

КСЕНДЗЕНКО Л.С. (Дальневосточный федеральный университет)

ЛОСЕВ А.С. (Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПЕРИОДИЧНОСТИ МОДЕЛИ ЗОНАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Приведен обзор новых, наиболее значимых результатов в области горных исследований, основанных на использовании неевклидовой модели сплошной среды для описания распределения поля напряжений вокруг выработки круглого сечения. Рассмотрен вопрос точности вычисления параметров построенных моделей и проведено их сравнение с натурными экспериментами. Рассмотрен отдельно взятый параметр периодичности модели зонального разрушения массива горных пород вокруг глубокой выработки круглого сечения. Выбор данного параметра обоснован его значимостью для решения прогностических задач при исследовании горных месторождений. Проведен сравнительный анализ аналитического и численного определения данного параметра с натурными данными двух независимых месторождений. Описана и обоснована методика совместного использования аналитического и численного подхода в зависимости от решаемых задач на исследуемом месторождении.

Ключевые слова: сильно сжатый массив; зональное разрушение; параметры; неевклидова модель; массив; натурные данные

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день исследования горных пород являются приоритетными направлениями во многих странах к решению задач, связанных с горным делом, привлечены специалисты различного уровня со всего мира. В процессе поиска новых методов и подходов в данной научной области за последнее время один из значимых результатов был получен Гузевым М.А. и Парошиным А.А. Ими впервые предложена неевклидова модель сплошной среды для описания распределения поля напряжений вокруг выработки круглого сечения [1]. Отказавшись от условия совместности деформаций Сен-Венана, для случая плоской деформации авторы ввели функцию дефектности массива горной породы, удовлетворяющую бигармоническому уравнению с заданными граничными условиями. Полученный результат стал основой новых исследований и позволил по-новому взглянуть на явления зонального разрушения массива горных пород вокруг глубоких подземных выработок [2–8].

В частности, авторами работы [2] решена краевая задача о распределении поля напряжений вокруг выработки в случае

плоской деформации и в условиях негидростатического нагружения. Задача представлена в виде двух составляющих путем разложения поля упругих напряжений в сумму полей, первое из них вызвано несовместными деформациями нарушенных зон, а второе – совместными деформациями ненарушенных зон. В первом случае упругие напряжения определяются с помощью неевклидовой модели, во втором – с помощью классической упруго-механической модели. В итоге, используя силовой критерий Кулона–Мора, авторы установили количество нарушенных зон, их местоположение, которые зависят от физико-механических свойств материала породы, а также от его неевклидовых параметров.

В работе [3] на основе представленной неевклидовой модели зональной дезинтеграции массива горных пород вокруг выработки круглого сечения определены количество и размер нарушенных и ненарушенных зон. Показана зависимость количества и размера зон от продольного натурального напряжения, тангенциального и радиального напряжений, коэффициента промежуточного главного напряжения, а также классификационного коэффициента



RMR (Rock Mass Rating).

В работе [4] предложена динамическая модель исследования явлений зональной дезинтеграции во вмещающем массиве горных пород вокруг глубоких круглых туннелей, подвергнутых динамической разгрузке в условиях гидростатического сжатия. На основе неравновесной термодинамики получено неевклидово динамическое уравнение, решение которого определяется прямыми и обратными преобразованиями Лапласа. Показано, что число нарушенных зон возрастает с увеличением гравитационного напряжения, параметра нарушенности горной породы (disturbance factor), скорости разгрузки, а также с уменьшением предела прочности на одноосное сжатие, геологического индекса прочности (GSI), параметра прочности m_i и коэффициента Пуассона ν .

В работе [5] на основе новой неевклидовой модели исследовано влияние на зональную дезинтеграцию горных пород глубоких выработок пени-образных трещин и естественного осевого напряжения. Применен коэффициент плотности энергии деформации при определении коэффициента интенсивности напряжений в вершинах пени-образных трещин. Численные расчеты показали, что величина и расположение зон разрыва чувствительны к микро- и макромеханическим параметрам, а также к величине напряжения в нетронутом массиве.

