УДК 624.137.2

В.В.ЗУБКОВ, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник, zubkov2005@yahoo.com*
И.А.ЗУБКОВА, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет).

V.V.ZUBKOV, *Dr. in eng. sc., chief research assistant, zubkov2005@yahoo.com*
I.A.ZUBKOVA, *PhD in eng. sc., cenior research assistant*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОЦЕНКА ФАКТОРА БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Представлены результаты численных экспериментов о влиянии природных факторов на значение фактора безопасности и размеры зон предельного состояния при анализе устойчивости бортов карьера.

Ключевые слова: фактор безопасности, устойчивость, борт карьера, численное моделирование

ASSESSMENT OF SAFETY FACTOR FOR ANALYSIS OF STABILITY OF BOARDS OF OPEN-CAST MINES

The paper contains the results of numerical experiments about the influence of natural factors on the value of safety factor and dimensions of ultimate state zones for analysis of stability of boards of open-cast mines.

Key words: safety factor, stability, board of open-cast mine, numerical modeling

Немногим более 30 лет назад большинство расчетов устойчивости бортов карьеров выполнялось путем графических построений или с использованием простейших вычислительных средств. Это направление основано на использовании теории предельного равновесия сыпучей среды [3]. В этом случае не нужно было знать напряженное состояние прибортового массива, но требовалось задание границы зоны возможного разрушения. Для ее построения использовались различные методы. Наиболее распространенный из них – метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, относящийся к схеме плоской задачи. Этому направлению посвящено много публикаций, обзор которых приведен в многочисленных монографиях и статьях [1, 4, 5, 7, 19, 20].

Второе направление основано на численных методах. В основном использовались методы конечных элементов (FEM), конечных разностей (FDM) или отдельных элементов (DEM). Они имеют большие преимущества по сравнению с традиционными методами, поскольку не только удовлетворяют условиям равновесия, но и позволяют рассчитывать напряженное состояние прибортового массива. Следует отметить, что в традиционной постановке эти методы позволяют рассчитывать напряженное состояние, поле смещений и пластические зоны в породном массиве. Однако, они не позволяют оценивать величину фактора безопасности при анализе устойчивости бортов карьеров. С развитием компьютерной техники и теории пластичности для горных пород в программах были реализованы нелинейные технологии, позволяющие использовать их при анализе устойчивости бортов карьеров. Эти технологии успешно используются многими авторами [10-12, 14, 18].

В настоящее время существует большое количество программ для анализа устойчивости бортов карьеров, например, в интернет-обзоре зафиксировано более 100 программ. Поэтому для решения задач по устойчивости бортов карьеров следует очень тщательно подходить к выбору программного продукта.

Известно, что на устойчивость бортов карьеров влияет множество факторов: геологическое строение прибортового массива, напряженное состояние породного массива (исходное и техногенное), водный режим, наличие разрывных нарушений, геометрия карьера, сейсмичность региона, климатические условия и время эксплуатации карьера. Понятно, что это не полный перечень влияющих факторов. Поэтому представляется целесообразным проводить оценку фактора безопасности при совместном использовании методики на основе теории предельного равновесия и современных компьютерных программ.

Мы будем работать с программой 3DEC [15], в которой реализована методика расчета фактора безопасности, предложенная в работе [10]. Первое упоминание о программе 3DEC было в 1985 г. [8]. Затем в 1988 г. появилась первая версия этой программы [13]. Программа 3DEC – численная реализация метода отдельных элементов (distinct element method), предложенного Cundall P.A. [9]. Этот метод берет свое начало из теории дискретных сред. Методом можно моделировать как собственно режим поведения дискретной среды, так и сплошной среды. Программы, реализующие метод отдельных элементов, непосредственно используют явные пошаговые по времени схемы решения уравнения движения. При этом блоки могут быть жесткие или деформируемые, а контакты деформируемые.

Построение расчетной модели. Построение расчетной модели карьера в формате, используемом в программе 3DEC, можно выполнить несколькими способами в зависимости от сложности рассматриваемого объекта. В нашем случае (для проекта карьера) можно воспользоваться программой PGEN (графическое приложение к программе 3DEC). Возможны два варианта. Например, мы имеем геолого-структурную модель карьера, построенную в AutoCAD. Импортируем модель карьера (формат *.dxf) в программу PGEN и строим сетку горизонтальных сечений. Задаем размеры расчетной модели и получаем блоковую структуру расчетной модели. Второй вариант – сетку горизонтальных сечений, построенную, например, с использованием графического пакета SURFER, преобразуем в формат *.pol, читаем их в PGEN, задаем размеры расчетной модели и получаем блоковую структуру расчетной модели.

