

УДК 622.34

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ
ДЛЯ СЛОЖНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ СВОЙСТВАМИ
ПОРОДНОГО МАССИВА**

М. Адебейо, Э. Нордлунд

*Технологический университет Лулео,
E-mail: idris.musa@ltu.se, SE-971 81, Швеция*

Представлен вероятностный подход для оптимизации методики расчета параметров забоя с учетом изменчивости свойств горного массива на примере сложного рудного месторождения в Канаде. Для точного определения значений входящих геотехнических параметров использован вероятностный метод РЕМ (метод точечной оценки) в совокупности с численным анализом и программным обеспечением FLAC^{3D}. Определены деформации выработок с различной геометрией и оптимальные параметры выработки для минимизации проблем управления состоянием массива. Полученные результаты по распределению деформаций стенок и почвы выработок анализировались для каждого варианта с целью выбора их наилучшей геометрии и достижения оптимальной устойчивости.

Сложное рудное тело, вероятностный метод, изменчивость породного массива, геометрия выработки, метод точечной оценки

DOI: 10.15372/FTPRI20190507

Безопасность и экономика — важнейшие вопросы в горной промышленности, особенно при подземной разработке, которая отличается неоднородностью рудного тела и условиями высоких напряжений. Основная цель проектирования рудника — достижение наиболее полного извлечения полезных ископаемых при гарантированной устойчивости выработки и пород в ее окрестности. Максимально возможная добыча зависит от размеров шахты и используемых методов разработки. Однако экономические выгоды от увеличения объема выработки могут негативно сказаться на устойчивости забоя и возможном разубоживании руды. Необходима разработка оптимальной методики проектирования, которая экономически целесообразна и способствует уменьшению рисков при эксплуатации.

Породный массив характеризуется разнообразием физико-механических свойств, что нужно учитывать в методике проектирования подземной выемки пород. Такая изменчивость обусловлена различными факторами, влияющими на формирование массива. Вследствие этого процессы обрушения горного массива различны, что существенно влияет на устойчивость открытого забоя. В [1–5] показано, что расчеты устойчивости с использованием средних

Работа выполнена при финансовой поддержке Центра прогрессивного горного дела и металлургии (САММ) Технологического университета (Лулео, Швеция).

значений исходных параметров могут не отражать реального поведения массива. Изменчивость свойств пород следует учитывать при расчете открытого забоя с помощью метода случайного распределения свойств.

В данной работе изменчивость свойств породного массива включена в цифровые модели расчета устойчивости открытого забоя для различных вариантов его геометрии с использованием программного обеспечения $FLAC^{3D}$ и метода явных конечных разностей [6]. Прочность на сжатие UCS и индекс геологической прочности GSI пород представлены по нормальному распределению. Их средние значения и стандартные отклонения вычислялись по данным полевых изысканий в Канаде. Значения m_i для породного массива заимствованы из таблицы, предложенной в [7]. В качестве исходных параметров в обобщенном эмпирическом уравнении Хоека – Брауна [8] взяты произвольные значения по шкале UCS, GSI и m_i при определении упруго-пластичных характеристик массива методом Монте – Карло, доступным в среде Excel в виде надстройки @Risk [9]. В качестве исходных данных для вероятностной модели использованы параметры, приведенные в табл. 1. При оценке изменчивости свойств породного массива применялся метод точечной оценки PEM [10] совместно с другими численными методами [1, 5, 11 – 16]. Результаты моделирования для различных геометрий выработок сравнивались для определения оптимальных размеров.

ТАБЛИЦА 1. Параметры породного массива для моделирования

Параметр	Среднее значение	Стандартное отклонение
Модуль деформации, ГПа	19.18	6.73
Угол внутреннего трения, град	50.00	1.81
Прочность, МПа:		
при растяжении	3.65	1.22
сцепления	12.91	1.37

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Постановка задачи. Для численного анализа использовалась коммерческая версия $FLAC^{3D}$. Модель в плане симметрична и параллельна забою и оси выработки (рис. 1а). Размеры выработки по высоте и ширине составляют 5×5 м. Рассмотрено шесть разных вариантов забоя. На рис. 1б показан вариант А, размеры всех вариантов приведены в табл. 2.

