

УДК 622.28

**ЧИСЛЕННАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ  
НА УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТА РАЗРЕЗА ДОРЛИ (ИНДИЯ)**

**Инуmula Сатьянараяна<sup>1</sup>, Дж. Бади<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Главное управление по безопасности горных работ DGMS,  
E-mail: isatyanarayana@dgms.gov.in, 826001, г. Данбад, Индия

<sup>2</sup>Департамент горной инженерии, ИТ (ISM),  
E-mail: anandbudi@iitism.ac.in, 826004, г. Данбад, Индия

Рассмотрен ряд цифроаналитических моделей для эффективной оценки устойчивости борта разреза Дорли по проекту ОСП-II (компания SCCL, Индия). Физико-механические свойства породного материала, необходимые для данных моделей, получены в лабораторных тестах на кернах пород, взятых непосредственно *in situ*. Исследовано влияние шести разных факторов путем изменения значений одного из них при сохранении значений других коэффициентов методом поочередного варьирования. Для анализа влияния каждого показателя на коэффициент безопасности FoS борта карьера использовались методы предельного равновесия, конечных элементов и конечных разностей. Результаты анализа по данным методикам показали хорошее соответствие коэффициента FoS с номинальной погрешностью < 1 %.

*Устойчивость бортов разреза, методы LEM, FEM, FDM, коэффициент безопасности FoS, анализ устойчивости*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190305

Карьеры в Индии уже достигли глубины 400 м и станут в дальнейшем еще глубже. Самый глубокий карьер в мире — Bingham Canyon в штате Юта, США, глубиной свыше 1.2 км. С увеличением глубины разработки и постоянным расширением границ карьера устойчивость бортов становится одним из ключевых факторов безопасности производства. Аварии на угольных предприятиях Индии за период 2007–2017 гг. показали, что из 1261 случаев 709 приходится на открытые разработки. Инциденты, связанные с устойчивостью бортов, составили 221 случай (31 %), и число подобных аварий растет. Для обеспечения безопасной и бесперебойной работы карьеров важно системно оценивать и анализировать факторы, вызывающие неустойчивость бортов, что играет огромную роль при проектировании и эксплуатации карьеров всех размеров [1]. В настоящее время анализ устойчивости борта является важной задачей [2]. При проектировании бортов карьера следует учитывать следующие факторы, влияющие на устойчивость: предельный угол откоса борта  $\alpha$ , высоту борта  $H$ , удельный вес  $\lambda$ , сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и глубину залегания грунтовых вод от поверхности  $h_w$  и т. д. Проанализировано их влияние на коэффициент безопасности.

При проектировании устойчивых бортов разрезов применяются следующие математические методы: аналитические, включающие методы предельного равновесия LE [3]; численные [4–6], включающие методы снижения прочности SR, например методы конечных разностей и конеч-

ных элементов. Для оценки устойчивости бортов разреза традиционно используются различные двумерные методы предельного равновесия. Однако методы LE не дают возможности реально оценить распределение напряжений из-за отсутствия зависимости напряжение – деформация [7]. Несмотря на эти ограничения, данные методы до сих пор популярны благодаря простоте и надежности при анализе устойчивости откосов уступов, что позволяет достаточно точно определять значение коэффициента безопасности FoS.

Наряду с аналитическими решениями устойчивости бортов разреза, численное моделирование получило широкую востребованность относительно недавно. При открытой разработке месторождений оптимальный расчет устойчивости бортов (откосов уступов) оказывает существенное влияние на безопасность и экономику [8–13]. Инженерные решения должны основываться на результатах многофакторного анализа, с учетом приемлемого уровня коэффициента безопасности FoS [14]. Плоскость обрушения — наиболее важный элемент при расчете минимального коэффициента безопасности FoS по сравнению с разрушением сдвига. Обычно этот коэффициент определяется как отношение прочности породы на сдвиг к возникающему сдвигающему усилию. Применяемый коэффициент безопасности FoS при проектировании предельного угла откоса борта в условиях данного исследования составляет 1.2–1.3 [15].