Генерация сетки элементов расчетной модели карьера выполняется в программе 3DEC. Для этого создается управляющий файл, в котором с использованием специальных команд ее интерфейса читается модель, сформированная в программе PGEN, задается блок подстилающей толщи пород (с использованием команды Poly Face), определяются размеры сетки элементов для каждого блока расчетной модели карьера.

Решение задачи. Для оценки поля напряжений в зоне влияния карьерной выемки создается второй управляющий файл, в котором с использованием специальных команд интерфейса программы 3DEC задаются:

- физико-механические свойства всех блоков расчетной модели (модуль упругости, коэффициент Пуассона, объемный вес, сцепление, угол внутреннего трения и др.);
- модель среды (упругая изотропная, упругая анизотропная, условие пластичности по Кулону – Мору и др.);
- граничные условия (наряжения, смещения и др.).

Следует отметить, что в программе 3DEC предусмотрен контроль за ходом решения задачи. С использованием специальных команд ее интерфейса можно, например, на экране монитора по шагам нагружения отобразить график сходимости (баланс сил). В программе 3DEC определено, что процесс итераций завершается после достижения невязки величиной 10^{-5} на соседних шагах нагружения.

После завершения расчета в программе на экране монитора можно отобразить: расчетную модель; оси координат; вертикальные

и горизонтальные сечения расчетной модели; компоненты, вектора и тензоры напряжений, смещений и скоростей смещений и т.д.

Оценка фактора безопасности. В программе 3DEC оценка фактора безопасности (Safety Factor) выполняется в соответствии с методом, предложенным Dawson [10]. Проведем расчет для карьера в однородной среде и сопоставим результат с известными решениями, выполненными разными авторами и по другим методикам. Расчетные параметры: высота карьера $H = 20$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}2$, объемный вес пород $\gamma = 25$ кН/м^3, модуль упругости пород $E = 10$ МПа, сцепление $c = 42$ кПа, угол внутреннего трения $\rho = 17°$ В табл.1 приведены расчетные значения фактора безопасности для разных углов наклона борта карьера.

Таблица 1

Сопоставление различных методов оценки фактора безопасности

Метод оценки фактора безопасности	Угол наклона борта карьера				
	30°	35°	40°	45°	50°
3DEC	1,63	1,47	1,47	1,36	1,36
ANSYS [23]	1,78	1,62	1,48	1,36	1,29
Coulomb – Mohr	1,47	1,34	1,22	1,12	1,06
Bishop [7]	1,39	1,26	1,15	1,06	0,99
Spenser [21]	1,46	1,32	1,21	1,12	1,04

Видно, что рассчитанные по 3DEC значения фактора безопасности, наиболее близки к данным, полученным с использованием программы ANSIS, отличие составляет 9 %. С данными других авторов расчеты по программе 3DEC различаются больше: для углов 30° и 35° – не превосходит 17 %, а для углов, больших 40°, различие составляет 28 %.

Понятно, что некоторое различие в результатах расчетов возникает из-за использования разных методик оценки фактора безопасности и размерности задачи. В 3DEC решается объемная задача, а другими методами решается плоская задача.

Выполним оценку фактора безопасности для различных углов наклона борта карьера глубиной 450 м в однородной среде. Расчетные параметры: высота карьера $H = 450$ м, объемный вес пород $\gamma = 2220$ кг/м^3, сцепление $c = 0{,}122$ МПа, угол внутреннего трения $\rho = 34°$, $K = 4{,}8$ ГПа, $G = 2{,}5$ ГПа; в программе 3DEC вместо модуля упругости пород и коэффициента Пуассона задаются модули

$$K = \frac{E}{3(1-\nu)} \text{ и } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

В табл.2 приведены рассчитанные по программе 3DEC значения фактора безопасности для четырех углов наклона борта карьера.

Таблица 2

Величина фактора безопасности для различных углов наклона борта карьера

Метод оценки фактора безопасности	Угол наклона борта карьера			
	35°	40°	45°	50°
3DEC	1,50	1,42	1,34	1,15
GALENA	1,56			

Видно, что рассчитанные по 3DEC значения фактора безопасности близки к данным, полученным с использованием программы GALENA.

Построение поверхности предельного равновесия. Построение поверхности предельного равновесия проведем с использованием трех критериев.