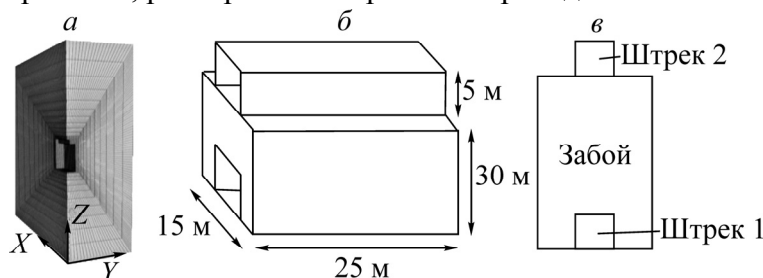


Рис. 1. Трехмерная цифровая модель (а); геометрия выработок (б); последовательность моделирования (в)

Полные размеры модели составляют 240 м в высоту, 60 м в ширину и 180 м в длину по оси забоя. Размеры модели достаточны, чтобы исключить любые граничные влияния. Более мелкая сетка применена в зоне забоя, а к границам штрека она постепенно возрастает. Последовательность построения модели состоит из трех этапов (рис. 1в). Согласно данной последовательности, сначала проводился штрек 1, затем штрек 2 с учетом доведения модели до равновесного состояния перед выемкой открытого забоя. Для минимизации влияния внезапного смещения пород при экскавации забоя применялась FISH функция ZONK3DF3FIS для создания выработанного пространства в зоне выемки и постепенного смещения действующих в ней нагрузок [6].

ТАБЛИЦА 2. Варианты геометрии открытого забоя в моделях, м

Вариант	Высота	Ширина	Длина
A	30	15	25
B	30	12	25
C	25	15	25
D	25	12	25
E	20	15	25
F	20	12	25

Изменчивость свойств массива пород при численном моделировании. Метод точечной оценки предполагает случайные значения входных / выходных данных о массиве пород и широко применяется в геотехнической практике для надежного расчета. Данный подход используется при аппроксимации средних и стандартных отклонений проектных параметров, которые являются функциями от нескольких входных параметров. Метод двухточечной оценки требует 2^n решений, когда имеется n переменных. Оценка проводится при одном стандартном отклонении по среднему $m \pm \sigma$ от каждого распределения случайных переменных. Параметры исследуемого материала представлены в табл. 3, где эти четыре показателя выступают в качестве стохастических переменных. Таким образом, для каждого варианта геометрии забоя приводится 16 расчетов.

ТАБЛИЦА 3. Параметры исследуемого материала

Набор параметров	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль деформации, ГПа	Прочность при растяжении, МПа
1	11.54	48.20	12.45	2.43
2	14.28	48.20	12.45	2.43
3	11.54	51.80	12.45	2.43
4	14.28	51.80	12.45	2.43
5	11.54	48.20	25.90	2.43
6	14.28	48.20	25.90	2.43
7	11.54	51.80	25.90	2.43
8	14.28	51.80	25.90	2.43
9	11.54	48.20	12.45	4.87
10	14.28	48.20	12.45	4.87
11	11.54	51.80	12.45	4.87
12	14.28	51.80	12.45	4.87
13	11.54	48.20	25.90	4.87
14	14.28	48.20	25.90	4.87
15	11.54	51.80	25.90	4.87
16	14.28	51.80	25.90	4.87

