

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ ДРУКЕРА-ПРАГЕРА

Выполнено моделирование устойчивости борта карьера с использованием критерия Друкера-Прагера. Определены зависимости коэффициента запаса устойчивости от геометрических характеристик откоса и физических свойств пород.

Виконано моделювання стійкості борту кар'єру з використанням критерію Друкера-Прагера. Визначено залежність коефіцієнту запаса стійкості від геометричних характеристик укосу та фізичних властивостей порід.

Modeling of the open-cast slope stability by Drucker-Prager failure criterion has been carried out. The dependencies of Safety Factor on geometrical characteristics and physical properties of rock mass have been defined.

Введение. При ведении открытых горных работ одной из основных является проблема оценки устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов. Она связана, с одной стороны, с обеспечением безопасности работающих, а с другой – с экономической эффективностью добычи полезного ископаемого. При увеличении крутизны откоса происходит рост тангенциальных (сдвигающих) напряжений и при достижении ими величин, превышающих предел сопротивления пород сдвигу, равновесие откоса теряется и происходит его деформирование (оползание) по некоторой поверхности сдвижения.

Для сохранения устойчивости уступа при увеличении его высоты уменьшают угол наклона откоса. Кроме геометрических параметров на устойчивость уступов влияют прочность пород, их трещиноватость и слоистость, режим грунтовых вод и технологические факторы [1].

Поэтому, для оценки устойчивости техногенных откосов необходимо выполнить определенный объем инженерно-геологических изысканий с использованием численных методов моделирования.

Постановка задачи. Вольногорский горнометаллургический комбинат (ВГМК) разрабатывает Малышевское циркон-рутил-ильменитовое месторождение. Технологической особенностью данного месторождения является сложный и изменчивый характер горно-геологических условий разработки, а с учетом гидрогеологических условий возникает повышенная опасность образования сдвигов пород вскрыши. Так, в карьере №7 ВГМК в период 1993-2000 годов имели место 10 оползней (сдвигов) пород вскрыши, общим объемом больше 500 тыс. м³.

Вскрышные породы месторождения представлены пестрыми сарматскими зеленовато-серыми глинами и четвертичными красно-бурыми глинами, красно-бурыми и лессовидными суглинками. Общая мощность этих пород составляет: в балках 2-10 м, 60-65 м на водоразделах [2].

Согласно исследованиям, представленным в работе [3] рекомендуемые углы устойчивых и необводненных откосов для Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения не должны превышать 37°, а результаты

физического моделирования на эквивалентных материалах доказывают, что процессы дестабилизации откосов и инициация сдвига начинается при угле откоса 55° [4].

Учитывая противоречивость полученных результатов, оценка устойчивости откосов с использованием методов численного моделирования представляет практический интерес для оптимизации технологии разработки месторождения.

Цель работы – определение коэффициента запаса устойчивости при различных геометрических параметрах откоса и вариации физико-механических характеристик породного массива для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения методом конечных элементов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Определить целесообразные геометрические параметры устойчивого откоса методом конечных элементов с использованием критерия Друкера-Прагера в программе Phase2;

2. Определить зависимость коэффициента запаса устойчивости откоса от физико-механических характеристик породного массива.

Для оценки устойчивости массива горных пород и описания их поведения при статических и динамических внешних нагрузках применяют различные методические подходы, одним из которых является критерий Друкера-Прагера.

Для вычисления прочностных параметров по этому критерию пользуются следующими формулами:

- для ассоциированного потока

$$q = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}} ; \quad (1)$$

$$k = \frac{c \cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}} ; \quad (2)$$

- для неассоциированного потока

$$q = \sin \varphi ; \quad (3)$$

$$k = c \cos \varphi , \quad (4)$$

где φ – угол внутреннего трения, градус; c – сцепление, МПа.

В качестве инструмента моделирования устойчивости откосов и бортов карьеров использована специализированная программа конечно-элементного анализа Phase2 версии 7.0. Программа позволяет выполнять анализ устойчивости откосов методом конечных элементов, анализируя процесс снижения предела прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction Method) в породном массиве. Функция снижения прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction) в Phase2 позволяет автоматически выполнять конечно-элементный анализ и вычислять критический коэффициент снижения прочности КСП (SRF, Strength Reduction Factor) для выбранной модели, который по своему смыслу является эквивалентным коэффициенту запаса устойчивости откоса [5]. Алгоритм расчета ко-

эffициента устойчивости массива включает итерационное вычисление прочностных характеристик во всех элементах массива посредством поэтапной нагрузки модели, в результате чего напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвигение пород (оползень). Процесс вычислений КСП повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния и графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвигение массива. Если $KСП > 1$, то откос находится в устойчивом состоянии, а при $KСП < 1$ возникает сдвигение пород откоса.

В рамках данной работы представляет интерес оценить устойчивость откосов для Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения посредством численного моделирования в Phase2 с использованием критерия Друкера-Прагера.

Результаты работы.

Рассмотрим однородный откос, сложенный суглинком. Задаем граничные условия модели: 60м от нижней бровки и 60 м от верхней бровки до горизонтальных границ модели; расстояние от верхней бровки до нижней границы – 90м (рис. 1).

В ходе моделирования переменными геометрическими параметрами являются высота уступа (от 15 до 40м) и угол откоса (от 30 до 70°).