Первый критерий – Кулона – Мора:

$$fs = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1+\sin\rho}{1-\cos\rho} + 2c\sqrt{\frac{1+\sin\rho}{1-\cos\rho}}, \quad (1)$$

где σ_1 – максимальное главное напряжение; c – сцепление; σ_3 – минимальное главное напряжение; ρ – угол внутреннего трения.

Второй – метод построения границы зоны предельного состояния предложен в [24]:

$$SMF = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{c \cdot \cos\rho + 0{,}5(\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin\rho}. \quad (2)$$

Третий – метод построения границы зоны предельного состояния предложен в [16]:

$$F = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}\sin\rho - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c \cdot \cos\rho. \quad (3)$$

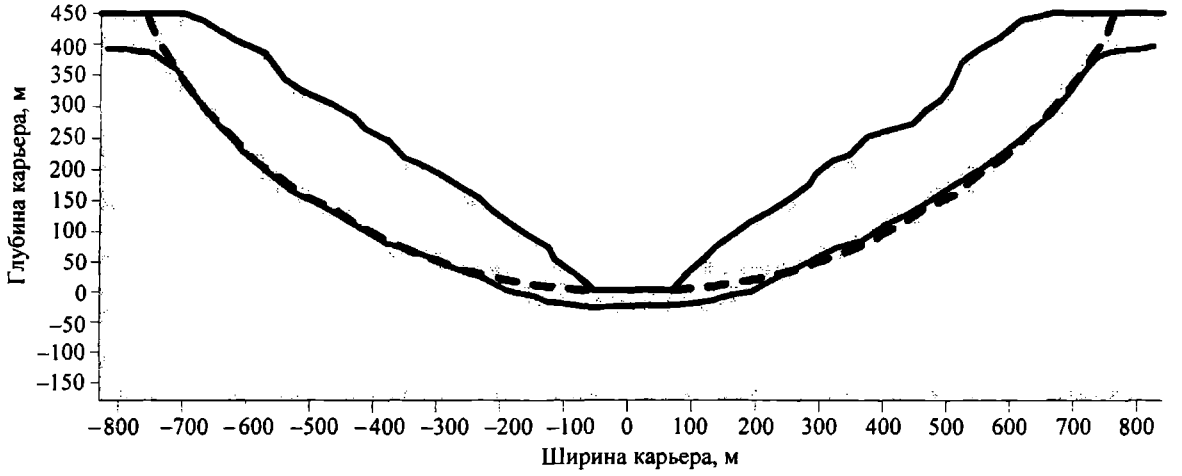


Рис.1. Граница зоны предельного состояния при наклоне борта карьера 35° сплошная кривая – критерий (1); пунктирная кривая – методика [2]

Результаты расчетов показали, что для карьера месторождения алмазов «Гриб» границы зон предельного состояния, построенные по критериям (1), (2) и (3), практически совпадают. На рис.1 приведены границы зоны предельного состояния, построенные по критерию (1) и по методике из работы [2] в центральном сечении карьера месторождения алмазов. Видно, что рассчитанная по 3DEC граница зоны предельного состояния согласуется с результатами, полученными по методике из работы [2].

Влияние природных факторов на значение фактора безопасности. Рассмотрим, как изменится значение фактора безопасности для карьера глубиной 20 м с углом наклона борта 30°, 35°, 40°, 45° и 50° Для исключения влияния других факторов примем, что прибортовой массив и подстилающая толща имеют одинаковые физико-механические свойства: коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}2$, объемный вес пород $\gamma = 25$ кН/м^3, модуль упругости пород $E = 10$ МПа, сцепление $c = 42$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 17°$. Для определенности примем, что $\lambda_x = \lambda_z = \lambda$. В табл.3 приведены расчетные значения фактора безопасности для разных углов наклона борта карьера.

Из табл.3 видно, что рассчитанные по 3DEC значения фактора безопасности хорошо согласуются с данными, полученными с использованием программы ANSIS при $\lambda = 0{,}8$. Максимальное различие составляет 8,2 %. Но в [23] решалась плоская задача. Следует отметить, что расчет фактора безопасности для карьера высотой 50 м по программе UDEC показал, что для условий плоской задачи его величина на 8,3 % больше, чем по программе 3DEC [17]. Принимая во внимание это обстоятельство, получаем, что для углов 30° и 35° наши результаты практически совпадают с расчетами по программе ANSYS.

