УДК 622.284

А.М.МОЧАЛОВ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, a.m.mochalov@rambler.ru*
С.А.ИШУТИН, *старший научный сотрудник, s.ishutin@rambler.ru*
А.А.ПАВЛОВИЧ, *аспирант, dandy332@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
Р.Ю.САПАЧЁВ, *ведущий инженер-гидрогеолог, r_sapachev@mail.ru*
ЗАО «Полиметалл инжиниринг», Санкт-Петербург

A.M.MOCHALOV, *PhD in eng. sc., laboratory head, a.m.mochalov@rambler.ru*
S.A.ISHUTIN, *senior research assistant, s.ishutin@rambler.ru*
A.A.PAVLOVICH, *post-graduate student, dandy332@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
R.Y.SAPACHEV, *lead hydrogeological engineer, r_sapachev@mail.ru*
CJSC «Polymetal Engineering», Saint Petersburg

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

С постоянным увеличением глубины разработки месторождений открытым способом изменяется напряженно деформированное состояние прибортового массива, поэтому выбор необходимой, соответствующей реальности, геомеханической схемы является важным вопросом. В настоящее время создано большое количество программного обеспечения для оценки устойчивости бортов карьеров. В данной статье приводится сравнение различных программ, основанных на численном методе и методе предельного равновесия.

Ключевые слова: устойчивость бортов карьеров, коэффициент запаса, метод предельного равновесия, численный метод.

EVALUATION OF THE STABILITY OF SLOPES WITH USING NATIVE AND FOREIGN SOFTWARE

With permanent increasing of depth of open pit exploitation stress strain behavior of side array changes, so the choice of the necessary and corresponding to reality geomechanical scheme is an important issue. Currently,there is large number of software to estimation the stability slopes. This article provides a comparison of different programs based on numerical method and the method of limiting equilibrium.

Key words: stability slopes in open pit mine, safety factor limit equilibrium method numerical method.

При оценке устойчивости бортов карьеров надежность метода расчета зависит, прежде всего, от соответствия принятой расчетной модели реальной схеме распределения напряжений в прибортовом массиве и схеме его разрушения.

В настоящее время методика оценки устойчивости бортов карьеров имеет два основных направления: развитие методов предельного равновесия; развитие численных методов.

Из инженерных методов расчета устойчивости откосов однородной среды, основанных на условии предельного равновесия, наиболее распространен метод расчета и сравнения внешних (сдвигающих) и внутренних (удерживающих) сил на круглоцилиндрической поверхности скольжения. Метод основан на предположении, что поверхность возможного скольжения (разрушения) является круглоцилиндрической, а ограниченная ею призма обрушения – монолитным «жестким» клином.

Развитие этого метода проходило в направлении совершенствования уравнения предельного равновесия призмы обрушения на поверхности скольжения, первоначально удовлетворяющего только одному условию статики – равенству нулю моментов (В.Феллениус [7], К.Терцаги [5]), а также отыскания уравнений предельного равновесия, удовлетворяющих всем трем условиям статики (Д.Тейлор [4], Р.Р.Чугаев [9], И.В.Федоров [6]).

Выводов о положении в прибортовом массиве наиболее напряженной поверхности большинство указанных расчетных методов не дают, а положение ее, как правило, устанавливается последовательным приближением при проведении многократных поверочных расчетов. Отдельные рекомендации по отысканию положения поверхности скольжения в однородном откосе (В.Феллениус, Р.Р.Чугаев) не имеют теоретического обоснования и не исключают многократных поверочных расчетов.

Впервые теоретически обоснованный метод построения наиболее напряженной поверхности в плоском откосе однородного массива, находящемся в предельном равновесии, предложен Г.Л.Фисенко [8]. Здесь построение наиболее напряженной поверхности основано на известных положениях теории сыпучей среды, заключающихся в следующем.

Минимальное значение наибольшего главного напряжения, необходимое для обеспечения условия предельного равновесия и возникновения элементарных площадок скольжения в однородном массиве горных пород, равно временному сопротивлению пород сжатию

$$\sigma_1 = 2c\,\mathrm{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (1)$$

где c – сцепление породы; φ – угол внутреннего трения.