Цель настоящей публикации — применение методов LE и SR на стадии проектирования, позволяющих понять степень влияния различных факторов на коэффициент безопасности борта разреза Дорли (Dorli OCP-II, Индия).

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РАЗРЕЗА

Разрез Дорли расположен в северо-западной части угольного бассейна долины Годавары, между населенными пунктами Дорли и Дантампалли, штат Телангана. Площадь разреза по проекту составляет 277.58 га. Глубина отработки  $H < 160$  м. Всего пробурено 29 скважин общей длиной 3119.31 м, плотность обуривания составила 19.47 м/км<sup>2</sup>. Геологически месторождение представляет часть угольного бассейна Дорли – Белламналли длиной 60 км по простиранию. Карьерное поле простирается от юго-востока (Дорли) и северо-запада на 5 км. Падение угольных пластов составляет 5–10°. Детальная геологоразведка показала наличие четырех угольных горизонтов: IY пласт (нижний), IY пласт (верхний), локальный пласт LB, пласт III.

#### ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗРЕЗА

Разрез спроектирован и эксплуатируется на основе практического опыта без какого-либо научного обоснования с номинальной производственной мощностью 0.7 млн т угля в год. Срок службы составляет 5 лет. Для горно-геологических условий месторождения принята транспортная система разработки. В 2016 г. в результате неожиданного обрушения рабочего борта разрез был остановлен (рис. 1).



Рис. 1. Обрушение борта разреза с развитием оползня

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БОРТА РАЗРЕЗА

Анализ устойчивости борта разреза проведен с помощью метода LE (SLIDE) и двух методов численного моделирования NM (FLAC|SLOPE) и RS2 (Phase2). Расчетная схема для всех методов одинакова (рис. 2). Высота рабочего борта модели принята равной 160 м, общий угол наклона  $\alpha = 41^\circ$ . Также учитывались мощность отдельных пластов и средний угол их падения  $7^\circ$ . Слоистость пород в модели представлена поверхностным почвенным слоем, выветрелым песчаником, песчаником и пластами угля. Параметры прочности на сдвиг являются самыми важными при оптимизации наклона борта разреза по методу LE и NM. Для определения плотности и прочности на сдвиг взяты керны из разреза и испытаны в лабораторных условиях. Конечные результаты испытаний образцов приведены в табл. 1, а средневзвешенные значения (строка 5) использованы при анализе.

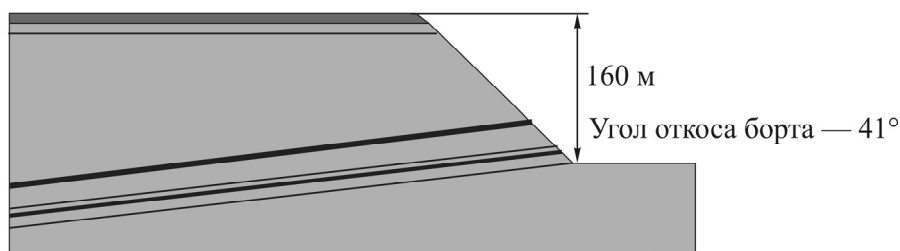


Рис. 2. Расчетная схема борта с использованием FLAC/SLOPE в сухих условиях

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства пород рабочего борта

| Литология                        | Сцепление $C$ , кПа | Угол внутреннего трения $\varphi$ , град | Удельный вес $\lambda$ , кН/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|---------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Почвенный слой                   | 32.00               | 23.00                                    | 12.10                                      |
| Выветрелый песчаник              | 100.00              | 15.00                                    | 21.00                                      |
| Песчаник                         | 150.00              | 20.00                                    | 22.00                                      |
| Уголь                            | 130.00              | 19.00                                    | 15.10                                      |
| Среднее значение по высоте борта | 136.48              | 20.75                                    | 20.96                                      |