Напряженное состояние породного массива in situ. В зоне канадского щита максимальное главное напряжение σ_1 и среднее главное напряжение σ_2 действуют почти в горизонтальной плоскости с углом падения $0-10^\circ$, минимальное главное напряжение σ_3 действует почти по вертикали [17]. Следовательно, эти напряжения можно обозначить как максимальное σ_H и минимальное σ_h горизонтальные и вертикальное σ_v . Вертикальная составляющая имеет линейную зависимость от глубины залегания [18], т. е. $\sigma_v = \gamma H$, где γ — удельный вес; H — мощность вышележащей толщи. Горизонтальные напряжения, действующие на массив, оценить сложнее, чем вертикальные. В данном исследовании максимальные и минимальные горизонтальные напряжения определялись на основе зависимости, предложенной в [19]. Ниже приведены параметры породного массива для расчетной схемы: глубина отработки 1480 м; удельный вес 0.026 МН/м^3 ; $\sigma_v = 38.5 \text{ МПа}$; $\sigma_H = 57.8 \text{ МПа}$; $\sigma_h = 50 \text{ МПа}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены шесть вариантов геометрии забоев, исследовано влияние размеров выработки на смещения пород. Горизонтальные смещения прослеживались на половине высоты стенки забоя, вертикальное оценивалось по центру почвы выработки. Поскольку забой в плане симметричен, предполагается, что такие же горизонтальные смещения будут наблюдаться на обеих стенках выработки. Деформация стенок забоя определялась по горизонтальным смещениям. Средние и стандартные отклонения значений деформации и вертикальных смещений получены по результатам 16 расчетов для каждого варианта (табл. 2). Чтобы показать распределение вероятности деформаций, принято нормальное распределение смещений для статистического анализа.

Распределение плотности вероятностей деформаций стенок вариантов А–F представлено на рис. 2а, для почвы забоя — на рис. 2б. Средние значения и стандартные отклонения отмечены в верхней части каждого графика, а максимальные и минимальные возможные значения показаны для 95 % доверительного интервала.