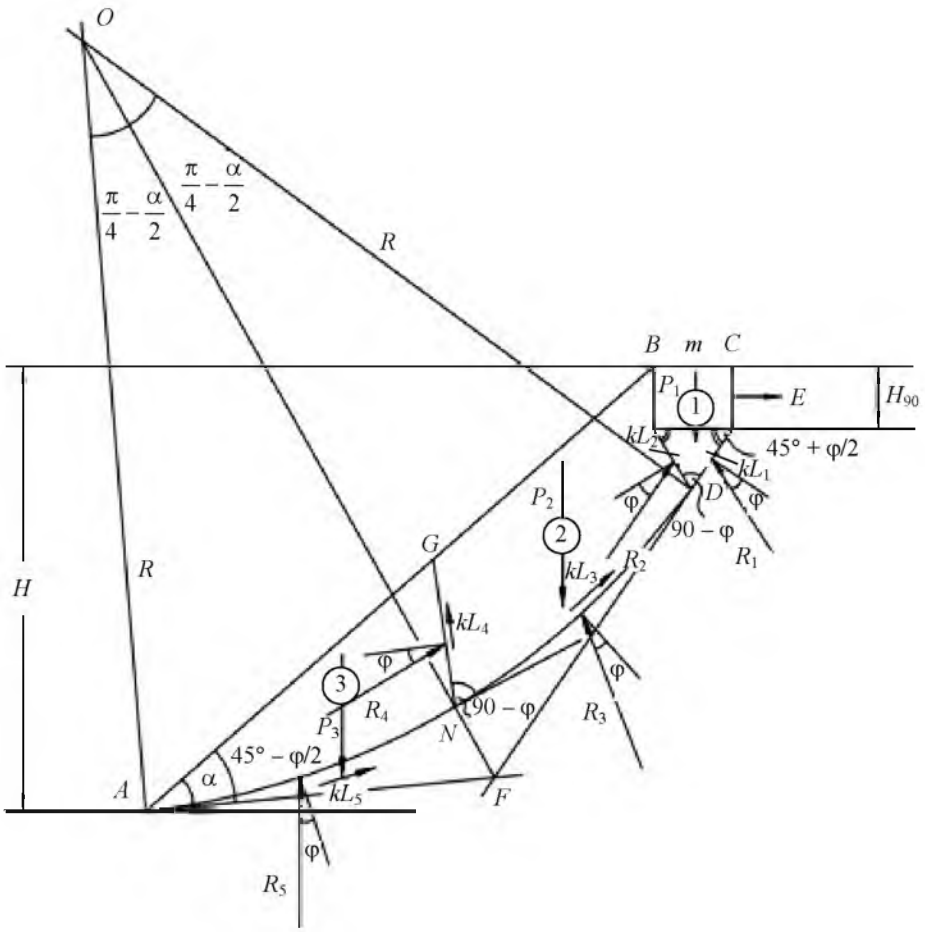
В верхней части откоса (по поверхности зоны оседания) максимальные главные напряжения создаются упругим слоем пород мощностью

$$H_{90} = \frac{2c}{\rho}\,\mathrm{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (2)$$

где ρ – плотность массива пород.

Максимальные главные напряжения в зоне оседания вертикальны; с глубиной при приближении к поверхности откоса направления наибольших главных напряжений выполаживаются в сторону откоса и на его поверхности совпадают с ней. Площадки скольжения, формирующие всю поверхность скольжения, располагаются под углом $45°-\varphi/2$ к направлению наибольшего главного напряжения.

По теории предельного напряженного состояния В.В.Соколовского [3] линии первого семейства поверхностей скольжения в откосе, находящемся в предельном напряженном состоянии, в плоской задаче имеют прямолинейные и криволинейные с различной кривизной участки: в зоне оседания площадки скольжения плоские и наклонены к вертикальной нагрузке под углом $45°-\varphi/2$; в зоне, где площадки скольжения второго семейства собираются в одной точке (точка Прандтля), площадки скольжения первого семейства имеют максимальную кривизну, вне этой зоны книзу кривизна площадок скольжения плавно убывает. Площадки скольжения первого семейства пересекают поверхность откоса под углом $45°-\varphi/2$.



Расчетная схема плоского откоса однородной среды

Применяемый в настоящее время в отечественной практике метод оценки устойчивости откосов бортов карьеров в однородном горном массиве разработан на основе способа многоугольника сил [2]. Основные положения этого метода заключаются в следующем:

– расчет выполняется по условию предельного равновесия;

– поверхность скольжения в прибортовом массиве предельного равновесия строится по методу Г.Л.Фисенко;

– призма обрушения, оконтуренная этой поверхностью, в предельном равновесии разбивается на блоки, границы между которыми располагаются по направлению второго семейства поверхностей скольжения (как в методе предельно напряженного состояния).