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗРЕЗА

Вследствие обрушения рабочего борта на разрезе возникла необходимость исследовать факторы, приведшие к аварии, и принять меры безопасности для предотвращения их в будущем. Такими факторами для условий разреза Дорли ОСР-II являются: внутренние (топография, геология, литология пластов и т. д.) и внешние (осадки, предельный угол откоса борта). Просачивание (фильтрация) дождевых осадков меняет свойства пород, увеличивая их плотность, снижая сцепление и угол внутреннего трения. При анализе общим подходом является определение влияния на устойчивость борта при попеременном изменении каждого фактора. Изменяя один фактор, все остальные сохраняются фиксированными к их базовому значению. Это повышает сопоставимость результатов и сводит к минимуму вероятность сбоев компьютерных программ, что более вероятно при одновременном изменении нескольких входных факторов.

Анализ чувствительности для оценки устойчивости борта разреза может быть осуществлен в двух- или трехмерных постановках задачи с помощью методов LE и NM. При этом на плоское и объемное решения задач влияние оказывают такие факторы, как затраты времени на моделирование, критические параметры, требования к моделированию, горнотехнические особенности

разреза и конфигурация компьютера. В большинстве случаев при проектировании анализ устойчивости бортов предполагает двумерное моделирование в приближении плоской деформации вертикального сечения объекта при бесконечной длине борта, т. е. предусматривается значительная протяженность исследуемого объекта по сравнению с его поперечным размером.

Трехмерный анализ необходим в тех случаях, когда имеются разнонаправленные крупные геологические нарушения и явные изменения геомеханических элементов как вкрест, так и по простиранию борта разреза, оказывающие существенное влияние на результаты расчетов. Также 3D моделирование необходимо, когда геометрия откоса уступа в плане не может быть представлена двумерной моделью, предполагающей условия плоской деформации или осесимметричной постановки. Так как при формировании рабочего борта разреза Дорли ОСП-II не наблюдалось существенных плоскостей ослаблений, наиболее подходящим методом для оценки устойчивости откосов стала модель сплошной среды. Если скальный массив борта можно представить в виде эквивалентной сплошной среды, то, используя механику сплошной среды, решения двумерных задач является корректными. В случае, когда борт разреза представлен неустойчивыми породами без структуры, нет смысла переходить к моделям неоднородного массива. Моделируемые породы соответствуют идеальной упругопластической модели поведения массива под нагрузкой и подчиняются критерию прочности Мора – Кулона. Двухмерные компьютерные программы LEM, FDM и FEM, основанные на соответствующих моделях, обычно используются в геотехнических расчетах устойчивости бортов разреза для обеспечения высокой точности и верификации друг с другом.

Методы LE с SLIDE v.6.0 [10], методы NM с FLAC/SLOPE (Itasca, США) и RS2 [10] для изучения влияния факторов на устойчивость борта разреза Дорли ОСП-II сравнивались между собой. Значения коэффициента FoS, полученного с помощью программ LEM, FDM, FEM для борта разреза Дорли показаны на рис. 3. Установлено, что коэффициент FoS несколько меньше в LEM (0.94), чем FEM (1.05) и FDM (0.95). Результаты аналитического и численного моделирования фактической ситуации на месторождении, характеризующейся наличием воды в массиве, показывают, что борт разреза обрушается, так как коэффициент безопасности FoS составляет менее 1.2 [15]. Разрез был остановлен из-за обрушения борта.