Таблица 3

Влияние естественного поля напряжений на величину фактора безопасности

Метод оценки фактора безопасности	Угол наклона борта карьера				
	30°	35°	40°	45°	50°
ANSYS [4]	1,78	1,62	1,48	1,36	1,29
3DEC, $\lambda = 0{,}8$	1,63	1,47	1,47	1,36	1,36
3DEC, $\lambda = 1{,}0$	1,21	1,16	1,16	1,11	1,19
3DEC, $\lambda = 1{,}2$	1,06	1,03	1,03	1,00	1,02

Рассмотрим, как изменится значение фактора безопасности для карьера глубиной 450 м с углом наклона борта 35°, 40°, 45° и 50°. Для исключения влияния других факторов примем, что прибортовой массив и подстилающая толща имеют одинаковые физико-механические свойства: модуль упругости пород $E = 11{,}5$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}2$, объемный вес пород $\gamma = 2220$ кг/м^3, сцепление $c = 0{,}122$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 34°$ Как и ранее, примем, что

$\lambda_x = \lambda_z = \lambda$. В табл.4 приведены рассчитанные по программе 3DEC значения фактора безопасности для четырех углов наклона борта карьера и трех значений коэффициента бокового отпора.

Таблица 4

Влияние коэффициента бокового отпора на величину фактора безопасности

Коэффициент бокового отпора	Угол наклона борта карьера			
	35°	40°	45°	50°
$\lambda = 0,8$	1,50	1,44	1,34	1,15
$\lambda = 1,0$	1,45	1,46	1,37	1,20
$\lambda = 1,2$	1,42	1,35	1,37	1,24

Из табл.4 видно, что с увеличением угла наклона борта карьера его значение уменьшается независимо от уровня горизонтальных напряжений. Следовательно, снижается устойчивость бортов карьера при прочих равных условиях. Этого и следовало ожидать.

Рассмотрим расчет фактора безопасности при разном соотношении величин горизонтальных и вертикального напряжений в окружающем массиве. Для угла наклона бортов карьера 35° наблюдается уменьшение его величины с увеличением бокового отпора, а для угла 50° с увеличением бокового отпора увеличивается значение фактора безопасности. Для углов наклона бортов карьера 40° и 45° однозначного ответа нет.

В табл.5 приведены рассчитанные по программе 3DEC значения фактора безопасности для трех значений коэффициента бокового отпора и двух значений угла внутреннего трения и сцепления.

Из полученных расчетов, представленных в табл.5, следует: с уменьшением угла внутреннего трения φ в два раза значение фактора безопасности уменьшается на 28,7 % при $\lambda = 0,8$ и на 3,6 % при $\lambda = 1,2$ при фиксированном сцеплении $c = 0,122$ МПа и, соответственно, на 38,9 % при $\lambda = 0,8$ и на 26,4 % при $\lambda = 1,2$ при $c = 0,06$ МПа; с уменьшением сцепления в два раза и фиксированном угле внутреннего трения $\varphi = 34°$ величина фактора безопасности увеличивается на 3,0 % при $\lambda = 0,8$ и на 10,4 % при $\lambda = 1,2$; при $\varphi = 17°$ величина фактора безопасности в зависимости от коэффициента бокового отпора λ меняется слабо.

Проведенные численные эксперименты показали, что на величину фактора безопасности наибольшее влияние оказывает значение угла внутреннего трения, а не сцепление. Понятно, что при включении в расчетную схему других факторов, влияющих на устойчивость бортов карьера, получим новые значения фактора безопасности. Анализ интернет-ресурсов по проблеме устойчивости бортов карьеров показал, что значение фактора безопасности, соответствующее безопасным условиям отработки, лежит в интервале 1,25-1,5. Следовательно, при определении физико-механических свойств породного массива необходимо уделять особое внимание экспериментам по определению угла внутреннего трения.

Рассмотрим, как изменится значение фактора безопасности для карьера глубиной 450 м в зависимости от некоторых свойств породного массива. Расчет максимальных параметров устойчивых бортов карьера выполнен в работе [2] методом векторного сложения сил (метод многоугольника сил для условий квазиизотропного массива). Результаты расчета соответствуют условиям предварительно сдренированных прибортовых массивов с полным снятием природных напоров подземных вод. Таким образом,

Таблица 5

Влияние коэффициента бокового отпора, сцепления и угла внутреннего трения на величину фактора безопасности

λ	φ, град	c, МПа	FS	φ, град	c, МПа	FS	φ, град	c, МПа	FS	φ, град	c, МПа	FS
0,8			1,57			1,12			1,62			0,99
1,0	34	0,122	1,25	17	0,122	1,11	34	0,060	1,32	17	0,060	0,95
1,2			1,12			1,08			1,25			0,92

