

Л.С. Ксендзенко, В.В. Макаров**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛЬНО СЖАТОГО
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ***

Разработан метод определения параметров математической модели зонального разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок в условиях больших глубин и дан прогноз структуры зонального разрушения на примере месторождения Николаевское (Дальнегорск). Рассмотрены иерархические уровни деформирования и разрушения горной породы и способ перехода от образца к массиву сильно сжатых горных пород.

Ключевые слова: зональное разрушение, сильное сжатие, блочная иерархическая среда, образец горной породы, массив.

Методические основы исследования зонального разрушения массива горной породы вокруг выработки в условиях сильного сжатия включают аналитические, лабораторные и натурные экспериментальные составляющие. В настоящее время метод определения параметров математической модели зональной структуры разрушения массива, на основе которой можно было бы осуществлять прогноз для месторождений, отсутствует. Разработка такого метода является актуальной проблемой современной геомеханики.

Массив в состоянии сильного сжатия принято рассматривать, как находящуюся в состоянии, далеком от условий термодинамического равновесия, дефектную среду [1]. Краевая задача о распределении напряжений вокруг выработки на большой глубине рассматривается, как плоская и стационарная в предположении несовместности упругих деформаций, несжимаемости и гистерестичности нагружения на бесконечности.

При этих допущениях нормальное радиальное напряжение σ_r и нормальное тангенциальное напряжение σ_θ в массиве горной породы вокруг круговой незакрепленной горной выработки определяются соотношениями [1, 2]:

$$\sigma_r(r) = \sigma_\infty \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2r} \cdot \frac{E}{\gamma^{3/2}(1-\nu^2)} \left[a \cdot J_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + b \cdot Y_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + c \cdot K_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right],$$

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_\infty \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2r} \cdot \frac{E}{\gamma^{3/2}(1-\nu^2)} \left[a \cdot J_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + b \cdot Y_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) + c \cdot K_1(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right] - \\ - \frac{E}{2\gamma(1-\nu^2)} \left[a \cdot J_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) + b \cdot Y_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) + c \cdot K_0(\sqrt{\gamma} \cdot r) \right],$$

где σ_∞ – гравитационное напряжение, МПа; r_0 – радиус выработки, м; r – расстояние от центра выработки до точки в массиве, м; J_0 , J_1 , Y_0 , Y_1 , K_0 , K_1 , – функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого и первого порядков;

* Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гранты № 02.740.11.0315 и № Ш402).

E – модуль продольной упругости (модуль Юнга); ν – коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона); γ , c – параметры математической модели зонального разрушения сильно сжатых горных пород вокруг подземных выработок.

Параметр γ определяется методом статистической обработки обобщенных данных натурных исследований зонального разрушения массива вокруг горных выработок месторождений Дальнего Востока, Сибири, Донбасса, КНР и других.

Между положением середины первой зоны разрушения массива вокруг горной выработки, измеряемой в относительных к радиусу выработки единицах, и пределом прочности пород на одноосное сжатие установлена линейная зависимость:

$$r^* / r_0 = 0,0083\sigma_c + 0,748. \quad (1)$$

Для пород Донбасса, медно-никелевых месторождений Норильска и угольных месторождений Приморского края (шахта им. Артема, п. Шкото-во) получена линейная зависимость между параметром γ и отношением r^*/r_0 :

$$\gamma(r^* / r_0) = -10(r^* / r_0) + 23. \quad (2)$$

Здесь r^* , м – расстояние от контура выработки до середины первой зоны разрушения, измеренное экспериментально.

Массив горных пород рассматривается как иерархическая блочная среда [3] – [7]. В целом могут быть определены многочисленные иерархические уровни такой среды, отличающиеся по размерам на множитель $\sqrt{2}$ [6]. Размер макродефекта каждого нижнего уровня структурной иерархии принято считать соответствующим размеру мезодефекта соседнего верхнего уровня [4]. Кроме того, необходимо учесть сохранение физических процессов разрушения массива на различных уровнях блочной иерархии [3]. Для горной породы это соответствие выражается в сохранении сдвига-отрывного механизма разрушения в условиях сильного сжатия [8].