На расчетной схеме плоского откоса однородной среды (см. рисунок) предельное равновесие каждого отдельного блока оценивается с учетом следующих сил: P_i – вес блока; R_i – реакции от сил трения на поверхностях, ограничивающих блок (реакции составляют угол внутреннего трения с нормалями к этим поверхностям – одно из условий предельного равновесия); kL_i – силы сцепления, возникающие на поверхностях, ограничивающих блок, по направлению совпадающие с этими поверхностями; E – сила сопротивления отрыву по поверхности вертикальной трещины, равной H_{90}, направленная горизонтально.

Численные методы в основном представлены методом конечных элементов и конечных разностей. Эти методы используются для решения задач механики твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электромагнитных полей. Кроме того, необходимо отметить, что при решении задач устойчивости откосов бортов ни одна схема не учитывает деформационные характеристики массива, а численные методы позволяют

сделать это. С помощью численных методов возможно также решать объемные задачи. Однако данный подход предъявляет высокие требования к квалификации пользователя, большая трудоемкость не всегда является оправданной, что препятствует широкому применению их на практике.

В связи со сложностью алгоритмов вычисления и последующих поверочных расчетов, а также с интенсивным развитием вычислительной техники для оценки бортов карьеров разрабатывают специальное программное обеспечение, которое позволяет наиболее точно и быстро получить результат.

В Горном университете разработана программа MOFIS для оценки устойчивости бортов карьеров, позволяющая производить расчет в условиях однородной и квазиоднородной среды не только для дренированных, но и для обводненных прибортовых массивов. Учет влияния обводненности борта основывается на результатах геофильтрационного моделирования.

Программа MOFIS основана на подходе, который уже прошел многолетнюю апробацию, поэтому сравним результаты, полученные с помощью данной программы, с зарубежными. Для этого воспользуемся австралийской программой GALENA и двумя программами канадской компании «Rocscience Inc» – SLIDE и PHASA 2.

Программа GALENA решает задачи методом предельного равновесия в плоской постановке. Имеется возможность использовать следующие методы: Bishop, Spencer – Wright, Sarma. Реализованы несколько критериев разрушения, в частности наиболее распространенные: Кулона – Мора и Хоека – Брауна.

Кроме вычисления устойчивости существует возможность выполнить обратный расчет, а также вероятностный анализ. Предусмотрено использование как круглоцилиндрической, так и не круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Возможен учет подземных вод и любых дополнительных внешних нагрузок, а также учет сейсмического воздействия.

Программа также позволяет по параметру Rock Mass Rating (RMR) оценить физико-механические свойства скальных горных пород, такие как сцепление и угол внутреннего трения, по западным методикам (Bieniawski, Krauland, Bien./H-B Mean, Bien./Krau. Mean).

Программа SLIDE также решает задачи методом предельного равновесия в плоской постановке. При этом учет подземных вод может производиться на основе метода конечных элементов, результатами которого можно затем воспользоваться при расчете устойчивости откоса методом предельного равновесия.

В этой программе применяются следующие методы предельного равновесия: Ordinary/Fellenius, Bishop simplified, Corps of Engineers #1,2, GLE/Morgenstern-Price, Janbu simplified, Janbu corrected, Lowe-Karafiath, Spencer.

Реализовано большое количество критериев разрушения: Кулона – Мора, Хоека – Брауна, обобщенный критерий Хоека – Брауна и много других.

Критическая поверхность скольжения может представлять собой как круглоцилиндрическую, так и не круглоцилиндрическую поверхность. Имеется возможность построения поверхности скольжения вручную а также автоматически. Возможен учет любых дополнительных внешних нагрузок, сейсмического воздействия и расчет устойчивости с применением различных искусственных типов укреплений откосов.

Программа PHASA 2, предназначенная специально для решения задач геотехники, представляет собой двухмерный конечно-элементный анализ в упругой и упругопластической постановке с использованием метода снижения прочности. Метод снижения прочности характеризуется коэффициентом снижения прочности, который по своему смыслу эквивалентен коэффициенту запаса устойчивости откоса. Вычисление коэффициента снижения прочности основывается на многократном пересчете прочностных характеристик посредством поэтапного нагружения модели массива до предельного его состояния, т.е. когда напряжения, вызванные в откосе, достигнут предела прочности на сдвиг.