имеем следующую конфигурацию бортов карьера:

– приповерхностный слой высотой 70 м с углом наклона 33°;

– слой высотой 80 м с углом наклона 29°;

– слой высотой 90 м с углом наклона 39°;

– последний слой высотой 210 м с углом наклона 43°

В табл.6 для рассматриваемой схемы приведены средние значения физико-механических свойств* четырех породных пачек прибортового массива и кимберлита (плотность ρ, коэффициент Пуассона ν, модуль упругости E, предел прочности при сжатии σ_c, предел прочности при растяжении σ_p, сцепление c, угол внутреннего трения φ). Систему координат расположим в центре карьера так, что нулевая отметка находится на дне карьера.

Таблица 6

Физико-механические свойства пород прибортового массива и кимберлита

H	ρ, кг/м³	ν	E, ГПа	σ_c, МПа	σ_p, МПа	c, МПа	φ, град
	Прибортовой массив						
380-450	2208	0,25	0,810	3,33	0,198	0,57	28,8
300-380	2178	0,28	0,348	3,28	0,219	1,65	36,0
210-300	2214	0,23	0,694	4,46	0,264	1,90	37,9
0-210	2236	0,24	0,464	3,95	0,212	1,97	38,0
–200-0	2283	0,22	0,483	5,04	0,639	1,55	36,6
	Кимберлит						
–200-0	2508	0,16	4,493	31,96	3,448	6,96	34,7

Таблица 7

Результаты расчетов фактора безопасности

λ	FS, без кимберлита	FS	FS, ρ = 20	FS, α – 5	FS	FS, α + 5	FS, E·10
0,8	1,65	1,88	1,28	2,18	1,80	1,72	1,85
1,0	1,58	1,86	1,38	1,74	1,79	1,68	1,84
1,2	1,55	1,83	1,82	1,50	1,63	1,68	1,78

Результаты оценки фактора безопасности FS (табл.7) по программе 3DEC для такого карьера и трех значений бокового отпора λ показали:

• при изменении бокового отпора от значение фактора безопасности уменьшается от FS = 1,88 при λ = 0,8, FS = 1,86 при λ = 1,0 до FS = 1,83 при λ = 1,2, т.е. на 2,7 %;

• если в подстилающей толще не учитывать наличие кимберлита, то величина фактора безопасности уменьшается до FS = 1,65 при λ = 0,8 (12,2 %), FS = 1,58 при λ = 1,0 (15,0 %) и FS = 1,55 при λ = 1,2 (15,3 %);

• уменьшение угла внутреннего трения до 20° в ближней зоне прибортового массива приводит к снижению значения фактора безопасности до FS = 1,28 при λ = 0,8 (31,9 %), FS = 1,38 при λ = 1,0 (25,8 %) и FS = 1,82 при λ = 1,2 (0,5 %);

• сгущение сетки конечных элементов в прибортовом массиве в два раза привело к снижению значения фактора безопасности до FS = 1,80 при λ = 0,8 (4,2 %), FS = 1,79 при λ = 1,0 (3,8 %) и FS = 1,63 при λ = 1,2 (10,9 %);

• увеличение угла наклона борта карьера на 5° во всех породных слоях привело к снижению значения фактора безопасности до FS = 1,72 при λ = 0,8 (4,4 %), FS = 1,68 при λ = 1,0 (6,1 %) и увеличеню до FS = 1,68 при λ = 1,2 (3,1 %);

• увеличение модуля упругости в десять раз во всех породных слоях привело к увеличеню значения фактора безопасности до FS = 1,85 при λ = 0,8 (2,8 %), FS = 1,84 при λ = 1,0 (2,8 %) и FS = 1,78 при λ = 1,2 (9,2 %).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что хотя упругие характеристики породного массива играют существенную роль при оценке напряженно-деформированного состояния, они оказывают небольшое влияние на расчет фактора безопасности при анализе устойчивости бортов карьеров.

Для анализа состояния прибортового массива можно использовать результаты расчетов напряжения, смещения, деформации и другие характеристики. Например, на рис.2 представлена прогнозная оценка смещений прибортового массива проектного варианта карьера месторождения алмазов им. В.Гриба (Архангельск) при глубине отработки 450 м.

* Испытания физико-механических свойств породного массива выполнены под руководством М.Д.Ильинова в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства СПГГИ.

