

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ КРУТОПАДАЮЩИХ МОЩНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ

ЗУБКОВ А. В.¹, СМИРНОВ О. Ю.¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58)

Цель исследования. При расчете устойчивости бортов и отдельных уступов исследованиям свойств пород, условиям их залегания, тектонической нарушенности массива и другим показателям, по которым оценивается прочность массива в целом, уделяется достаточно большое внимание. Представлены результаты научно-исследовательской работы, выполненной с целью рассмотрения условий отработки открытым способом крутопадающих мощных рудных тел золоторудных, медно-колчеданных и железорудных месторождений, которые обрабатываются карьерами округлой формы.

Методика исследования. Для выявления закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) бортов карьеров округлой формы решены объемные задачи. В результате расчетов были найдены напряжения σ_x , σ_y , σ_{xz} . На базе этих результатов построены номограммы коэффициентов концентрации напряжений в приповерхностном слое бортов карьеров и дневной поверхности для относительных величин параметров карьеров. Это дает возможность определять НДС карьеров любых размеров и углов наклона бортов.

Анализ результатов. Установлено, что при действии первоначальных гравитационно-тектонических напряжений в борту карьера величины горизонтальных (тангенциальных) напряжений и горизонтальных тектонических напряжений у его дна практически не зависят от угла погашения борта.

Выводы. Практическое применение представляется в использовании выявленных зависимостей коэффициентов концентрации напряжений в приповерхностном слое бортов карьеров и дневной поверхности для относительных величин параметров карьеров с целью определения НДС карьеров любых размеров и углов наклона бортов.

Ключевые слова: геомеханические условия; поле напряжений; гравитационные напряжения; тектонические напряжения; коэффициент концентрации; морфология рудных тел; прочностные свойства.

Введение. Возрастающая потребность в рудном сырье обуславливает интенсификацию подземных и открытых горных работ при отработке месторождений Российской Федерации, в том числе и мощных крутопадающих залежей. Это обстоятельство приводит к ускоренному росту глубины разработки и возникновению проблем обеспечения устойчивости конструктивных элементов систем разработки и, конечно, безопасности геотехнологий.

Образующийся при добыче полезного ископаемого карьер является самым грандиозным сооружением, возводимым в массиве горных пород. При расчете

устойчивости бортов и отдельных уступов исследованиям свойств пород, условиям их залегания, тектонической нарушенности массива и другим показателям, по которым оценивается прочность массива в целом, уделяется достаточно большое внимание [1–5].

Таблица 1. Параметры карьеров
Table 1. Parameters of open pits

Показатель	Вариант		
	I	II	III
Радиус у поверхности R , м	600	600	600
Радиус по дну r , м	75	100	130
Глубина H_k , м	370	500	660
Угол наклона борта α_b , град	35	45	55

Цель работы. В статье представлены результаты научно-исследовательской работы, выполненной с целью рассмотрения условий отработки открытым способом крутопадающих мощных рудных тел золоторудных, медноколчеданных и железорудных месторождений, которые в Российской Федерации обрабатывают карьерами округлой формы.

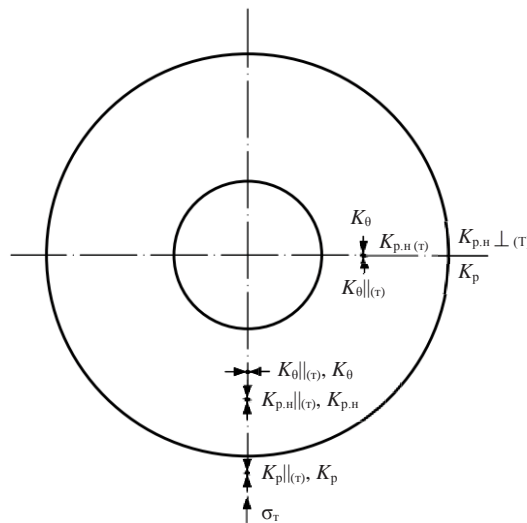


Рис. 1. Схема концентрации напряжений на плане карьера
Fig. 1. The scheme of the stresses concentration in the open pit layout

Методика проведения исследований. Подобная задача решалась ранее, но в настоящее время в связи с появлением более совершенных методов аналитических расчетов закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в бортах карьеров как для упругих и изотропных массивов, так и для массивов со сложным геологическим строением [6–12] появилась возможность проверить и скорректировать предыдущие результаты, а также получить новые. Для выявления закономерностей формирования НДС бортов карьеров округлой формы были решены объемные задачи. Параметры карьеров приведены в табл. 1.