Таблица 1

Сравнение различных методов оценки устойчивости бортов карьеров

Метод расчета	α = 35°		α = 30°		α = 28°	
	SLIDE	MOFIS	SLIDE	MOFIS	SLIDE	MOFIS
	H = 136,9 м		*H* = 291,1 м		*H* = 586,0 м	
Ordinary/fellenius	1,11 (18,2)		1,10 (21,4)		1,07 (29,0)	
Bishop simplified	1,17 (20,6)		1,14 (26,5)		1,10 (39,1)	
Janbu simplified	1,10 (16,9)		1,09 (21,3)		1,07 (28,9)	
Janbu corrected	1,17 (21,3)		1,14 (27,5)		1,11 (43,7)	
Spencer	1,17 (20.1)	1,2 (19,1)	1,14 (26,0)	1,2 (34,0)	1,10 (39,3)	1,20 (61,3)
Corp of eng#1	1,18 (20,6)		1,14 (26,9)		1,11 (40,8)	
Corp of eng#2	1,19 (27,5)		1,15 (26,0)		1,11 (37,4)	
Lowe-karafiath	1,18 (20,2)		1,14 (25,5)		1,10 (38,6)	
Gle/morgenstern-price	1,17 (20,3)		1,14 (26,0)		1,10 (39,5)	
	H = 104,8 м		*H* = 185,2 м		*H* = 281,3 м	
Ordinary/fellenius	1,21 (18,6)		1,19 (22,1)		1,18 (29,2)	
Bishop simplified	1,27 (19,9)		1,25 (27,0)		1,23 (23,8)	
Janbu simplified	1,19 (17,4)		1,18 (22,1)		1,17 (18,9)	
Janbu corrected	1,26 (17,5)		1,25 (19,5)		1,23 (26,0)	
Spencer	1,26 (19,6)	1,30 (16,2)	1,24 (24,4)	1,30 (24,7)	1,22 (23,2)	1,30 (34,3)
Corp of eng#1	1,28 (19,9)		1,25 (27,0)		1,23 (23,9)	
Corp of eng#2	1,29 (21,5)		1,26 (26,4)		1,23 (22,5)	
Lowe-karafiath	1,28 (19,6)		1,25 (26,5)		1,23 (23,8)	
Gle/morgenstern-price	1,26 (19,3)		1,25 (26,5)		1,22 (23,3)	

Примечание: в скобках указана расчетная ширина призм, оконтуренных наиболее напряженной поверхностью скольжения.

Возможно применение нескольких различных критериев разрушения.

Возможен также учет подземных вод и вероятностный анализ, расчет устойчивости с применением различных искусственных типов укреплений.

В зарубежных программах используется большое количество применяемых методов, поэтому на примере SLIDE (применяется наибольшее количество методов – 9) воспользуемся всеми возможными методами оценки бортов карьеров.

Рассмотрим следующую задачу. Условный квазиоднородный откос с различными высотами бортов и углов наклона, но с одинаковыми физико-механическими свойствами: плотность $\rho = 1800$ кг/м^3, сцепление $c = 80$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 26°$. Плоскость скольжения – круглоцилиндрическая.

Результаты представлены в табл.1.

Из табл.1 следует, что лишь два метода имеют между собой 100-процентную сходимость – это метод Spencer и GLE/Morgenstern-price. Поэтому при сравнении методов будем использовать метод Spencer и метод Bishop, так как именно они одновременно реализованы в SLIDE и GALENA. При этом метод Spencer удовлетворяет всем условиям равновесия [12], а, как отмечает Wright [10], коэффициент запаса, рассчитанный с помощью упрощенного метода Бишопа, хорошо согласуется (в пределах 5 %) с коэффициентом запаса, рассчитанным с использованием метода конечных элементов, хотя и не удовлетворяет полному статическому равновесию [11].