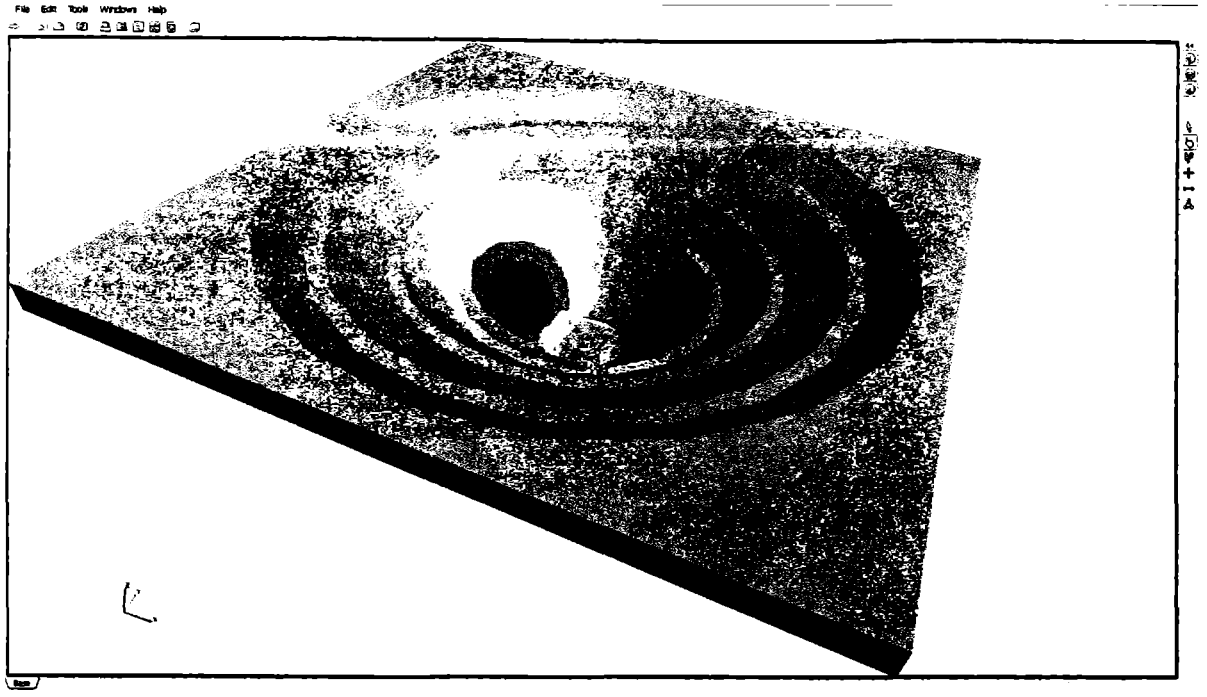


Рис.2. Смещения прибортового массива

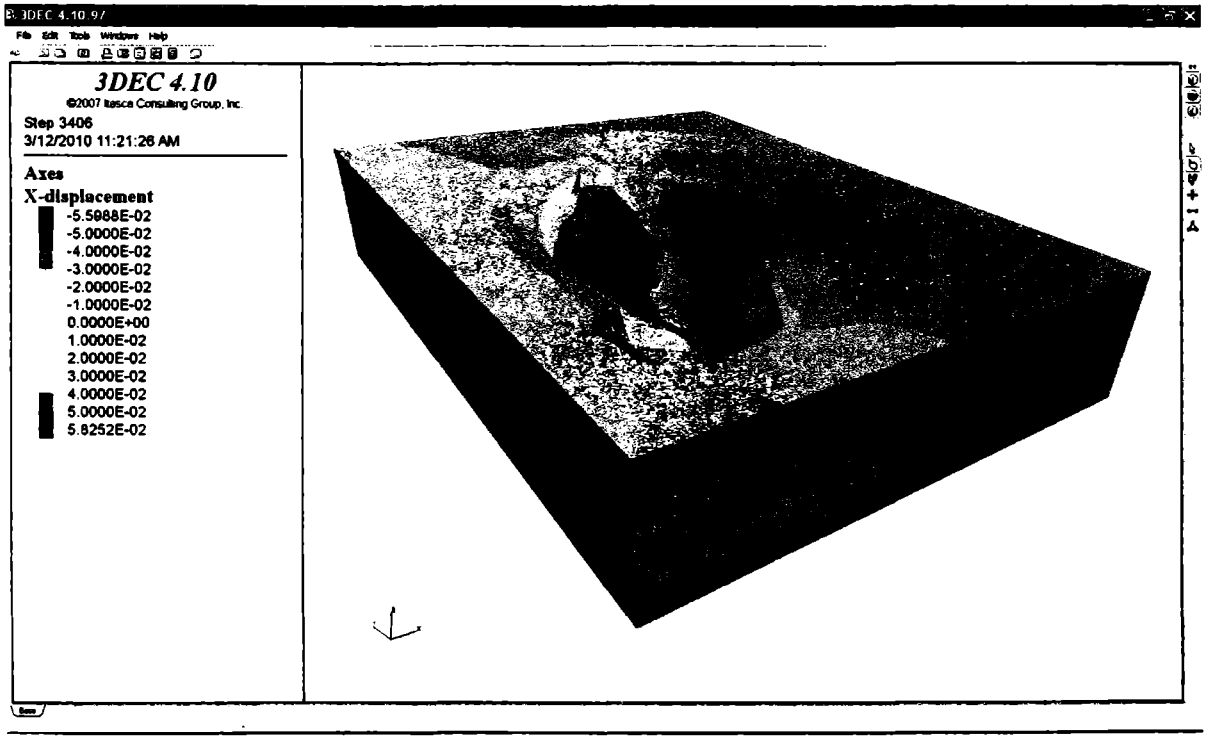


Рис.3. Горизонтальные смещения прибортового массива

На рис.3 представлена прогнозная оценка горизонтальных смещений прибортового массива проектного варианта Коашвинского карьера месторождения апатитов при глубине отработки 450 м.

Выводы

Проведенные численные эксперименты показали, что с использованием программы 3DEC можно проводить прогнозную оценку напряженного состояния прибортового массива и фактора безопасности возможных вариантов отработки карьера.

Расчет фактора безопасности для карьера глубиной 20 м показал хорошее согласие с данными, полученными другими методами.

Установлено, что упругие характеристики породного массива оказывают небольшое влияние на расчет фактора безопасности при анализе устойчивости бортов карьеров.

Показано, что построение зоны предельного состоя в прибортовом массиве достаточно проводить только по критерию Кулона – Мора.

Следует отметить, что представленные результаты это одно из возможных направлений использования программы 3DEC.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галустьян Э.Л.* Геомеханика открытых горных работ. М.: Недра, 1992. 272 с.

2. *Мочалов А.М.* Расчет устойчивости откосов плоского профиля в однородной среде / ВНИМИ. Сб.100. Л., 1976. С.116-128.

3. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960.

4. *Федоров И.В.* Методы расчета устойчивости склонов и откосов. М.: Госстройиздат, 1962.

5. *Фисенко Г.Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965, 387 с.

6. *Фисенко Г.Л.* Устойчивость бортов угольных карьеров. М.: Углетехиздат, 1956.

7. *Bishop A.W.* The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes // Geotechnique. Vol.5. N 1. 1955. P.7-17.