В работе [6] на основе неевклидовой модели изучена связь между зональной дезинтеграцией и горными ударами. Исследован механизм зарождения вторичных микротрещин, механизм их перехода в неустойчивое состояние, распространения и объединения вторичных микротрещин, образования макротрещин (что ведет к горному удару).

Несмотря на уникальность исследований, авторы работ [2–6] приходят к следующим заключениям:

- в условиях больших глубин закономерным является зональный характер разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок;
- свойствами структур зонального разрушения являются повторение контура выработки и чередование разрушенных и относительно ненарушенных горных пород;
- неевклидовы математические модели наиболее адекватно описывают явление зональной дезинтеграции.

Общим существенным пробелом в рассмотренных работах является отсутствие сравнения с натурными экспериментами и неполная проработка алгоритма определения параметров построенных математических моделей. Поэтому актуальным остается вопрос качества определения параметров построенных моделей, а также влияние точности их вычисления на исследуемые физические эффекты и горные явления.

Распределение поля напряжений вокруг выработки круглого сечения

Обратимся к задаче о распределении поля напряжений вокруг выработки круглого сечения, которая рассматривается как плоская и стационарная, в условиях несжимаемости и гидростатичности нагружения на бесконечности [1]. Задача решается на основе полученного уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0, \quad (1)$$

бигармонического уравнения для функции дефектности

$$\Delta^2 R - \gamma^2 R = 0, \quad (2)$$

и граничных условий

$$R|_{r=r_0} = 0, \quad \frac{\partial R}{\partial r}|_{r=r_0} = 0, \quad (3)$$

где σ_{rr} – нормальное радиальное напряжение; $\sigma_{\varphi\varphi}$ – нормальное тангенциальное напряжение; $\sigma_{r\varphi}$ –



касательное напряжение; Δ – оператор Лапласа; γ – параметр периодичности модели. В полярных координатах для бигармонического уравнения

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right)^2 R = \gamma^2 R \quad (4)$$

определено решение при условии $r \rightarrow \infty$ для расстояния от центра выработки до точки массива в виде равенства:

$$R(r) = aJ_0(\sqrt{\gamma}r) + bN_0(\sqrt{\gamma}r) + cK_0(\sqrt{\gamma}r), \quad (5)$$

где J_0, N_0, K_0 – функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого порядка.

В [7] решение бигармонического уравнения (2), в отличие от [1], найдено для граничных условий:

$$\left. \frac{\partial R}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial R}{\partial r} \right|_{r=r^*} = 0, \quad (6)$$

соответствующих зональному характеру разрушения массива во всех зонах, по принципу: первое граничное условие для функции R определяем как ее экстремальность на контуре выработки, а второе – как экстремальность в середине первой зоны разрушения, и т.д.

В данной постановке задачи и полученном решении актуальным остается вопрос качественного и точного определения параметров рассматриваемой модели. А именно особенно важным моментом являются степень точности определения параметра периодичности и его влияние на точность прогнозов, числа, положения и протяженности зон разрушения массива горных пород. В ходе рассмотрения данного вопроса нами было разработано два независимых подхода для определения параметра γ .

Методика определения параметра периодичности модели зонального разрушения массива горных пород

Аналитический подход. На основе натуральных экспериментов для исследованных

месторождений была получена аналитическая зависимость между параметром γ и расстоянием от контура выработки до середины первой зоны разрушения в единицах радиуса выработки

$$\gamma(r^*/r_0) = -10(r^*/r_0) + 23, \quad (7)$$

где r^* – середина первой зоны разрушения, считая от контура выработки; r_0 – радиус выработки, м [7].

Численный подход. Способ основан на численном подборе параметра γ , при котором параметры a и b функции дефектности принимают наибольшие отрицательные значения на контуре выработки, что характеризуется достижением функции дефектности на контуре выработки экстремального значения и, соответственно, наличием зоны разрушения [8].

Каждый из предложенных подходов обладает своими достоинствами и недостатками, в частности, аналитический подход определяет параметр γ с точностью до целых, не до конца апробирован на неизвестных месторождениях, но является очень доступным и простым в вычислительном плане. Численный подход является общим способом определения параметра γ , который позволяет вычислить искомый параметр с заданным уровнем точности, но требует весьма трудоемких вычислений.