Сравним между собой результаты расчета по программам GALENA, SLIDE, MOFIS (табл.2). Как видно из таблицы, значения коэффициентов запаса от всех полученных в SLIDE методов имеют отклонение

Таблица 2

Результаты расчета устойчивости бортов карьеров по программам SLIDE, GALENA и MOFIS

Исходные характеристики сопротивляемости пород сдвигу, принятые к расчету	Параметры рассчитываемых бортов		Результаты расчета устойчивости по программам					
			SLIDE		Galena		MOFIS	
	H, м	α (…°)	n	m, м	n	m, м	n	m, м
Угол внутреннего трения φ = 36°; сцепление c = 0,57 МПа; плотность ρ = 2900 кг/м^3	372,0	50	1,23-1,31 1,28	60,8-77,6 66,1	Bishop – 1,29 Spencer – 1,28	67,0 67,0	1,30	49,2
	625,8	43	1,20-1,28 1,25	71,9-95,0 79,2	Bishop – 1,28 Spencer – 1,27	86,0 86,0	1,30	69,8
	897,5	40	1,20-1,27 1,25	27,1-32,0 30,1	Bishop – 1,27 Spencer – 1,26	84,0 84,0	1,30	90,3
Угол внутреннего трения φ = 30°; сцепление c = 0,15 МПа; плотность ρ = 2000 кг/м^3	170,5	40	1,21-1,30 1,27	27,1-32,0 30,1	Bishop – 1,28 Spencer – 1,28	33,5 33,5	1,30	24,1
	277,5	35	1,20-1,28 1,25	25,6-42,8 38,9	Bishop – 1,27 Spencer – 1,26	41,0 41,0	1,30	34,7
	468,2	32	1,18-1,25 1,23	30,7-42,3 37,8	Bishop – 1,24 Spencer – 1,24	51,0 51,0	1,30	51,2
Угол внутреннего трения φ = 26°; сцепление c = 0,08 МПа; плотность ρ = 1800 кг/м^3	104,8	35	1,19-1,29 1,26	17,4-21,5 19,3	Bishop – 1,27 Spencer – 1,27	22,0 22,0	1,30	16,2
	185,2	30	1,18-1,26 1,24	19,5-27,0 24,6	Bishop – 1,25 Spencer – 1,25	26,0 26,0	1,30	24,7
	281,3	28	1,17-1,23 1,22	18,9-29,2 23,8	Bishop – 1,23 Spencer – 1,22	33,0 33,0	1,30	34,3
Угол внутреннего трения φ = 26°; сцепление c = 0,08 МПа; плотность ρ = 1800 кг/м^3	136,9	35	1,10-1,19 1,16	16,9-27,5 20,6	Bishop – 1,17 Spencer – 1,17	22,0 22,0	1,20	19,1
	291,1	30	1,09-1,15 1,13	21,3-26,9 25,2	Bishop – 1,14 Spencer – 1,14	28,0 28,0	1,20	34,0
	586,0	28	1,07-1,11 1,09	28,9-43,7 37,7	Bishop – 1,11 Spencer – 1,11	21,0 21,0	1,20	61,3
Угол внутреннего трения φ = 22°; сцепление c = 0,05 МПа; плотность ρ = 1800 кг/м^3	57,1	35	1,11-1,20 1,16	12,1-15,0 13,6	Bishop – 1,17 Spencer – 1,17	13,5 13,5	1,20	9,9
	87,0	30	1,09-1,18 1,14	10,9-20,1 15,5	Bishop – 1,16 Spencer – 1,16	16,0 16,0	1,20	13,5
	225,9	25	1,07-1,12 1,1	17,4-29,4 23,4	Bishop – 1,12 Spencer – 1,12	16,3 16,3	1,20	28,6

Примечания: 1. n – рассчитанный коэффициент запаса устойчивости; m – ширина призмы по поверхности, ограниченной наиболее напряженной поверхностью в прибортовом массиве.

2. В числителе интервал, в знаменателе среднее значение.

от MOFIS не более 10,8 %, а отклонение GALENA от MOFIS составляет не более 7,5 %. Ширина призмы обрушения значительнее отличается для каждого случая.

В последнее время очень интенсивно развиваются численные методы, поэтому необходимо сравнить результаты оценки численного метода и метода предельного равновесия, реализованного с помощью программного обеспечения, описанного выше.

Для этого рассмотрим условный глубокий однородный 450-метровый откос с различными углами наклона бортов (табл.3). Исходные данные: высота карьера H = 450 м, коэффициент Пуассона ν = 0,48, плотность ρ = 2220 кг/м^3, модуль упругости

пород $E = 7{,}4$ ГПа, сцепление $c = 122$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 34°$.