На каждом иерархическом уровне блочной среды рассматриваются масштабные уровни дефектов, которые характеризуют только их относительные размеры: микродефект, мезо- и макродефект. Макродефект нижнего иерархического уровня рассматривается, как мезодефект верхнего (соседнего) иерархического уровня блочной среды. Сохраняя вышеуказанные принципы, отметим, что представителем первого иерархического уровня массива является минерал; второго – образец, рассматриваемый как совокупность минеральных зерен (кристаллов), разделенных границами; третьего – массив горной породы, сопоставимый с размерами выработки и рассматриваемый как совокупность породных образцов.

Амплитудный параметр C модели зонального разрушения массива горной породы вокруг горной выработки на большой глубине определяем, опираясь на рассмотренные принципы. На уровне образца иерархической блочной среды мезоструктурные дефекты – это мезотрешины по границам минеральных зерен. Нижний размер мезоструктурного дефекта сопоставим с максимальным диаметром минерального зерна $d_{\max}$, а верхний изменяется в пределах $(5 \div 10)d_{\max}$, где $d_{\max} : (1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ м})$. Макродефект на этом иерархическом уровне – это макротрещина, рассекающая образец горной породы, изменяющаяся в пределах от $(5 \div 10)d_{\max}$ до размера критического макродефекта $2l$., определяемого по методике [8]

$$l_* = \frac{h_* \cdot E}{4(1 - \nu^2)\gamma_1 \cdot \sigma_c^*}, \quad (3)$$

где h_* – максимальное расхождение берегов в центральной части мезо-трещины, σ_c^* – предел прочности на одноосное сжатие, МПа; E – модуль Юнга, МПа; ν – коэффициент Пуассона; γ_1 – безразмерный параметр.

При сохранении сдвига-отрывного характера разрушения образца и массива мезоструктурными дефектами на иерархическом уровне массива вокруг горной выработки являются мезотрещины по границам блоков, сопоставимых по размерам с размерами образцов горной породы, изменяющиеся в пределах $d_{\text{блока}} \div (5 \div 10)d_{\text{блока}}$. Нижний размер мезоструктурного дефекта сопоставим с размером макротрещины в образце на втором иерархическом уровне, а верхний превышает его в (5–10) раз. Макродефект – это трещина, проходящая по границам блоков, имеющая размеры от до величины критического макродефекта $2l_{\text{масс}}^*$, определяемого по формуле, аналогичной (3):

$$l_{\text{масс}}^* = \frac{h_{\text{масс}}^* \cdot E_{\text{масс}}}{4(1 - \nu^2)\gamma_1 \cdot \sigma_c^*}, \quad (4)$$

где $h_{\text{масс}}^*$ – максимальное расхождение берегов в центральной части мезотрещины в массиве, м; σ_c^* – остаточное напряжение в образце, МПа; $E_{\text{масс}}$ – модуль Юнга в очаге образца, МПа; ν – коэффициент Пуассона; γ_1 – безразмерный коэффициент.

Эксперименты показывают, что в образце в стадии предразрушения и в массиве в условиях сильного сжатия формируются мезотрещинные структуры периодического типа [1,9]. Мезотрещинная структура периодического типа в массиве вокруг горной выработки на большой глубине реализуется в виде чередующихся зон разуплотнения и уплотнения, которые повторяют форму выработки.

Коэффициент интенсивности напряжений в приложении к предложенной модели имеет вид

$$K_1(r) = \sqrt{\pi \cdot l} \cdot (\gamma_1 \sigma_{\text{фр}} - \gamma_3 \sigma_{\text{гр}}). \quad (5)$$

Здесь l – полудлина трещинных дефектов массива (минимальная полудлина неустойчивой макротрещины отрыва, м); γ_1, γ_3 – эмпирические коэффициенты; $\sigma_{\text{фр}}, \sigma_{\text{гр}}$ – определены выше. Введем функцию критерия для относительных значений критерия отрывного разрушения

$$Kr(r) = K_1 / K_{1c},$$

где K_{1c} – трещиностойкость горной породы, МПа·м^{1/2}. При достижении функцией критерия величины большей либо равной единице в массиве появляется возможность разрушения отрывом в условиях всестороннего сжатия.