8. *Cundall P.A., Hart R.D.* Development of Generalized 2-D and 3-D Distinct Element Programs for Modeling Jointed Rock. Itasca Consulting Group; Misc. Paper SL-85-1. U.S. Army Corps of Engineers, 1985.

9. *Cundall P.A.* A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France, 1971). 1971.Vol.1.

10. *Dawson E.M., Roth W.H., Drescher A.* Slope Stability Analysis by Strength Reduction // Geotechnique. Vol.49. N 6. 1999. P.835-840.

11. *Griffiths D.V., Jane P.A.* Slope stability analysis by finite elements // Geotechnique. 1999. 49(3). P.387-403.

12. *Giam S.K., Donald I.B.* Determination of Critical Slip Surfaces for Slopes via Stress-Strain Calculations. Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Sydney, Australia, 1988. P.461-464.

13. *Hart R., Cundall P., Lemos J.* Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part II: Mechanical Calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25. 1988. P.117-126.

14. *Huang S.L., Yamasaki K.* Slope Failure Analysis Using Local Minimum Factor-of-Safety Approach // Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol.119. N 12. 1993. P.1974-1987.

15. Itasca Software Products FLAC, FLAC3D, UDEC, 3DEC, PFC2D/3D. Itasca Consulting Group Inc.: Minneapolis. Itasca, 2001.

16. LV Peng, YANG Guangqing, PANG Wei, ZHANG Baojian & WANG Xingzhen «Safety Analysis of Half-filling & Half-digging Subgrade Slope». 2004. P.2165-2168.

17. *Massoud Palassi, Mehdi Ashtiani.* Comparison of 2D and 3D distinct element analyses in stability of convex jointed rock slopes // GeoEdmonton'08. 2008.

18. *Matsui T, San K.C.* Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soils Found. 1992. 32(1). P.59-70.