В процессе моделирования задавали 2 типа напряженного состояния:

1. Гравитационные напряжения вертикальные σ_z^n и горизонтальные σ_r^n равны γH (γ – плотность пород, г/см³; H – глубина, м).

2. Горизонтальные тектонические напряжения: по оси $x - \sigma_T = 10$ МПа; по оси $y - \sigma_T = 0$.

В результате расчетов найдены напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xz}$. На базе этих результатов построены номограммы коэффициентов концентрации напряжений в приповерхностном слое бортов карьеров и дневной поверхности для относительных величин параметров карьеров. Это дает возможность, используя экстраполяцию и интерполяцию, определить НДС карьеров любых размеров и углов наклона бортов. Значения коэффициентов концентрации объяснены на рис. 1.

При действии γH коэффициенты концентрации: K_θ – тангенциальных напряжений; $K_p, K_{p,n}$ – радиальных и радиальных наклонных напряжений в борту.

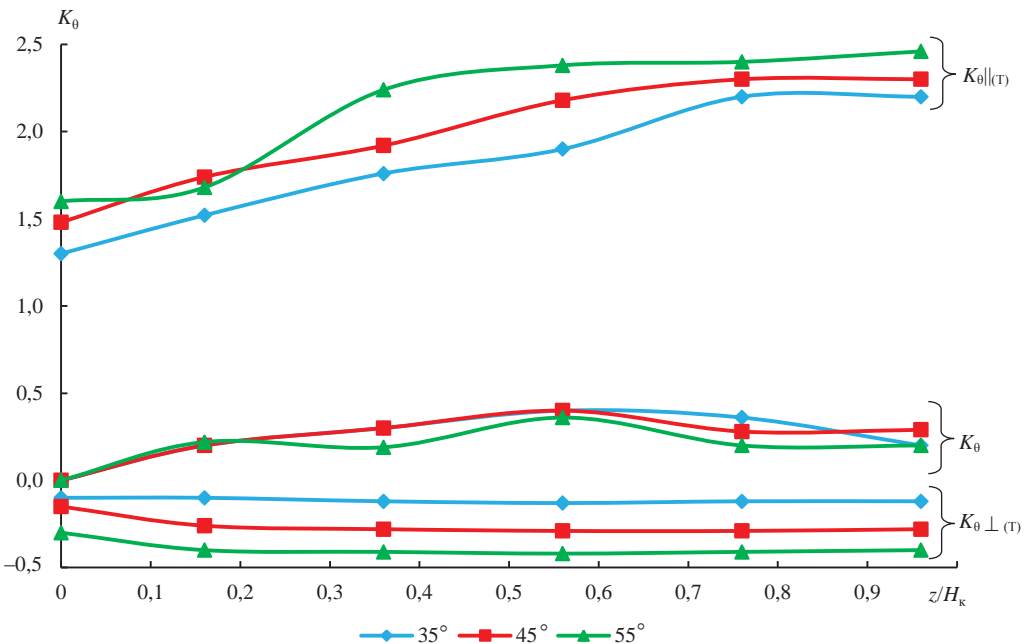


Рис. 2. Графики коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений по бортам карьера
 Fig. 2. The graphs of tangential stresses concentration coefficients along the open pit edges

При действии горизонтальных тектонических напряжений σ_T коэффициенты концентрации: $K_{\theta||(\tau)}$ – тангенциальных в направлении, параллельном действию σ_T ; $K_{\theta\perp(\tau)}$ – тангенциальных в направлении, перпендикулярном действию σ_T ; $K_{p,n||(\tau)}$ – радиальных наклонных в направлении, параллельном действию σ_T ; $K_{p,n\perp(\tau)}$ – радиальных наклонных в направлении, перпендикулярном действию σ_T ; $K_{p||(\tau)}$ – радиальных напряжений в направлении, параллельном действию σ_T на поверхности; $K_{p\perp(\tau)}$ – радиальных напряжений в направлении, перпендикулярном действию σ_T на поверхности.