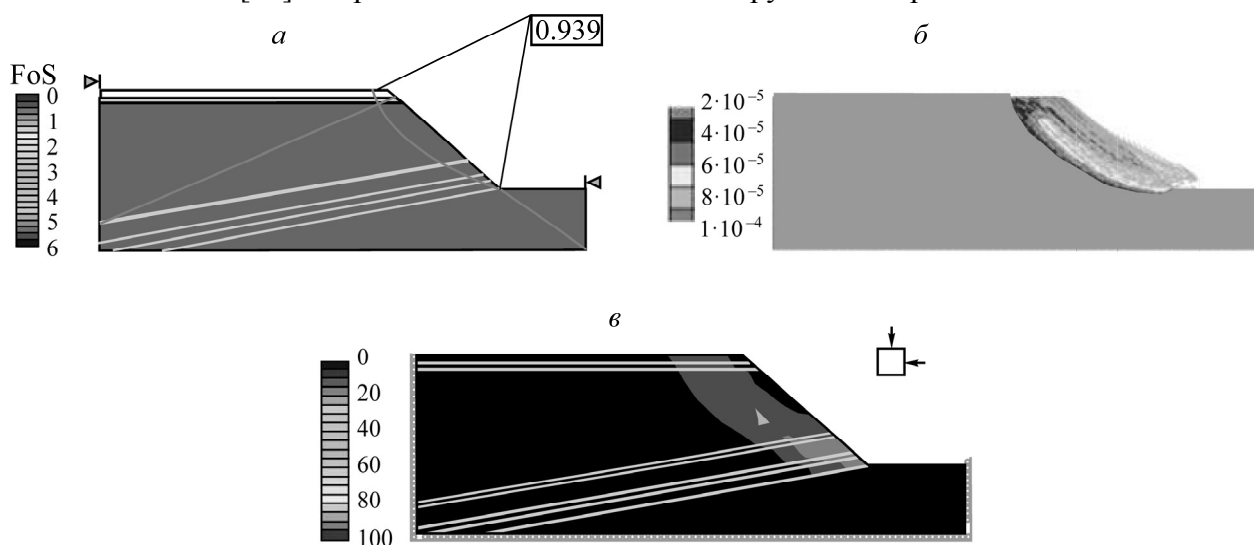


Рис. 3. Поверхность (линия) скольжения и коэффициент безопасности борта разреза Дорли по методам LEM (а), FDM (б), FEM (в):  $\alpha = 41^\circ$ ,  $H = 160$  м,  $\lambda = 20.96$  кН/м<sup>3</sup>,  $C = 136.48$  кПа,  $\Phi = 20.75^\circ$ ,  $h_w = 0$  м

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено влияние шести основных факторов (угол наклона и высота борта; удельный вес, сцепление и угол внутреннего трения пород; уровень грунтовых вод) на устойчивость борта разреза методом поочередного варьирования. Для анализа коэффициента безопасности FoS борта разреза использовались программные комплексы на основе методов предельного равновесия LEM (SLIDE), конечных элементов FEM (RS2) и конечных разностей FDM (FLAC/SLOPE).

*Влияние угла наклона борта разреза.* Чувствительность каждого параметра на значение коэффициента безопасности (FoS) рассчитана по трем методам (LEM, FEM, FDM) для модели (рис. 2) при углах откоса 16, 21, 26, 31, 36, 41, 46, 51, 56, 61 и 66°. График зависимости коэффициента безопасности от угла наклона борта представлен на рис. 4а. Сравнение результатов по трем методам расчета показывает высокую согласованность значений FoS с номинальной разницей < 1 %. Коэффициент безопасности FoS при увеличении угла от 16 до 66° убывает почти экспоненциально  $1.994 - 0.639$ . Общее снижение коэффициента безопасности составляет 2.71 % на единицу увеличения угла откоса.