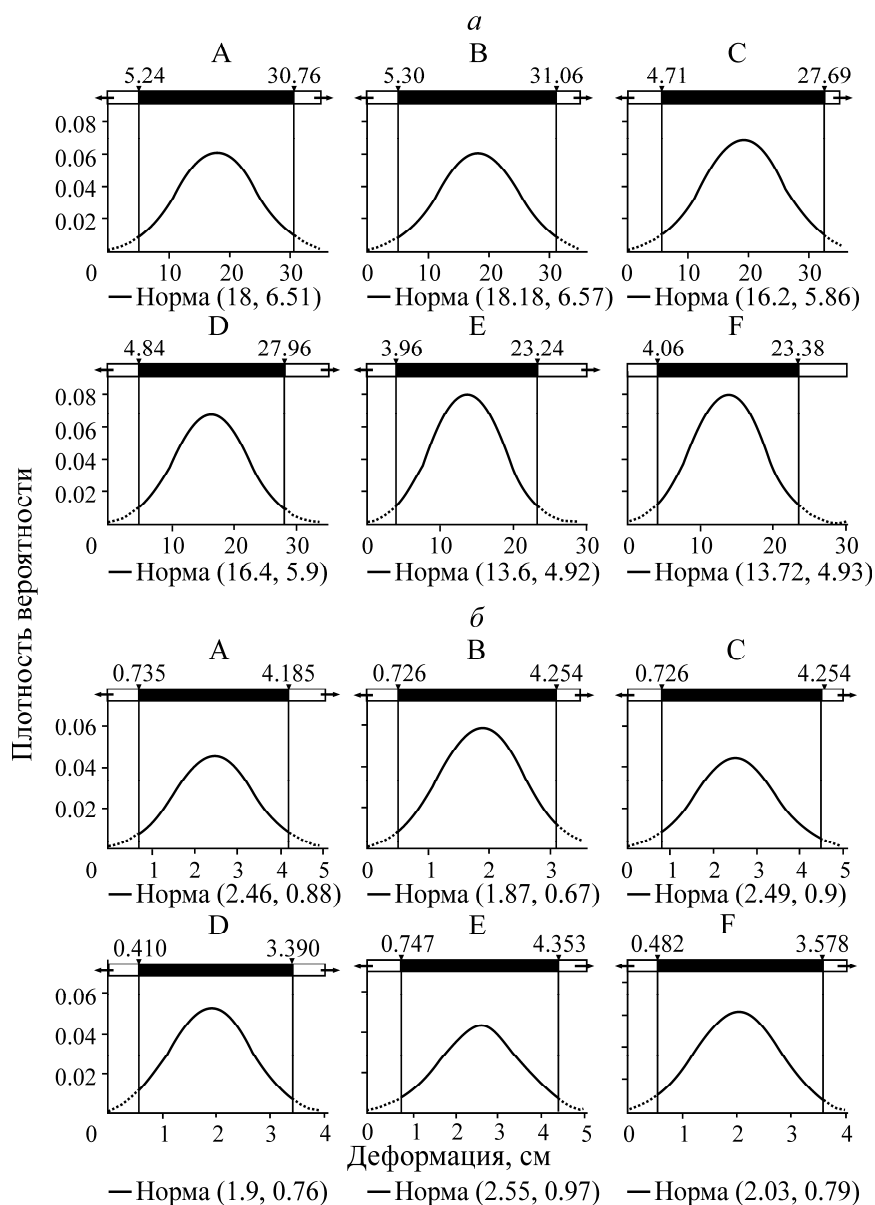


Рис. 2. Распределение плотности вероятностей деформации стенок (а) и почвы (б) забоя

Ввиду изменчивости свойств породного массива, возможные деформации выработки варьируют от минимальных до максимальных значений по всем вариантам. На рис. 2а видно, что распределение деформаций стенок для вариантов А и В примерно одинаковое. Тот же тренд наблюдается для вариантов С и D, а также Е и F. Приведенное на рис. 2б распределение деформаций при вспучивании почвы забоя с той же шириной (варианты А, С, Е) примерно такое же. При сравнении деформаций стенок забоя одинаковой высоты (например, варианты А и В) забой с меньшим соотношением высоты к ширине H/W подвергался меньшей деформации. Средняя деформация стенок забоя в варианте В примерно на 1 % выше по сравнению с вариантом А, что не очень существенно. Однако, чем шире забой, тем выше степень пучения почвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании влияния геометрии забоя на его устойчивость отмечено, что ширина выработки имеет большее значение, чем высота забоя. Так, при уменьшении ширины с 15 до 12 м при одинаковой высоте 30 м (варианты А, В) наблюдается снижение пучения почвы примерно на 24 %. Относительное снижение характерно и для других пар вариантов. Возможное объяснение этому состоит в том, что по мере развития проблемной зоны в обратном направлении и в почве забоя происходит спад вертикального напряжения в зоне разгрузки, что вызывает оседание кровли и пучение почвы [20]. По мере увеличения ширины забоя высота зоны разгрузки и амплитуда деформаций кровли и почвы также увеличиваются. Когда высота забоя остается постоянной, а его ширина уменьшается до 12 м (от варианта А к В), наблюдается увеличение средних значений деформаций стенок $\sim 1\%$. Если соотношение H/W растет (т. е. максимальное главное напряжение направлено по горизонтали перпендикулярно стенке забоя), то возрастает и амплитуда деформации стенки. При квадратном сечении забоя ($H/W \rightarrow 1$) выработка более компактна и вызывает меньший уровень деформаций. При высоком значении соотношения H/W напряжения в массиве более высокие, что доказывает сравнение вариантов рис. 3.