Таблица 3

Сравнение различных методов оценки устойчивости бортов карьеров на примере глубокого карьера

Метод оценки коэффициента запаса		Угол наклона борта карьера			
		35°	40°	45°	50°
PHASA2		1,23	1,06	0,92	0,81
SLIDE,	Bishop	1,24	1,07	0,96	0,82
	Spenser	1,23	1,07	0,95	0,82
GALENA,	Bishop	1,26	1,08	0,96	0,85
	Spencer – Wright	1,26	1,08	0,96	0,84
MOFIS		1,3	1,11	0,96	0,84

Результаты, полученные в программах, основанных на численном методе и методе предельного равновесия, довольно близки и имеют отклонение чуть более 5 %. Анализ литературы показывает, что такая сходимость наблюдается не всегда [1].

Выводы

1. Программа MOFIS, основанная на отечественной методике, имеет большую апробацию и вследствие этого большую практическую ценность. При сравнении GALENA и SLIDE с MOFIS результаты расчетов коэффициента запаса устойчивости достаточно близки.

2. Кроме коэффициента запаса при оценке устойчивости бортов карьеров важной характеристикой является и ширина призмы возможного обрушения. Рассчитанная по программам GALENA и SLIDE ширина призмы обрушения значительно отличается от полученной в программе MOFIS.

3. Несмотря на развитие численных методов, методы, основанные на предельном равновесии, более широко применяются в отечественной практике оценки устойчивости бортов карьеров.

4. Метод конечных элементов является необходимым дополнением к обоснованию устойчивости бортов карьеров путем оценки напряжений и деформаций в массиве.

5. Несомненно перспективный метод численного моделирования для широкого практического применения оценки устойчивости бортов карьеров при проектировании нуждается в совершенствовании и дальнейшей разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубков В.В.* Оценка фактора безопасности для анализа устойчивости бортов карьеров / В.В.Зубков, И.А.Зубкова // Записки Горного института. 2011. Т.190. С.183-191.

2. *Мочалов А.М.* Расчет устойчивости откосов плоского профиля в однородной среде // Тр. ВНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела. 1976. Сб.100. С.116-128.

3. *Соколовский В.В.* Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 243 с.

4. *Тейлор Д.* Основы механики грунтов. М.: Стройиздат, 1960. 596 с.

5. *Терцаги К.* Инженерная геология. М.: ГОНТИ, 1939. 390 с.

6. *Федоров И.В.* Методы расчета устойчивости склонов и откосов. М.: Госстройиздат, 1962. 202 с.

7. *Феллениус В.* Статика грунтов. М.: Госстройиздат, 1933. 48 с.

8. *Фисенко Г.Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.

9. *Чугаев Р.Р.* Земляные гидротехнические сооружения. Л.: Энергия, 1967. 460 с.

10. *Albataineh N.* Slope stability analysis using 2d and 3d methods // The Graduate Faculty of The University of Akron. 2006. 143 p.

11. *Bishop A.* The use of slip circles in the stability analysis of earth slopes // Geotechnique. 1955. Vol.5. N.1. P.7-17.

12. *Spencer E.* A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // Geotechnique. 1967. Vol.17. N.1. P.11-26.

REFERENCES

1. *Zubkov V.V., Zubkova I.A.* Assessment of safety factor for analysis of stability of boards of open-cast mines // Proceedings of the Mining University. 2011. Vol.190. P.183-191.

2. *Mochalov A.M.* Calculation of slope stability of a planar profile in a homogeneous medium / VNIMI. 1976. Vol.100. P.116-128.

3. *Sokolovsky V.V.* Statics of granular material. Moscow: Physmatgis, 1960. 243 p.

4. *Taylor D.* Fundamentals of Soil Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1960. 596 p.

5. *Terzaghi K.* Engineering geology. Moscow: GONTI, 1939. 390 p.

6. *Fedorov I.V.* Methods of calculating stability of slopes and embankments. Moscow: Gosstroyizdat, 1962. 202 p.

7. *Fellenius V.* Statics of soil. Moscow: Gosstroyizdat, 1933. 48 p.

8. *Fisenko G.L.* Stability of slopes for open pit mining and spoil banks. Moscow: Nedra, 1965. 378 p.

9. *Chugaev R.R.* Earth waterworks. Leningrad: Energy, 1967. 460 p.

10. *Albataineh N.* Slope stability analysis using 2d and 3d methods // The Graduate Faculty of The University of Akron. 2006. 143 p.

11. *Bishop A.* The use of slip circles in the stability analysis of earth slopes // Geotechnique. 1955. Vol.5. N.1. P.7-17.

12. *Spencer E.* A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // Geotechnique. 1967. Vol.17. N.1. P.11-26.