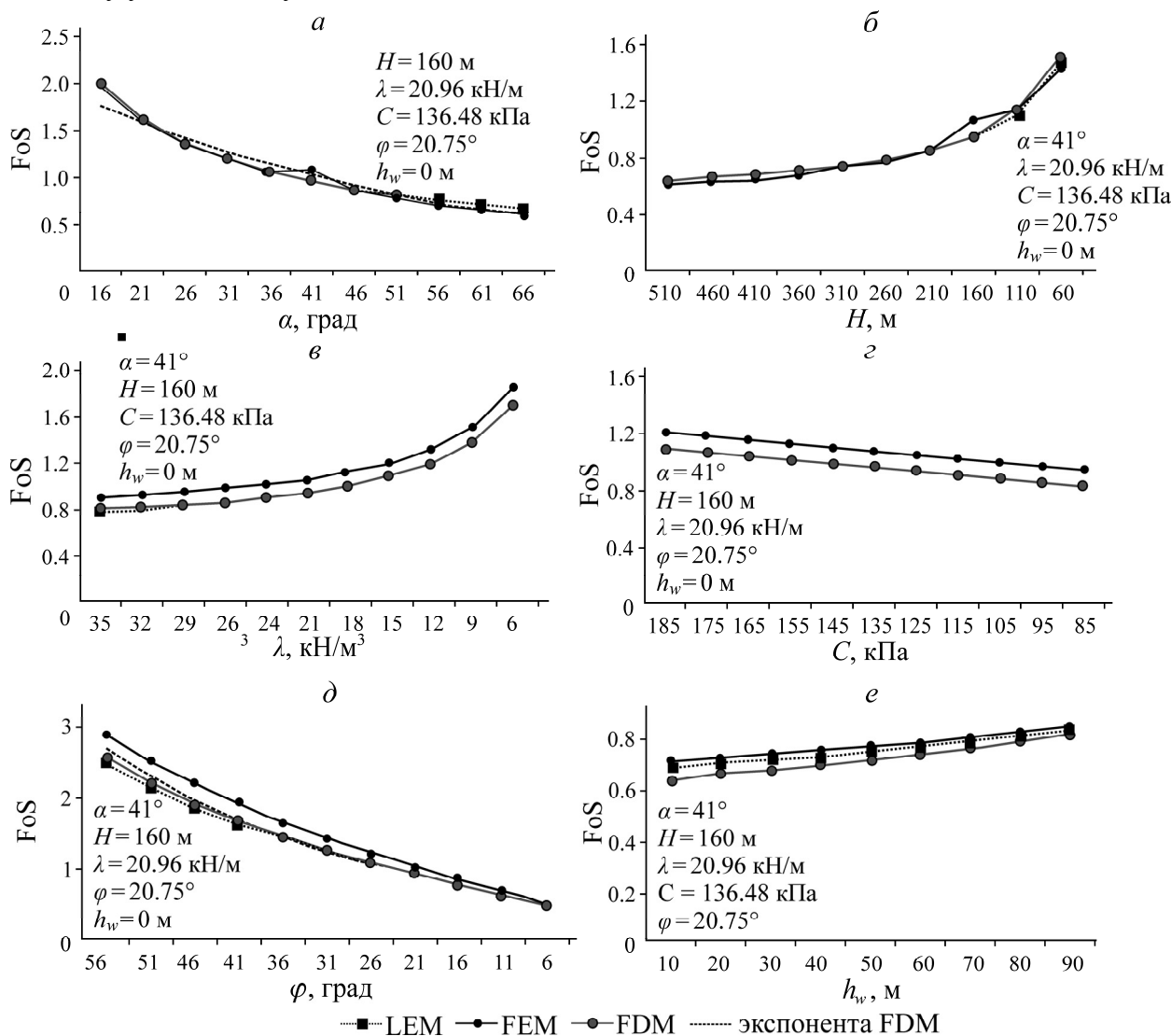


Рис. 4. Изменение коэффициента безопасности FoS: от угла откоса (а); высоты борта (б); удельного веса пород (в); величины сцепления пород (г); угла внутреннего трения пород (д); глубины залегания грунтовых вод (е)

*Влияние высоты борта разреза.* График зависимости коэффициента безопасности FoS от высоты борта показан на рис. 4б. Расчеты выполнены с шагом приращения 50 м начиная с глубины карьера 60 м. Сравнение результатов по трем методам также показало высокое совпадение значений FoS с номинальной разницей  $< 1\%$ . Видно, что FoS постепенно увеличивается по мере снижения высоты борта с 510 до 60 м. Общее снижение коэффициента FoS составляет 0.195 % на единицу приращения высоты борта.