При задании в качестве граничных условий гравитационных напряжений γH_k коэффициенты концентрации получали делением напряжений в любой точке карьера на величину гравитационных напряжений на уровне его дна, а при задании в качестве граничных условий $\sigma_T = 10$ МПа коэффициенты концентрации получали делением напряжений в любой точке карьера на 10.

Данные коэффициенты концентрации были привязаны по высоте к относительным координатам z/H_k , где z имеет начало координат на поверхности, и рас-

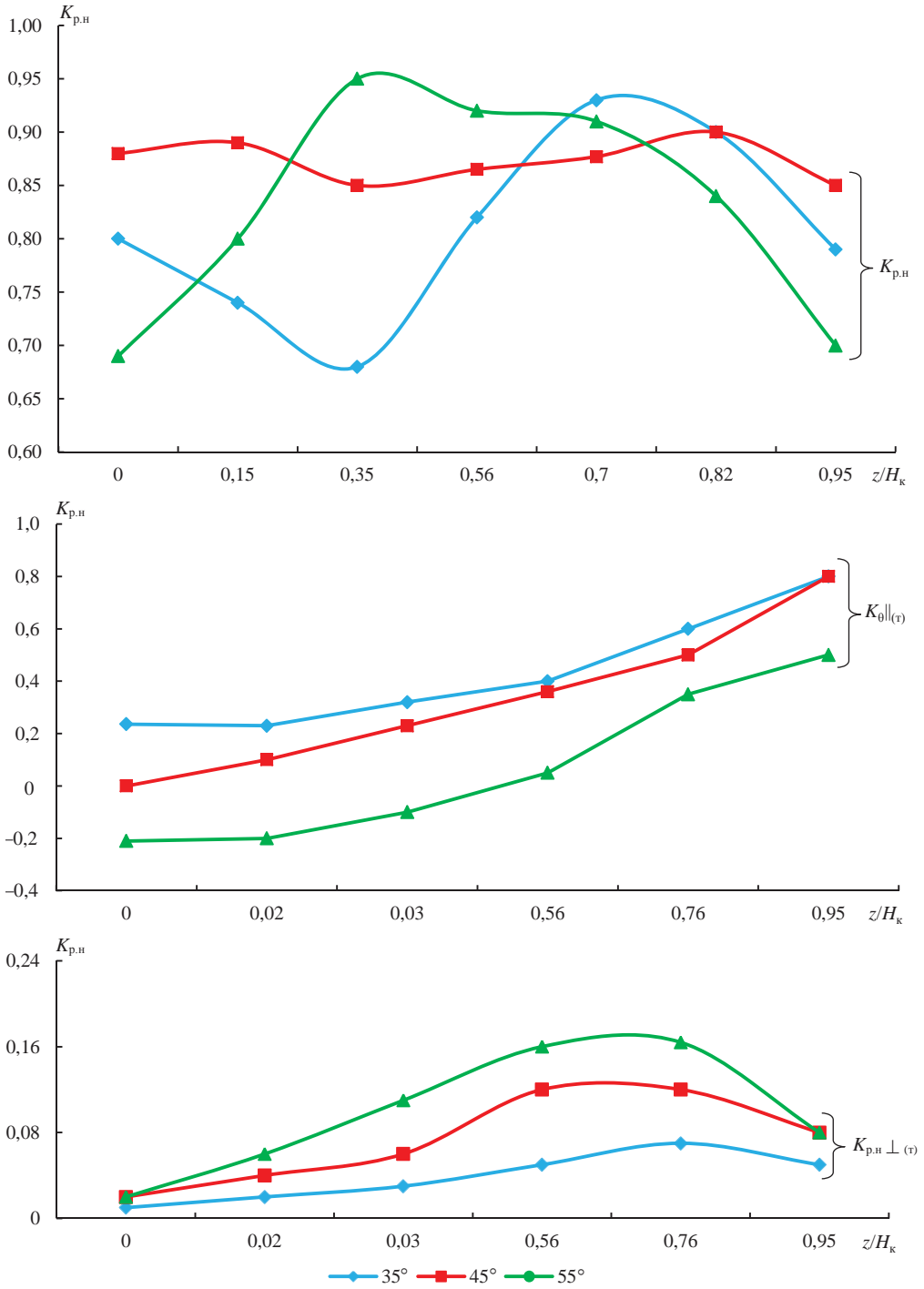


Рис. 3. Графики коэффициентов концентрации радиальных напряжений по борту карьера
 Fig. 3. The graphs of radial stresses concentration coefficients along the open pit edge