Коэффициент интенсивности напряжений в образце горной породы вводим по аналогии. Если нагрузка на образец примет значение больше критического $P > P_*$, тогда с учетом классического нагрузочного напряжения и напряжения, порожденного влиянием дефектов, коэффициент интенсивности напряжений для макротрещины в образце выразится равенством

$$K_1(\varphi) = \sqrt{\pi l} \gamma_1 (\pi_{zz} + \sigma_{zz} - \frac{\gamma_3}{\gamma_1} (\pi_{\text{фр}} + \sigma_{\text{фр}})), \quad (6)$$

где $\frac{\gamma_3}{\gamma_1} = 0,8$, $\gamma_1 = 0,25$, $\sigma_{\varphi\varphi} = 0$, $\sigma_{zz} = P$, а компоненты напряжений σ_{zz}^* , $\sigma_{\varphi\varphi}^*$

определены в [9].

Параметр C находим из условия равенства коэффициента интенсивности напряжений для неустойчивой макротрещины минимальной длины (мезодефекта максимальной длины), соответствующей очаговой стадии развития трещинной мезоструктуры образца, находящегося в стадии предразрушения и коэффициента интенсивности напряжений для мезотрещины в первой зоне разрушения массива вокруг подземной выработки.

Разработка метода определения характеристик зональной структуры разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок в условиях больших глубин основывается на установлении закономерностей явления зонального разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок, закономерностях деформирования образцов горных пород в стадии предразрушения и включает методики определения параметров модели, установления деформационных и прочностных характеристик горных пород в образце и массиве, а также правила перехода от мезотрещинной структуры образца к массиву.

Закономерности явления зонального разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок в условиях больших глубин состоят в периодическом характере деформирования этого массива вокруг горной выработки, что отражается в осциллирующем характере деформаций, а также в периодическом характере напряжений вокруг горной выработки на большой глубине и подтверждено натурными экспериментами на рудниках Норильска, Дальнегорска и шахтах Донбасса [1].

Для определения параметров модели разработаны алгоритмы и комплекс компьютерных программ расчета коэффициентов интенсивности напряжений в образце и массиве, определения амплитудного параметра модели, а также программы вычисления радиальной протяженности зон для закрепленной и незакрепленной выработок, программы определения относительного критического напряжения зонообразования для закрепленной и незакрепленной выработок, программы нахождения положения последней зоны разрушения для закрепленной и незакрепленной выработок.

Последовательность определения прогнозных параметров зональной структуры массива в этом случае заключается в следующем:

I. В результате экспериментов с образцами определяется предел прочности на одноосное сжатие σ_c . По эмпирической формуле (3) находится положение первой зоны разрушения r^*/r_0 в единицах радиуса выработки.

Подставляя в аналитическую зависимость (2) полученное значение r^*/r_0 , определяем параметр периодичности γ для функции дефектности R в математической модели массива.

II. Находятся максимальный диаметр минерального зерна $d_{\max}$ и максимальное расхождение берегов в центральной части мезотрещины $h_* \approx d_{\max}$. Вычисляем минимальную полудлину устойчивой мезотрещины отрыва $l_{\text{mezo}} \approx (2,5-5) d_{\max}$. Определяется в образце $\sigma_c^{\text{ост}}$ модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν .

В программе для нахождения коэффициента интенсивности напряжений в образце задаются параметры, полученные из экспериментов с образцами: $l_{\text{mezo}}^{\text{обр}}$, $E_{\text{очага}}^{\text{обр}}$, ν , δP , а также величины деформаций, снятые с боковой поверхности образца. В результате работы программы получаем максимальное значение

Прогноз появления зон разрушения на руднике Николаевский

№ зоны разрушения	I	II	III	IV
Относительное критическое напряжение зонообразования	1,3	2,3	2,9	3,3
Глубина появления зоны, м	520	920	1160	1320

коэффициента интенсивности напряжений в вершине мезотрешины образца, т.е. трещиностойкость образца.

Затем определяется критическая полудлина макротрещины отрыва в образце

$$l_c = \frac{h_* \cdot E}{4(1 - \nu^2) \gamma_1 \cdot \sigma_c}$$

и вычисляется трещиностойкость массива горной породы $K_{1c}^{\text{масс}}$ по формуле

$$K_{1c}^{\text{масс}} = \gamma_1 \sigma_c^{\text{ост}} \sqrt{\pi l_{\text{мезо}}^{\text{масс}}}$$

III. В программе для определения амплитудного параметра C задается максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в образце и величины γ , $K_{1c}^{\text{масс}}$, $l_{\text{мезо}}^{\text{масс}}$, $E_{\text{очага}}^{\text{масс}}$, ν , E , r_0 , $\sigma_c^{\text{ост}}$, γ_1 , γ_3 , r^*/r_0 после чего определяется амплитудный параметр C .

