rudny 111500, Republic of Kazakhstan*

For the design of deepening of the Sarbaisky and Yuzhno-Sarbaisky quarries and involvement of new deposits into development, a detailed study of the geomechanical conditions of ore mining was required. In order to clarify the geomechanical model of the Sarbaisky quarry, the stress-strain state of the rocks was evaluated. The stresses in the adjacent rock mass were monitored using the Kaiser effect in rocks during loading of the borehole walls with a Goodman hydraulic jack. For the Yuzhno-Sarbaisky quarry, mathematical modeling by the finite element method in three-dimensional formulation was carried out.

Rock mass, stresses, lateral pressure, stability, modeling, properties.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Определение напряжений проводилось на основе использования эмиссионных эффектов памяти нагружаемого околошпурового пространства [1–4]. Суть применяемого скважинного метода измерения напряжений заключается в разгрузке некоторой области массива пород бурением скважины и повторном нагружении ее стенок гидродомкратом Гудмана. При этом эффект Кайзера выполняет роль индикатора восстановления породами околоскважинного пространства компоненты поля напряжений, действующей в направлении нагружения. Состав скважинного измерительного комплекса показан на рис. 1.

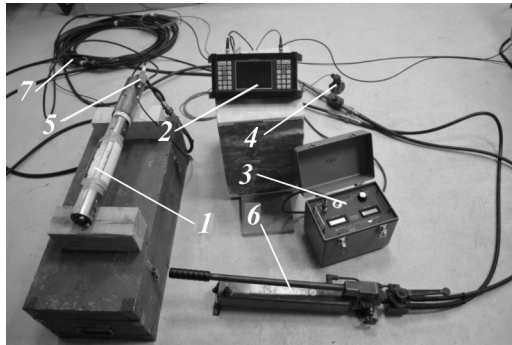


Рис. 1. Скважинный комплекс для измерения напряжений в массиве горных пород: 1 — гидродомкрат Гудмана; 2 — прибор регистрации АЭ; 3 — индикатор деформации; 4 — электронный манометр; 5 — предусилитель сигналов АЭ; 6 — гидравлический насос; 7 — высоконапорные рукава

При наличии эффектов памяти в горной породе в момент достижения определенного уровня давления в гидросистеме, которое соответствует действующему в породном массиве напряжению, происходит резкое увеличение (в 2–10 раз) активности АЭ (рис. 2). При отсутствии эмиссионных эффектов памяти на графике изменения параметров АЭ отсутствует пик, связанный с уровнем ранее действовавших в целике напряжений.

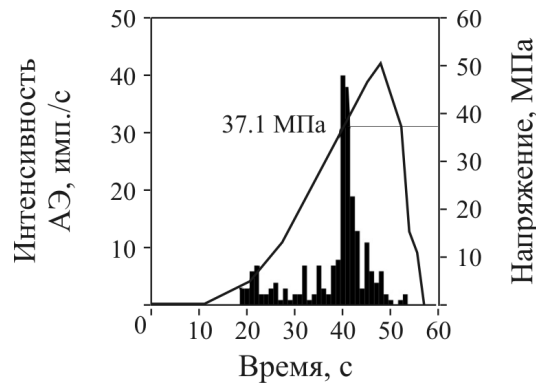


Рис. 2. Характерный график изменения активности АЭ и давления гидродомкрата от времени при нагружении стенок скважины в массиве в процессе измерения напряжений в скальных трещиноватых породах

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ напряженно-деформированного состояния подработанного массива основывался на упруго-пластической модели. Решение объемной задачи проводилось полуаналитическим методом конечных элементов с разложением вектора смещений в меридиональном направлении в ряды Фурье [5, 6].

$$U_i = \sum_{n=0}^N U_i^n \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right),$$

$$V_i = \sum_{n=0}^N V_i^n \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right),$$

$$W_i = \sum_{n=0}^N W_i^n \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right),$$

где U_i , V_i , W_i — перемещения i -го узла (с координатами x_i , y_i) соответственно в направлении осей x , y , z .

При моделировании принималось, что геологическое строение массива в меридиональном направлении носит дискретный характер (всего рассматривалось 10 широтных геологических разрезов), а геометрия борта карьера меняется непрерывно по линейному закону.

Для матрицы жесткости $[k_{ij}^{nl}]^e$ каждого конечного элемента матрица упругости D в зависимости от координаты z определялась параметрами той горной породы, которая соответствовала рассматриваемому интервалу dz :

$$[k_{ij}^{nl}]^e = \sum_{m=1}^b \int_{z_{m-1}}^m \left(\iint_{S^e} [B_l^n][D_m][B_j^l] dx dy \right) dz$$

Если положение dz соответствовало выработанному пространству карьера, то принимались нулевые значения матрицы упругости. При вычислении матрицы жесткости учитывались геологические нарушения — разломы, которые моделировались породой с ослабленной на порядок сдвиговой жесткостью. В результате решения задачи получены векторы смещений, по которым определялись деформации и напряжения в любой точке исследуемой области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА САРБАЙСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Измерения напряжений проводились на трех экспериментальных участках Сарбайского карьера. Скважины диаметром 76 мм бурились в стенках уступов в горизонтальной плоскости. Измерялись горизонтальные напряжения, действующие вдоль борта карьера. Распределение напряжений в прибортовом массиве на одном из экспериментальных участков показано на рис. 3.