В ходе расчета параметра периодичности для исследованных месторождений по обеим методикам было получено, что расхождение в точности в некоторых случаях доходит до 11,21 % (табл. 1).

Расчет относительной погрешности для рассматриваемых месторождений (табл. 2, 3) показывает, что увеличение числа знаков после запятой положительно отражается на вычислении границ зон разрушения в общем случае.



Таблица 1

Параметр γ различных месторождений

Географическое расположение пород	r^*/r_0	γ	γ^*	Относительная погрешность, %
Месторождения Норильска	2,0	3	3,336526	11,21
Месторождения Донбасса	1,0	13	13,050143	0,38
Приморский край, Шахта им. Артема (пос. Шкотово)	0,6	17	17,637309	3,75

Таблица 2

Норильское месторождение

Значение параметра γ	Относительная погрешность вычисления ближней и дальней границ зон разрушения, %			
	I зона		II зона	
$\gamma = 3$	0,71	4,86	19,06	6,8
$\gamma = 3,2$	2,14	5,36	17,18	5,29
$\gamma = 3,29$	3,57	5,67	16,25	4,53

Таблица 3

Угольная шахта Dingji (КНР)

Значение параметра γ	Относительная погрешность вычисления ближней и дальней границ зон разрушения, %							
	I зона		II зона		III зона		IV зона	
$\gamma = 9$	0	2,69	10,60	10,80	11,60	3,00	9,51	7,04
$\gamma = 9,9$	0	1,81	8,09	8,17	8,00	0,13	5,45	3,44
$\gamma = 9,93$	0	1,61	8,00	8,07	7,88	0,22	5,33	3,33

В частности, для Норильского месторождения (см. табл. 2) можно заметить, что относительная погрешность вычисления границ первой зоны разрушения меньше в случае, когда $\gamma = 3$, т.е. параметр принимает целочисленное значение. Анализ результатов по угольной шахте Dingji (КНР) (табл. 3), показывает, что увеличение числа знаков после запятой в параметре γ понижает погрешность счета для вычисления границ всех зон разрушения. При более детальном рассмотрении можно сказать, что для первой

зоны увеличение числа знаков носит уточняющий характер, т.к. погрешность уменьшается не более чем на 1 %, в то время как относительная погрешность остальных зон разрушения сокращается намного сильнее на 2–4 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нельзя окончательно утверждать, какой из подходов вычисления параметра периодичности лучше. Поэтому, в зависимости от поставленной задачи,



предлагается использовать оба подхода – численный и аналитический. А именно при первичном анализе выработки на новом месторождении, когда необходимо решить вопрос о дальнейшей разработке выработки в данном месте, целесообразно использовать аналитический подход. Однако в случае более детального исследования, требующего определения числа зон, их радиальной протяженности, глубины появления зоны, точное положение последней зоны разрушения как границы области влияния одиночной выработки, конечно, требуются более точные данные, которые возможно получить численным методом.

В результате согласованного использования численного и аналитического способов определения параметра периодичности модели зонального разрушения массива горной породы достигается более качественная сходимость теоретических и натуральных результатов. Данное согласование позволяет понизить ошибку относительной погрешности на этапе расчета параметров исследуемой модели, что существенно повышает точность и качество результатов, полученных с её помощью, в дальнейшей работе.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 14-11-00079.

Библиографический список

1. Гузев М.А., Парошин А.А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Том 42. – №1. – С. 147–156.
2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state // Journal of Mining Science. – 2011. – № 47(1). – P. 37–46.

DOI:10.1134/S1062739147010059

3. Циху Ц., Чжу К., Кси Е. Влияние горизонтальных напряжений на явление зональной дезинтеграции горных пород в массиве с выработкой круглого сечения // ФТПРПИ. – 2012. – № 2. – С. 88–97.
4. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – № 64. – P. 246–257. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2013.08.010
5. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel // Acta Mechanica Sinica. – 2015. – Vol.28. – № 6. – P.722-734. DOI:10.1016/S0894-9166(16)30012-X
6. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – № 3(1). – P. 1–9. DOI:10.3724/SP.J.1235.2011.00001
7. Ксендзенко Л.С. Разработка метода определения параметров зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг подземных выработок // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. – 2011. – № 3/4(8/9). – С.144–166.
8. Закономерности деформирования и разрушения сильно сжатых горных пород и массивов: монография / Ксендзенко Л.С. и др. – Владивосток: ДВФУ, 2014. – 219 с.
9. Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N., Ksendzenko L.S. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – № 8. – P. 164–169. DOI:10.1016/j.jrmge.2015.09.010
10. Li S., Wang H., Qian Q., Fan Q., Yuan L., Xue J., Zhang Q. In-situ monitoring of zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2008. – Vol.27. – № 8. – P. 1545–1553. DOI:10.1155/2015/230126