IV. При переходе от экспериментов с образцами к математической модели массива полагаем, что величина мезодефекта в массиве равна величине макродефекта в образце, т.е. $l_{\text{мезо}}^{\text{масс}} = l_{\text{макро}}^{\text{обр}} = l_*^{\text{обр}}$.

Модуль Юнга в массиве полагаем равным модулю Юнга в очаге образца $E^{\text{масс}} = E_{\text{очага}}^{\text{масс}}$, а предел прочности на одноосное сжатие в массиве равным пределу остаточной прочности в образце $\sigma_c^{\text{масс}} = \sigma_c^{\text{ост обр}}$.

Проверка работоспособности метода определения характеристик зональной структуры разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок в условиях больших глубин проведена для условий месторождения рудника Николаевский (г. Дальнегорск).

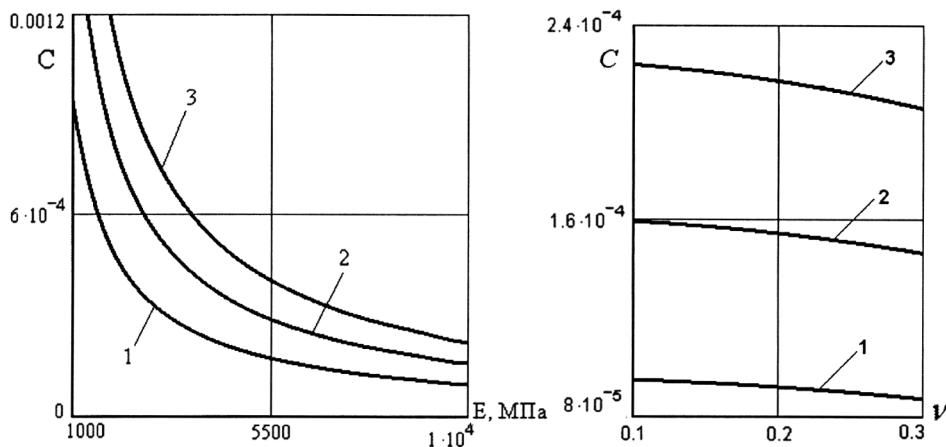


Рис. 1. Зависимость амплитудного параметра модели C от модуля общей деформации E и коэффициента Пуассона ν при различных значениях трещиностойкости горной породы: 1 – $K_{1C} = 1,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; 2 – $K_{1C} = 2,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; 3 – $K_{1C} = 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$

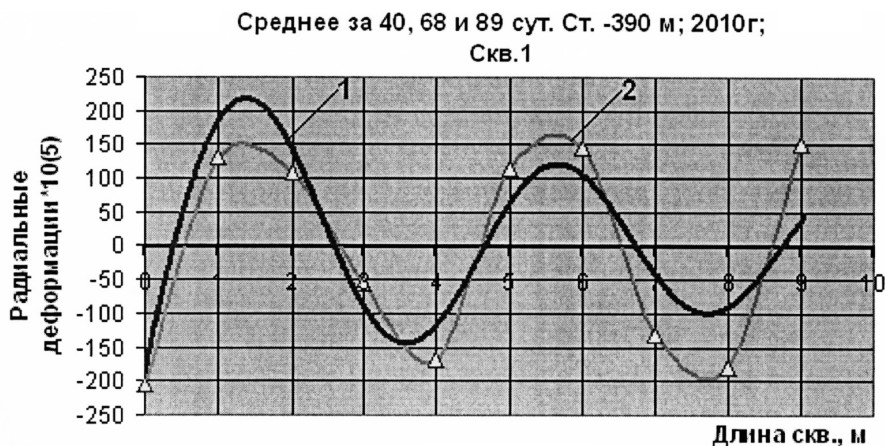


Рис. 2. Наложение графиков радиальных деформаций: 1 – теория; 2 – эксперимент

Прогнозная глубина появления зон разрушения, их количество и радиальная протяженность приведены в таблице.

При сравнении результатов теоретических и натурных исследований установлена существенная связь амплитудного параметра модели C от модуля общей деформации E , а также от коэффициента Пуассона ν горных пород (рис. 1).