Рис. 3. Распределение горизонтальных напряжений на одной из экспериментальных станций

Видно, что распределение напряжений по длине скважин неравномерное, наблюдается чередование участков с повышенными и пониженными уровнями напряжений, что обусловлено блочным строением массива. На первой и второй замерной станциях, где породы представлены в основном метаморфизированными туфами темно-зеленого цвета с вкраплениями магнетита, хлорита, пирита и туфами темно-серого цвета с прослоями туффитов андезитового состава, горизонтальные напряжения изменяются в диапазоне от 2–3 до 10–12 МПа. Среднее значение горизонтальных напряжений на первом экспериментальном участке за зоной опорного давления составляет около 4–6 МПа. На третьем экспериментальном участке породы представлены в основном сплошной магнетитовой рудой, а также метаморфически измененными туфами темно-зеленого цвета. В интервале глубин 5–8 м отмечается 5–7 трещин на 1 пог. м скважины. Средняя величина горизонтальных напряжений за зоной влияния опорного давления значительно больше и составляет около 8 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД НА ЮЖНО-САРБАЙСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ С УЧЕТОМ УГЛУБКИ КАРЬЕРА ДО ОТМЕТКИ – 400 м

Моделируемая область массива горных пород Южно-Сарбайского карьера составляет, км: длина — около 4, ширина — 2.8, высота — 0.85. Формирование физико-геологической модели массива горных пород проводилось по данным 14 геологических разрезов. Для реализации численного моделирования вся площадь Сарбайского карьера была поделена на 5 блоков, включающих 5–7 геологических разрезов. Каждый расчетный конечно-элементный разрез состоял примерно из 30 000 узлов и 60 000 треугольных элементов.

Физико-геологическая модель массива отражает основные особенности геологического строения массива: типы пород и их расположение в пространстве, наличие геологических нарушений различного типа, механические свойства пород. Результаты расчета вертикальных и горизонтальных напряжений в разрезах приведены на рис. 4. Зона концентрации горизонтальных напряжений на всех рассматриваемых разрезах находится под днищем карьера. При этом коэффициент концентрации горизонтальных напряжений может достигать двукратной величины по сравнению с окружающим массивом. Так, в плоскости геологического разреза максимум горизонтальных напряжений под днищем карьера равен 7–8.5 МПа при их величине на той же глубине в окружающем массиве – 4–4.5 МПа (рис. 4а).