“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2016, No. 2, pp. 43-47

Title:	Optimization of calculation of parameter of the frequency model zonal destruction of rocks
Author 1	Name&Surname: Ludmila S. Ksendzenko Company: Far Eastern Federal University Work Position: Associate Professor of the Department of algebra, geometry and analysis Scientific Degree: Candidate of Physico-Mathematical Sciences Contacts: ksendzenko@mail.ru
Author 2	Name&Surname: Alexandr S. Losev Company: Institute of Applied Mathematics, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Work Position: Senior Researcher Scientific Degree: Candidate of Physico-Mathematical Sciences Contacts: A.S.Losev@yandex.ru
Abstract:	An overview of the new, the most significant results in the field of mining research based on the use of non-Euclidean continuum model to describe the distribution of the stress field around the development of circular cross-section. The question of the accuracy of calculation of the parameters of the models constructed and compared with field experiments. Considered separately taken model parameter frequency zonal fracture rock mass around deep development of circular cross section. Selecting this option justified its prognostic significance for solving problems in the study of mining deposits. A comparative analysis of analytical and numerical determination of this parameter with the field data of two independent fields. The technique is described and sharing analytical and numerical approach, depending on the task on the test field.
Keywords:	highly compressed array; zonal destruction; options; Non-Euclidean model; array; Full-scale data
References:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Guzev M.A., Paroshin A.A. Neevklidova model' zonal'noy dezintegratsii gornyh porod vokrug podzemnoy vyrabotki. [<i>UnEuclidean model of zonal disintegration of mountain breeds round the underground making</i>] Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, 2001, vol. 42, no. 1. pp. 147–156. 2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state. Journal of Mining Science, 2011, no. 47(1), pp. 37–46. DOI:10.1134/S1062739147010059 3. Tsihu TS., Chzhu K., Ksi E. Vliyanie gorizonta'nyh napryazheniy na yavlenie zonal'noy dezintegratsii gornyh porod v massive s vyrabotkoy kruglogo secheniya. [<i>Influence of horizontal tensions on the phenomenon of zonal disintegration of mountain breeds in an array with making of round section.</i>] FTPRPI, 2012, no. 2, pp. 88–97. 4. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, no. 64, pp. 246–257. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2013.08.010 5. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel. Acta Mechanica Solida Sinica, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 722-734. DOI:10.1016/S0894-9166(16)30012-X 6. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, no. 3(1), pp. 1–9. DOI:10.3724/SP.J.1235.2011.00001 7. Ksendzenko L.S. Razrabotka metoda opredeleniya parametrov zonal'noy struktury razrusheniya sil'no szhatogo massiva vokrug podzemnyh vyrabotok. [<i>Development of method of determination of parameters of zonal structure of destruction of the strongly compressed array round the underground making.</i>] Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011, no. 3/4(8/9), pp.144–166. 8. Ksendzenko L.S., Makarov V.V., Opanasyuk V.N., Golosov A.M. Zakonomernosti deformirovaniya i razrusheniya sil'no szhatyh gornyh porod i massivov: monografiya [The



regularities deformation and destruction of highly compressed rock mass and arrays: a monograph]. – Vladivostok, DVFU, 2014. 219 p.

9. Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N., Ksendzenko L.S. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, No. 8, pp. 164–169. DOI:10.1016/j.jrmge.2015.09.010

10. Li S., Wang H., Qian Q., Fan Q., Yuan L., Xue J., Zhang Q. In-situ monitoring of zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 27, No. 8, pp. 1545–1553. DOI:10.1155/2015/230126