*Влияние удельного веса пород.* Решения по изучению влияния удельного веса пород на коэффициент FoS выполнены с шагом уменьшения плотности  $3 \text{ кН/м}^3$  начиная с  $35 \text{ кН/м}^3$ . График зависимости представлен на рис. 4в. Сравнительная оценка результатов расчетов показывает высокую согласованность значений FoS с номинальной разницей  $< 2\%$ . Коэффициент безопасности FoS уменьшается нелинейно, по мере роста удельного веса пород, а амплитуда отклонений относительно высока  $5.886 - 17.658 \text{ кН/м}^3$ . Значения FoS в этом диапазоне снижаются на 13.89 %. Общее снижение коэффициента составляет 3.12 % на единицу увеличения удельного веса. Очевидно, что этот фактор имеет прямое и важное влияние на устойчивость откосов бортов разреза.

*Влияние сцепления пород.* График зависимости коэффициента безопасности FoS от сцепления пород показан на рис. 4г. Расчет проводился с шагом 10 кПа начиная от 185 кПа. Номинальное отклонение результатов составило  $< 2\%$ . Из графика следует, что коэффициент FoS снижается линейно, по мере снижения сцепления, а амплитуда отклонений относительно мала. Общее снижение коэффициента безопасности FoS составляет 0.25 % на единицу уменьшения сцепления.

*Влияние угла внутреннего трения пород.* График зависимости коэффициента безопасности FoS рассчитан с шагом уменьшения  $6^\circ$  начиная с  $56^\circ$  (рис. 4д). Сравнение результатов расчетов показало номинальную разницу коэффициента  $< 1\%$ . Видно, что коэффициент FoS увеличивается по экспоненте при росте угла внутреннего трения пород, а амплитуда отклонений относительно высока. Общий прирост коэффициента безопасности FoS составил 4.32 % на единицу увеличения угла внутреннего трения.

*Влияние уровня грунтовых вод.* Определение степени влияния воды на коэффициент FoS осуществлялось с шагом увеличения глубины залегания грунтовых вод 10 м от земной поверхности (рис. 4е). При наличии грунтовых вод в бортах разреза коэффициент безопасности снижается. При моделировании учитывается наличие водоносного горизонта, который ведет к снижению коэффициента безопасности FoS до 0.64 против 0.95 в сухих условиях (рис. 3б). Влияние уровня грунтовых вод на коэффициент безопасности значительно, так как при учете этого фактора в расчетной модели снижение FoS достигает 32.63 %. Коэффициент безопасности FoS растет линейно при увеличении глубины залегания водоносного горизонта, а амплитуда отклонений значений относительно невелика. Общий прирост коэффициента FoS составляет 0.23 % на 1 м глубины залегания грунтовых вод.

## ВЫВОДЫ

Проанализировано влияние шести основных факторов на устойчивость борта разреза Дорли, на котором произошло обрушение рабочего борта. Для анализа устойчивости борта разреза определена его геометрия и разработана расчетная схема с граничными условиями. Сравнительная оценка результатов расчетов, полученных тремя методами (предельного равновесия — LEM SLIDE, конечных элементов — FEM RS2 и конечных разностей — FDM FLAC/SLOPE), показала хорошую сходимость значений коэффициента безопасности FoS (разброс  $< 1\%$ ). Наибольшее влияние на коэффициент FoS оказывает фактор обводненности массива горных пород. Снижение значений в этом случае достигало 32.63 %. Другими факторами, влияющими на устойчивость борта разреза по степени важности, являются: угол внутреннего трения пород, удельный вес пород, предельный угол откоса, сцепление пород и высота борта разреза.