положены по линиям, которые образованы пересечением поверхности карьера и плоскостей xz , yz . К этим линиям приурочены минимальные и максимальные значения напряжений, а по остальным сечениям их величина занимает промежуточное положение.

Полученные результаты и их анализ. На рис. 2 приведены графики коэффициентов концентрации горизонтальных (тангенциальных) напряжений, где 35° , 45° , 55° – углы откоса борта карьера, град.

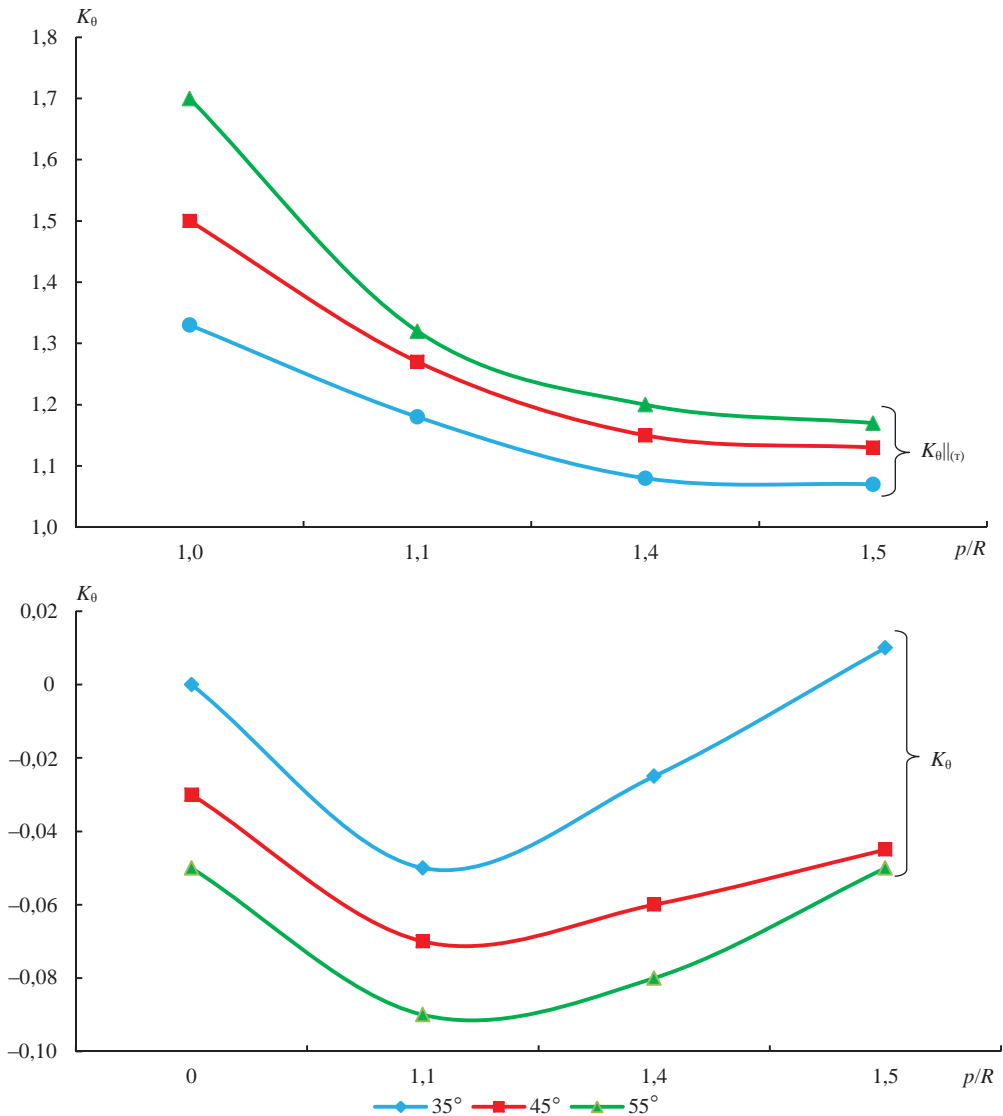


Рис. 4. Графики коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений по поверхности
Fig. 4. The graphs of tangential stresses concentration coefficients along the surface