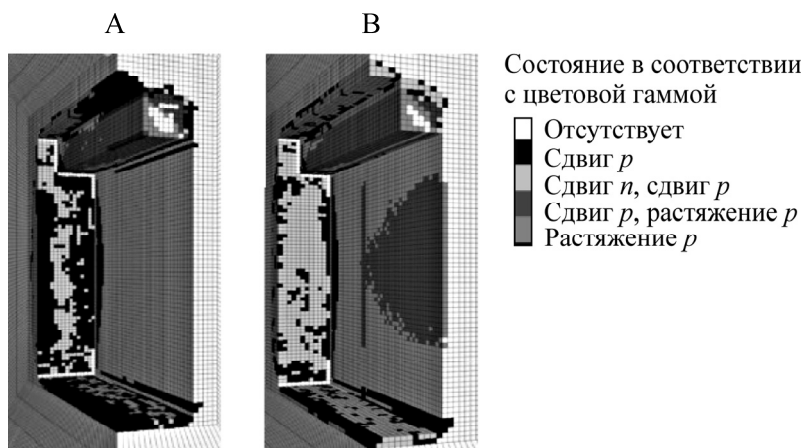


Рис. 3. Зоны деформаций в окрестности забоя для вариантов А и В

При выборе оптимальных размеров забоя рассчитывались деформации разрушения для каждого варианта, затем они переводились в допустимые деформации стенок забоя. Средняя критическая деформация вычислялась по уравнению $\varepsilon_c = \sigma_{cm} / E_m$, где ε_c — критическая деформация; σ_{cm} — прочность на одноосное сжатие; E_m — модуль Юнга [21].

С учетом параметров табл. 1 средняя критическая деформация для массива пород составляет 0.37 %. Допустимая деформация ε_a найдена по уравнению $\varepsilon_a = \varepsilon_c / (1 - R_a)$, R_a — параметр, выражающий остаточную прочность (принято $R_a = 0.7$). Допустимая деформация стенки забоя WC_a получена по выражению $WC_a = 2E_R\varepsilon_a$, где E_R — эквивалентный радиус, вычисленный в [22]: $E_R = 0.65[(H \times W)^{0.625} / (H + W)^{0.25}]$.

Вероятность того, что значение смещений по каждому варианту будет превышать максимально допустимые деформации стенок забоя, определялась по уравнению кумулятивной функции плотности [23]. Результаты расчетов допустимой деформации и соответствующая вероятность превышения значений WC_a приведены в табл. 4. Видно, что вариант Е имеет наименьшую вероятность превышения допустимой деформации, однако показывает наибольшую амплитуду деформации почвы. В варианте С амплитуда деформации почвы забоя выше, чем в варианте А, хотя и имеет более низкую вероятность деформаций. Таким образом, с учетом больших размеров забоя ($30 \times 15 \times 25$ м) вариант А имеет оптимальную геометрию, обеспечивая высокую производительность и более низкие эксплуатационные расходы.

ТАБЛИЦА 4. Ожидаемая вероятность превышения значений допустимой деформации стенок по вариантам

Вариант	E_R , м	WC_a , см	$P(X > WC_a)$, %
A	11.43	28.2	5.8
B	10.11	24.9	15.4
C	10.50	25.9	4.8
D	9.31	23.0	13.1
E	9.44	23.3	2.5
F	8.40	20.7	7.8

ВЫВОДЫ

Использован вероятностный подход для оптимизации методики проектирования открытого забоя в условиях неоднородных сложных тел. Для определения оптимальных размеров выработки рассмотрено шесть вариантов геометрии забоя. Изменчивость свойств породного массива, вызванная неоднородной природой рудного тела, учитывалась при создании моделей в формате FLAC^{3D} с использованием метода точечной оценки.

Показано, что мере роста отношения высоты к ширине увеличивается смещение стенок забоя, что оказывает значительное влияние на деформацию выработки. Амплитуда почвенных деформаций зависит главным образом от ширины забоя и величины главных напряжений.