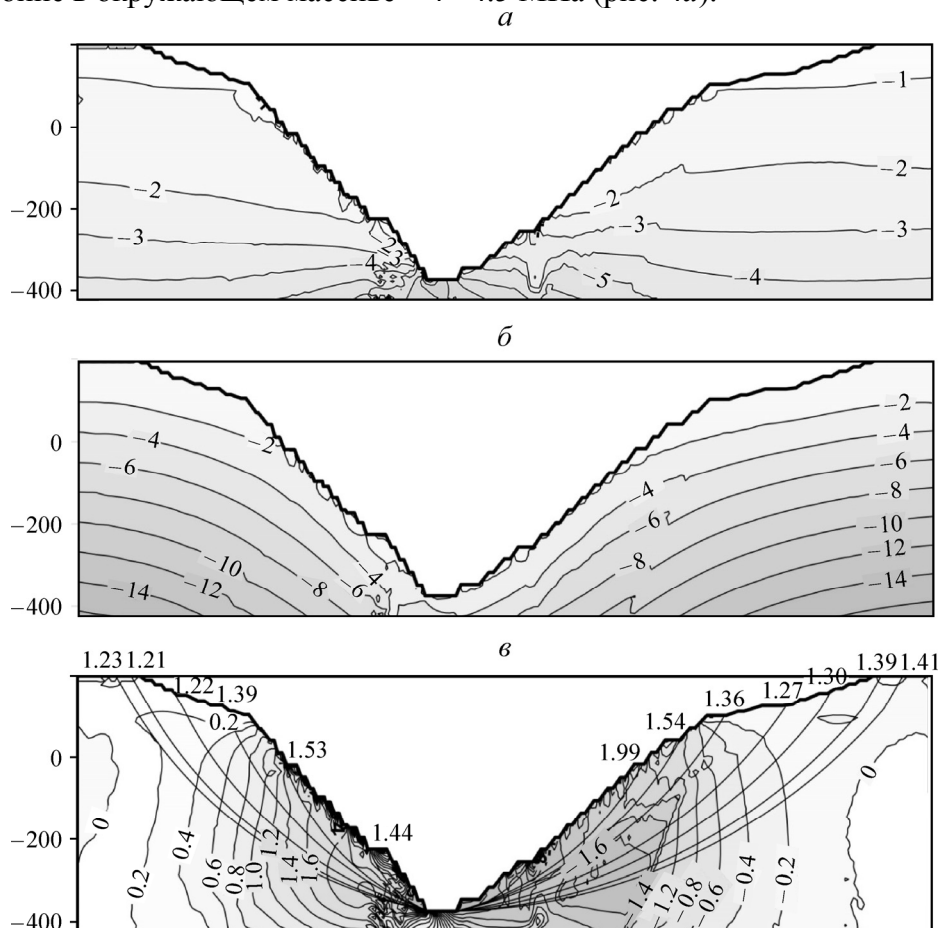


Рис. 4. Распределение горизонтальных (а), вертикальных (б) и касательных (в) напряжений в плоскости геологического разреза 50 (Южно-Сарбайский карьер)

Положение наиболее напряженной поверхности скольжения в откосе определялось расчетом, основанным на сопоставлении удерживающих и сдвигающих усилий, возникающих по потенциальным поверхностям скольжения под действием сил веса вышележащих пород и сопротивления их срезу (сдвигу). Для вычисления устойчивости бортов карьера строилось семейство кругло-цилиндрических поверхностей скольжения с целью локализации наиболее слабой из них.

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния прибортового массива установлено, что максимальные касательные напряжения зафиксированы в нижней приконтурной части бортов карьера на расстоянии 100–150 м от дна карьера. Их максимум, равный примерно 2 МПа, отмечен в обоих бортах карьера. Данные участки бортов карьера являются наиболее опасными с точки зрения обеспечения устойчивости откосов отдельных уступов.

Расчет критериального параметра (критерий Кулона–Мора) показал, что в обоих бортах карьера на всех рассматриваемых разрезах верхний слой рыхлых пород мощностью 100–120 м находится за пределом прочности даже без учета коэффициента структурного ослабления.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных экспериментальных исследований и моделирования установлено, что массив в бортах Сарбайского карьера характеризуется высокой трещиноватостью вмещающих пород. Распределение напряжений по длине скважин неравномерное: наблюдается чередование участков с повышенными и пониженными уровнями напряжений. Это обусловлено нарушением и блочным строением массива, а также неоднородностью состава горных пород.

Зона концентрации горизонтальных напряжений на всех рассматриваемых разрезах находится под днищем карьера. При этом коэффициент концентрации горизонтальных напряжений может достигать двукратной величины по сравнению с окружающим массивом. Максимальные касательные напряжения отмечены в нижней приконтурной части бортов карьера на расстоянии 100–150 м от дна карьера. Данные участки бортов карьера являются наиболее опасными с точки зрения обеспечения устойчивости откосов отдельных уступов.

Результаты экспериментальных исследований использованы при оценке устойчивости бортов и уступов Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Acoustic emission** memory effect in rocks, Moscow, Izd. MGGU, 2004, 456 pp. [**Акустоэмиссионный эффект** памяти в горных породах. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 456 с.]
2. **Asanov V. A., Toksarov V. N., and Evseev A. V.** The experience of using Goodman's hydraulic jack when investigating the state of an array of quasiplastic rocks, *Geodynamics and stress state of the Earth's interior*, Novosibirsk, IGD SO RAN, 2011, vol. 1, pp. 47–51. [**Асанов В. А., Токсаров В. Н., Евсеев А. В.** Опыт использования гидродомкрата Гудмана при исследовании состояния массива квазипластичных пород // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли*. Т. 1. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — С. 47–51.]
3. **Yamshchikov V. S., Shkuratnik V. L., Lykov K. G., and Farafonov V. M.** Estimation of the stress state of the massif based on the emission effects of rock memory in the near-wellbore space, *Journal of Mining Science*, 1991, no. 2, pp. 26–29 [**Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г., Фарафонов В. М.** Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти горных пород околоскважинного пространства // *ФТПРПИ*. — 1991. — № 25. — С. 26–29.]
4. **Shkuratnik V. L. and Nikolenko P. V.** Method of interpretation of acoustic emission measurements when using the Kaiser effect to assess the stress-strain state of the rock mass, *Gornyi zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 32–39 [**Шкуратник В. Л., Николенко П. В.** Методика интерпретации акустико-эмиссионных измерений при использовании эффекта Кайзера для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // *Горн. журнал*. — 2012. — № 9. — С. 32–39.]
5. **Malinin N. N.** *Applied theory of plasticity and creep*, Moscow, Mashinostroenie, 1975, 400 pp. [**Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975, 400 с.]
6. **Zenkevich O.** *Method of finite elements in engineering*, Moscow, Mir, 1975, 541 pp. [**Зенкевич О.** *Метод конечных элементов в технике*. — М.: Мир, 1975. — 541 с.]