19. *Morgenstern N.R., Price V.E.* The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces // Geotechnique. Vol.15. N 1. 1965. P.79-93.

20. *Spencer E.A.* Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces // Geotechnique. Vol.17. N 1. 1967. P.11-26.

21. *Spencer E.* A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // Geotechnique. Vol.17. 1969. P.11-26.

22. *Ugai K.A.* Method of calculation of total factor of safety of slopes by elastic-plastic FEM // Soils and Foundations. 1989. 29(2). P.190-195.

23. *Zhao Shangyi Zheng Yingren.* Slope Safety Factor Analysis Using ANSYS. Logistical Engineering University. Chong Qing, China, 1999.

24. *Yuan-Liang Chang, Tien-Kuen Huang.* Slope stability analysis using strength reduction technique // Journal of the Chinese Institute of Engineers. Vol.28. N 2. 2005. P.231-240.

REFERENCES

1. *Galustian E.L.* Geomechanics opencast mining. Moscow, Nedra, 1992. 272 p.

2. *Mochalov A.M.* Calculation of plane stability slope in homogeneous medium / VNIMI. Vol.100, Leningrad, 1976. P.116-128.

3. *Sokolovsky V.V.* Statics of granular material. Moscow: Physmatgiz, 1960.

4. *Fedorov I.V.* Methods of calculating stability of slopes and embankments. M.: Gosstroyizdat, 1962.

5. *Fisenko G.L.* Stability of the pit and dumps. Moscow: Nedra, 1965. 387 p.

6. *Fisenko G.L.* Stability sides open pit coal mines. M.: Ugletehizdat, 1956.

7. *Bishop A.W.* The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes // Geotechnique. Vol.5. N 1. 1955. P.7-17.

8. *Cundall P.A., Hart R.D.* Development of Generalized 2-D and 3-D Distinct Element Programs for Modeling Jointed Rock. Itasca Consulting Group; Misc. Paper SL-85-1. U.S. Army Corps of Engineers, 1985.

9. *Cundall P.A.* A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. Symposium of the International Society of Rock Mechanics (Nancy, France, 1971). 1971.Vol.1.

10. *Dawson E.M., Roth W.H., Drescher A.* Slope Stability Analysis by Strength Reduction // Geotechnique. Vol.49. N 6. 1999. P.835-840.

11. *Griffiths D.V., Jane P.A.* Slope stability analysis by finite elements // Geotechnique. 1999. 49(3). P.387-403.

12. *Giam S.K., Donald I.B.* Determination of Critical Slip Surfaces for Slopes via Stress-Strain Calculations. Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Sydney, Australia, 1988. P.461-464.

13. *Hart R., Cundall P., Lemos J.* Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part II: Mechanical Calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25. 1988. P.117-126.

14. *Huang S.L., Yamasaki K.* Slope Failure Analysis Using Local Minimum Factor-of-Safety Approach // Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol.119. N 12. 1993. P.1974-1987.

15. Itasca Software Products FLAC, FLAC3D, UDEC, 3DEC, PFC2D/3D. Itasca Consulting Group Inc.: Minneapolis. Itasca, 2001.

16. LV Peng, YANG Guangqing, PANG Wei, ZHANG Baojian & WANG Xingzhen «Safety Analysis of Half-filling & Half-digging Subgrade Slope». 2004. P.2165-2168.

17. *Massoud Palassi, Mehdi Ashtiani.* Comparison of 2D and 3D distinct element analyses in stability of convex jointed rock slopes // GeoEdmonton'08. 2008.

18. *Matsui T, San K.C.* Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soils Found. 1992. 32(1). P.59-70.

19. *Morgenstern N.R., Price V.E.* The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces // Geotechnique. Vol.15. N 1. 1965. P.79-93.

20. *Spencer E.A.* Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces // Geotechnique. Vol.17. N 1. 1967. P.11-26.

21. *Spencer E.* A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // Geotechnique. Vol.17. 1969. P.11-26.

22. *Ugai K.A.* Method of calculation of total factor of safety of slopes by elastic-plastic FEM // Soils and Foundations. 1989. 29(2). P.190-195.

23. *Zhao Shangyi Zheng Yingren.* Slope Safety Factor Analysis Using ANSYS. Logistical Engineering University. Chong Qing, China, 1999.

24. *Yuan-Liang Chang, Tien-Kuen Huang.* Slope stability analysis using strength reduction technique // Journal of the Chinese Institute of Engineers. Vol.28. N 2. 2005. P.231-240.