Авторы выражают благодарность Центру прогрессивного горного дела и металлургии (CAMM) Технологического университета (Лулео, Швеция), а также признательны доктору Грэхему Свэму за предоставление полезной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cai M. Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and caven design, Rock Mech. and Rock Eng., 2011, Vol. 44, No. 4. — P. 379–399.
2. Idris M. A., Saiang D., and Nordlund E. Numerical analyses of the effects of rock mass property variability on open stope stability, Proc. of 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symp., San Francisco, Ca. 2011.
3. Idris M. A., Saiang D., and Nordlund E. Probabilistic analysis of open stope stability using numerical modelling, Int. J. Min. and Mineral Eng., 2011, Vol. 3, No. 4. — P. 194–219.

4. **Valley B., Kaiser P. K., and Duff D.** Consideration of uncertainty in modelling the behaviour of underground excavations, Proc. of 5th Int. Seminar on Deep and High Stress Min., Santiago, Chile, 2010.
5. **Idris M. A., Nordlund E., and Saiang D.** Comparison of different probabilistic methods for analyzing stability of underground rock excavations, The Electronic J. of Geotech. Eng., 2016, Vol. 21, No. 21. — P. 6555–6585.
6. **FLAC3D (Version 4.0)** [Computer software]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc.
7. **Marinos P. and Hoek E.** GSI- A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, Proc. of the GeoEng 2000 Conf., Melbourne, Australia, 2000.
8. **Hoek E., Carranza-Torres C. T., and Corkum B.** Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proc. of 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, ON, 2002.
9. **@RISK**, Risk analysis software using Monte Carlo simulation for Microsoft Excel and Microsoft Project. <https://www.palisade.com/msoffice/risk.asp>.
10. **Rosenblueth E.** Two-point estimates in probabilities, Appl. Math. Modelling, 1981, Vol. 5, No. 5. — P. 329–335.
11. **Abdellah Mitri H. S., Thibodeau D., and Moreau-Verlaan L.** Geotechnical risk assessment of mine development intersections with respect to mining sequence, Geotech. and Geol. Eng., 2014, Vol. 32, No. 3. — P. 657–671.
12. **Hoek E.** Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1998, Vol. 35, No. 1. — P. 63–68.
13. **Langford J. C. and Diederichs M. S.** Reliability based approach to tunnel lining design using a modified point estimate method, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2013, Vol. 60. — P. 263–276.
14. **Park D., Kim H. M., Ryu D. W., Choi B. H., and Han K. C.** Probability-based structural design of lined rock caverns to resist high internal gas pressure, Eng. Geol., 2013, Vol. 153. — P. 144–151.
15. **Park D., Kim H. M., Ryu D. W., Song W. K., and Sunwoo C.** Application of a point estimate method to the probabilistic limit-state design of underground structures, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2012, Vol. 51. — P. 97–104.
16. **Napa-García G. F., Beck A. T., and Celestino T. B.** Reliability analyses of underground openings with the point estimate method, Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, Vol. 64. — P.154–163.
17. **Arjang B. and Herget G.** In situ ground stresses in the Canadian hard rock mines: an update, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1997, Vol. 34, No. 3–4. — P. 15.e1–15.e16.
18. **Herget G.** Stress assumptions for underground excavations in the Canadian Shield, Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstract, 1987, Vol. 24. — P. 95–97.
19. **Diederichs M. S.** Instability of hard rock masses: the role of tensile damage and relaxation, Waterloo, ON, University of Waterloo, 1999.
20. **Milne D. M.** Underground design and deformation based on surface geometry British Columbia, University of British Columbia, BC, 1997.
21. **Sakurai S.** Strength parameters of rocks determined from back analysis of measured displacements, Proc. of the First Asian Rock Mech. Symp., Seoul, South Korea, 1997.
22. **Huebscher R. G.** Friction equivalents for round square and rectangular ducts, ASHVE Transactions, 1948, Vol. 54. — P. 101–118.
23. **Ang A. H-S. and Tang W. H.** Probability concepts in engineering, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

Поступила в редакцию 12/XI 2018

После доработки 31/I 2019

Принята к публикации 23/IX 2019