Из рис. 2 видно, что гравитационные напряжения создают на контуре карьера незначительные по величине тангенциальные напряжения K_{θ} практически независимо от угла наклона борта карьера α_0 . Тектонические напряжения в зоне максимума ($K_{\theta||(\tau)}$) имеют значительные по величине коэффициенты концентрации и

тем больше, чем круче борт и ближе ко дну. В зоне минимума ($K_{\theta \perp (\tau)}$) сжимающие $\sigma_{\text{тх}}$ вызывают растяжения также значительной величины.

Если на месторождении действуют одновременно γH , $\sigma_{\text{тх}}$, $\sigma_{\text{ты}}$, то для определения напряжений в интересующей точке необходимо воспользоваться методом суперпозиции, соответственно по линиям Oy и Ox :

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta x} &= \sigma_{\text{тх}} K_{\theta \parallel (\text{тх})} + \sigma_{\text{ты}} K_{\theta \perp (\text{ты})} + \gamma H K_{\theta}, \\ \sigma_{\theta y} &= \sigma_{\text{тх}} K_{\theta \perp (\text{тх})} + \sigma_{\text{ты}} K_{\theta \parallel (\text{ты})} + \gamma H K_{\theta}.\end{aligned}$$

На рис. 3 приведены графики коэффициентов концентрации в радиальном направлении по склону борта.

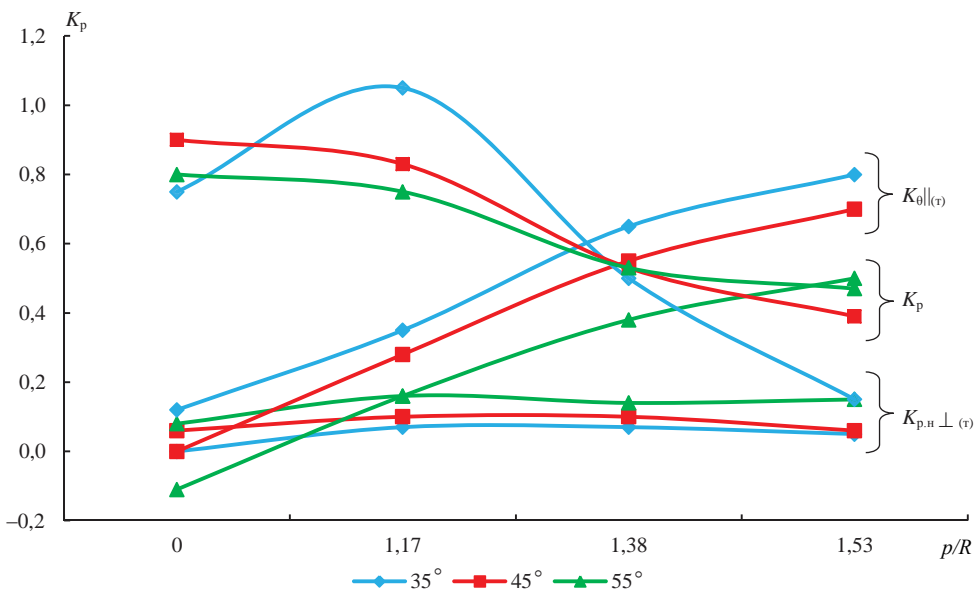


Рис. 5. Графики коэффициентов концентрации радиальных напряжений по поверхности
Fig. 5. The graphs of radial stresses concentration coefficients along the surface

Из рис. 3 видно, что максимальную величину имеют $K_{p,н}$ от γH , и тем больше, чем круче борт и ближе ко дну. Величина напряжений при $H = 300\text{--}700$ м у поверхности может достигать 10–25 МПа, и это в зоне, где первоначальные напряжения не превышали 1–4 МПа.