Результаты исследований показали, что отсутствие научного сопровождения проектных решений по обеспечению устойчивости бортов разреза сопряжено с повышенными рисками их обрушения. Выполненный геомеханический анализ должен способствовать безопасному и экономичному проектированию откосов бортов разреза. Для обеспечения безопасных условий эксплуатации разреза Дорли рекомендовано разработать дренажную систему с постоянным мониторингом в режиме реального времени.

Авторы выражают благодарность генеральному директору Главного управления по безопасности горных работ, а также руководству разреза Дорли за помощь в исследовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yang G., Zhang Y., and Zhang Y.** Variable modulus elastoplastic strength reduction method and its application to slope stability analysis, *Chinese J. of Rock Mech. and Eng.*, 2009, Vol. 28, No. 7. — P. 1506–1512.
2. **Wan L., Liu J., Zhao Z., Dong Y., and Cheng Z.** Layered sensitivity analysis and weight determination of rock slope stability impacting factors, *Water Resources and Hydropower Eng.*, 2012, Vol. 43, No. 3. — P. 59–62.
3. **Wu L. D., Su A. J., Huo X., and Qi Z. Y.** Comparison and analysis of slope safety factor by different limit equilibrium methods, *Water Resources and Power*, 2013, Vol. 31, No. 12. — P. 151–154.
4. **Farias M. M., and Naylor D. J.** Safety analysis using finite elements, *Computer and Geotechnics*, 1998, Vol. 22, No. 2. — P. 165–181.
5. **Duncan J. M.** State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, *J. Geotech. Eng.*, 1996, Vol. 122, No. 7. — P. 577–596.
6. **Kong B. F., Ruan H. N., Zhu Z. D., Yuan W. J., and Chen Z. Z.** Slope stability analysis by strength reduction based on distinct element method, *Yellow River*, 2013, Vol. 35, No. 4. — P. 120–123.
7. **Krahn J.** The limits of limit equilibrium analysis, *Canadian Geotechnical J.*, 2003, Vol. 40. — P. 643–60.
8. **Cheng Y. M. and Lau C. K.** Slope stability analysis and stabilization new methods and insight, Taylor and Francis e-Library, 2008.
9. **Nuric A., Nuric S., and Lapandic I.** Analysis of the overall slope stability on pit mine 'Moscanica' in Zenica with methods Bishop and Morgenstern — Price, *Proceedings 37th IOCMM, Technical faculty at Bor University of Belgrade and Copper Institute Bor*, 2005. — P. 28–34.
10. **Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., and Boyce G. M.** Slope stability concepts, slope stability and stabilisation methods, Second edition, published by John Willey and Sons, 2002, Inc. — P. 329–461.
11. **Petri R. and Stein W.** Opencast mine slopes – Stability of slopes in opencast lignite mines, North Rhine-Westphalia, *World of Mining Surface and Underground*, 2012, Vol. 64. — P. 114–125.
12. **Goldscheider M., Dahmen D., and Karcher C.** Consideration of earthquakes in stability calculations for deep underwater final slopes, *World of Mining-Surface and Underground*, 2010, Vol. 62. — P. 252–261.
13. **Martens P. N., Katz T., Ahmad S., and Fuchsschwanz M.** Investigations on stabilization of hard coal waste dump in Vietnam, *World of Mining-Surface and Underground*, 2011, Vol. 63. — P. 265–274.
14. **Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., and Boyce G. M.** Slope Stability Concepts, Slope Stability and Stabilisation Methods, Second edition, published by John Willey and Sons, 2002, Inc. — P. 329–461.
15. **Read J., and Stacey P.** Guidelines for Open Pit Slope Design, CSIRO Publishing, 2009.

*Поступила в редакцию 18/X 2018*

*После доработки 12/VI 2019*

*Принята к публикации 28/V 2019*