В результате наблюдений за деформациями вмещающих пород на р. Николаевский (г. Дальнегорск) на больших глубинах методом установки глубинных реперов в скважинах, пробуриваемых в массиве, установлено, что деформирование вмещающих пород носит незатухающий во времени, осциллирующий характер. Сравнение экспериментального и теоретического графиков радиальных деформаций в массиве горной породы (рис. 2) показывает хорошую качественную и удовлетворительную количественную сходимость. В пределах четырех радиусов от контура выработки погрешность теоретического определения деформаций не превышает 50%.

Заключение

Разработан метод определения параметров математической модели зонального разрушения массива горных пород по данным экспериментальных исследований. Получены хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие результатов теоретических и экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 232 с.
2. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Кива М.Н., Сапелкина В.М. Зональное разрушение массива и осцилляционный характер напряжений вокруг пройденных в сильно сжатых породах выработках // Известия ТулГУ, серия «Геомеханика. Механика подземных сооружений». – 2004. – вып. 2. – С. 193–198.
3. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247. Вып. 4. – С. 829–831.
4. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // Физическая мезомеханика – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 25–34.

5. *Нелинейная механика геоматериалов и геосред* / Отв. ред. Л.Б. Зуев. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 235 с.

6. Опарин В.Н., Танайно А.С. Представление размеров естественных от-дельностей гор-ных пород в канонической шкале. Классификация // ФТПРПИ. – 2009. – № 6. С. 40–53.

7. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы I. Физические основы многоуровневого подхо-да // Физическая мезомеханика. – 2006. – Вып. 9. № 6. – С. 9–22.

8. Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М.: ИПКОНРАН, 1996. – 166 с.

9. Гузев М.А., Макаров В.В., Ушаков А.А. Моделирование упругого поведения образцов сжа-тых горных пород в предразрушающей области // ФТПРПИ. – 2005. – № 6. – С. 3–13. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ксендзенко Людмила Степановна – кандидат физико-математических наук, доцент,

e-mail: ksendzenko@mail.ru,

Макаров Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор,

e-mail: vlmvv@mail.ru,

Дальневосточный федеральный университет.

UDC 622:510.67

METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL THE HIGHLY COMPRESSED ROCK MASS ACCORDING TO THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

Ksendzenko L.S., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor,

e-mail: ksendzenko@mail.ru, Far East Federal University, Vladivostok, Russia,

Makarov V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: vlmvv@mail.ru,

Far East Federal University, Vladivostok, Russia.

As a result of experiments with samples the method of definition of parameters of model of zone destruc- tion of a rock mass in conditions of greater depths is developed and characteristics of zone destruction on an example of breeds of the Nikolaev's deposit of the O AS RMC «Farpolymetal» are predicted. Hierarchical levels of deformation and destruction of rock and a way of transition from a level of the sample on a level of a rock mass are entered.

Key words: zonal destruction of strongly compressed rock mass, the block hierarchical rock, the sample of rock.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the Federal target program «Scientific and Scientific-pedagogical personnel of innovative Russia» (grant No. 02.740.11.0315 and No. Sh 402.)

REFERENCES

1. Guzev M.A., Makarov V.V. *Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatykh gornykh porod vokrug vy- rabotok* (Deformation and failure of highly compressed rock mass surrounding mine workings), Vladivostok: Dal'nauka, 2007, 232 p.

2. Макаров В.В., Ксендзенко Л.С., Кива М.Н., Сапелькина В.М. *Izvestiya TulGU, seriya «Geome- khanika. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii»*, 2004, issue 2, pp. 193–198.

3. Sadovskii M.A. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 247, issue 4, pp. 829–831.

4. Макаров П.В. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2004, vol. 7, no 4, pp. 25–34.

5. *Nelineinaya mekhanika geomaterialov i geosred*. Отв. ред. Л.Б. Зуев (Nonlinear mechanics of geoma- terials and geomedia, Zuev L.B. (Ed.)), Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2007, 235 p.

6. Опарин В.Н., Танайно А.С. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*, 2009, no 6, pp. 40–53.

7. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, issue 9, no 6, pp. 9–22.

8. Odintsev V.N. *Otryvnoe razrushenie massiva skal'nykh gornykh porod* (Cleavage fracture of hard rock mass), Moscow, IPKONRAN, 1996, 166 p.

9. Guzev M.A., Makarov V.V., Ushakov A.A. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2005, no 6, pp. 3–13.