Коэффициенты концентрации от $\sigma_{\text{т}}$ $K_{p,н \parallel (\tau)}$ тем больше, чем положе карьер. Суммарные напряжения можно найти по формулам соответственно по линиям Ox и Oy :

$$\begin{aligned}\sigma_{Hx} &= \sigma_{\text{тх}} K_{p,н \parallel (\text{тх})} + \sigma_{\text{ты}} K_{p,н \perp (\text{тх})} + \gamma H K_{p,н}, \\ \sigma_{Hy} &= \sigma_{\text{тх}} K_{p,н \perp (\text{тх})} + \sigma_{\text{ты}} K_{p,н \parallel (\text{тх})} + \gamma H K_{p,н}.\end{aligned}$$

На поверхности в прибортовой зоне карьера значительных величин достигают $K_{\theta \parallel (\tau)}$ (рис. 4), и тем больше, чем ближе к борту и больше α_6 , а также K_p (рис. 5), но здесь большие значения соответствуют меньшим α_6 (R – радиус карьера у поверх-

ности, m ; p – расстояние от края карьера до точки определения величины напряжения в массиве, m).

Анализ коэффициентов концентрации показывает, что при действии только γH как радиальные, так и тангенциальные сжимающие напряжения достигают своего максимума в придонной части борта круглого карьера и тем больше, чем круче борт и глубже карьер. Величина радиального сжатия у поверхности при глубине карьера $H_k > 300$ м может быть более 15 МПа, а тангенциального – более 3 МПа, где уровень первоначальных напряжений был примерно равен 2 МПа. Это одна из основных причин закола бортов.

Наличие тектонической составляющей первоначальных напряжений резко увеличивает величину тангенциальных и радиальных напряжений. В табл. 2 приведены напряжения в борту у поверхности (числитель) и у дна (знаменатель) при совместном действии гравитационно-тектонических напряжений в карьере глубиной 500 м.

Таблица 2. Напряжения в бортах карьера округлой формы
Table 2. Stresses at the edges of circular open pits

σ	При $\sigma_T = -45$ МПа α_6 , град			При $\sigma_T = -10$ МПа α_6 , град		
	35	45	55	35	45	55
σ_θ	-54/-99	-54/-99	-54/-100	-12/-26	-12/-26	-12/-25
σ_n	-24/-85	-18/-81	-10/-76	-20/-36	-18/-39	-14/-42

При действии первоначальных гравитационно-тектонических напряжений σ_T в борту карьера величины горизонтальных (тангенциальных) напряжений σ_θ и горизонтальных тектонических напряжений σ_T у его дна практически не зависят от угла погашения борта. У поверхности величина σ_θ в 2 раза меньше, чем у дна, при любых значениях σ_T . Напряжение σ_T у поверхности уменьшается в 1,5–2,5 раза по мере увеличения угла погашения борта.

Область применения результатов. Практическое применение представляется в использовании выявленных зависимостей коэффициентов концентрации напряжений в приповерхностном слое бортов карьеров и дневной поверхности для относительных величин параметров карьеров с целью определения НДС карьеров любых размеров и углов наклона бортов.

Выводы. При действии только γH как радиальные, так и тангенциальные сжимающие напряжения достигают своего максимума в придонной части борта круглого карьера и в основном тем больше, чем круче борт и глубже карьер.

Наличие тектонической составляющей первоначальных напряжений резко увеличивает величину тангенциальных и радиальных напряжений.

При действии первоначальных гравитационно-тектонических напряжений в борту карьера величины горизонтальных (тангенциальных) напряжений и горизонтальных тектонических напряжений у его дна практически не зависят от угла погашения борта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 270 с.
2. Бежавски З. Управление горным давлением. М.: Мир, 1990. 254 с.
3. Гальперин А. М. Геомеханика открытых горных работ. М.: МГГУ, 2003. 473 с.
4. Хохряков В. С. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1982. 279 с.
5. Оника С. Г. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Минск: БНТУ, 2005. 58 с.

6. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 335 с.
7. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Огни, 1987. 527 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
9. Зенкевич О. С. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. М.: Мир, 1975. 543 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. М.: Мир, 1984. С. 28–76.
11. Амусин Б. З., Фадеев А. Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М.: Недра, 1975. 142 с.
12. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2018 года

Зубков А. В., Смирнов О. Ю. Результаты исследования условий отработки открытым способом крутопадающих мощных рудных тел // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 7. С. 5–13.

Сведения об авторах:

Зубков Альберт Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук. E-mail: stress.igd@mail.ru
Смирнов Олег Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук. E-mail: stress.igd@mail.ru

FORMING OPEN PIT TRANSPORT SYSTEMS WITH THE ACCOUNT OF ADAPTATION TO CHANGING EXCAVATION CONDITIONS OF DEEP COMPLEX STRUCTURED DEPOSITS

Zubkov A. V.¹, Smirnov O. Yu.¹

¹ Institute of Mining, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia.

Research aim. When calculating the stability of edges and separate benches, significant attention is given to the study of rocks properties, their position conditions, tectonic disturbance of a mass, and other indices, by which the strength of a mass in general is estimated. The results of a scientific-research work are presented, which has been fulfilled to examine the opencast mining conditions of steeply pitching thick ore bodies at gold ore fields, copper-pyrite deposits, and iron-ore deposits mined with circular open pits.

Research methodology. In order to discover regularities in the edges stress-strained state (SSS) formation, three-dimensional problems have been solved. As a result of calculations stresses σ_x , σ_y , σ_{xz} have been discovered. On the basis of these results, stresses concentration coefficients nomograms at the near-surface layer of open pits edges and daylight surface have been built for open pits parameters relative values. It makes it possible to determine SSS of open pits of any sizes and edge inclination angles.

Results analysis. It has been stated that under the action of original gravitational and tectonic stresses within the edge of an open pit, the values of horizontal (tangential) stresses and horizontal tectonic stresses near its bottom doesn't depend on the angle of the edge overall angle.

Conclusions. Practical use takes the form of applying the discovered regularities in stresses concentration coefficients at the near-surface layer of open pits edges and daylight surface for open pits parameters relative values in order to determine SSS of open pits of any size and edge inclination angles.

Key words: geomechanical conditions; stress field; gravitational stresses; tectonic stresses; concentration coefficient; ore bodies morphology; strength properties.

Research has been carried out under the government contract concerning scientific research 0405-2018-0003.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-5-13

REFERENCES

1. Baklashov I. V. [Deformation and destruction of rock massifs]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 270 p.
2. Beniavski Z. [Rock pressure management]. Moscow, Mir Publ., 1990. 254 p.
3. Gal'perin A. M. [Geomechanics of opencast mining]. Moscow, MSMU Publ., 2003. 473 p.
4. Khokhriakov V. S. [Opencast mining of mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 279 p.
5. Onika S. G. [Stability of edges and dumps]. Minsk, BNTU Publ., 2005. 58 p.
6. Zubkov A. V. [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg, IM UB RAS Publ., 2001. 335 p.
7. [The finite element method in geomechanics]. Moscow, Ognii Publ., 1987. 527 p. (In Russ.)
8. Segerlind L. [Application of the finite element method] Moscow, Mir, 1979. 392 p.
9. Zenkevich O. S. [The finite element method in engineering. Translation from English]. Moscow, Mir Publ., 1975. 543 p.

10. Gallager R. [The finite element method. Basics. Translation from English]. Moscow, Mir Publ., 1984, pp. 28–76.
11. Amusin B. Z., Fadeev A. B. [The finite element method when solving the problems of mining geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 142 p.
12. Fadeev A. B. [The finite element method in geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 221 p.

Information about authors

Zubkov Al'bert Vasil'evich – Doctor of Engineering Science, leading researcher of the Institute of Mining of the Ural Branch of RAS. E-mail: stress.igd @ mail.ru

Smirnov Oleg Iur'evich – Candidate of Engineering Science, senior researcher of the Institute of Mining of the Ural Branch of RAS. E-mail: stress.igd @ mail.ru