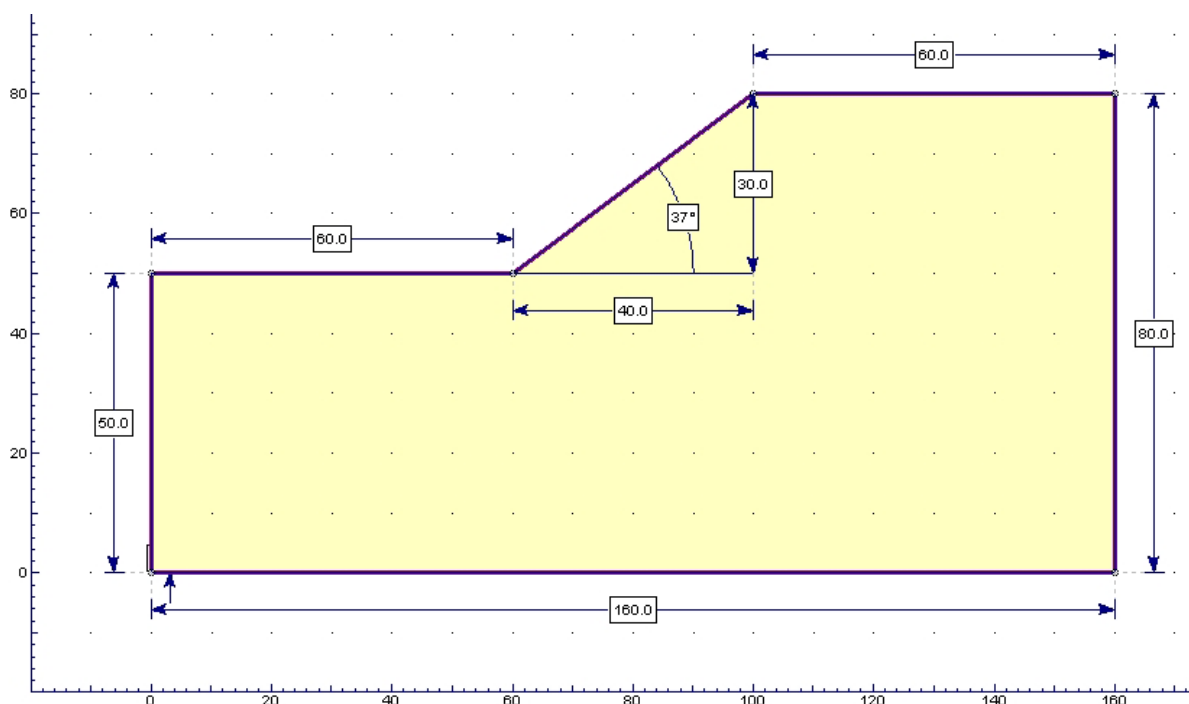


Рис. 1. Геометрические параметры откоса

Разбиваем область геометрической модели откоса на конечные элементы и задаем следующие физико-механические характеристики вскрышных пород: коэффициент Пуассона - 0,35; модуль Юнга - 20 МПа; предел прочности на одноосное растяжение - 0,04 МПа; плотность пород - 0,01764 МН/м³. Для рассматриваемого участка месторождения сцепление пород варьирует в диапазоне от 0,01 до 0,11 МПа, а угол внутреннего трения колеблется от 19° до 28°.

Поскольку при обосновании технологии открытой разработки месторождений с мягкими вскрышными породами геометрические параметры откосов имеют первостепенное значение, была выполнена оценка устойчивости откоса при вариациях высоты уступа и угла откоса. В табл. 1 сведены результаты расчетов КСП откоса при различных геометрических параметрах с использованием различных критериев. При заданных физико-механических характеристиках породного массива можно определить наиболее целесообразные геометрические параметры откоса, варьируя значениями высоты откоса и угла наклона для обеспечения безопасности технологии открытых горных работ. На рис. 2 показано, что при высоте уступа до 20м в широком диапазоне углов обеспечивается достаточная устойчивость откоса.

Таблица 1

Зависимость КСП от геометрических параметров

Высота уступа (Н, м)	Зависимость КСП от угла откоса, градусы								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
15	¹ 2,18	2,02	1,87	1,78	1,66	1,59	1,52	1,47	1,37
	² 2,09	1,81	1,59	1,52	1,31	1,23	1,17	1,01	0,90
	³ 1,96	1,82	1,67	1,61	1,52	1,44	1,37	1,33	1,23
20	1,86	1,71	1,59	1,45	1,42	1,32	1,22	1,13	1,05
	1,86	1,66	1,48	1,34	1,19	1,08	0,96	0,90	0,83
	1,66	1,54	1,44	1,33	1,25	1,19	1,13	1,06	1,00
25	1,67	1,52	1,41	1,30	1,20	1,13	1,05	0,99	0,96
	1,69	1,53	1,39	1,19	1,08	0,96	0,90	0,84	0,71
	1,47	1,39	1,27	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,88
30	1,55	1,40	1,28	1,19	1,07	1,00	0,95	0,87	0,82
	1,51	1,42	1,25	1,12	1,01	0,93	0,88	0,81	0,67
	1,42	1,28	1,17	1,08	1,00	0,94	0,88	0,82	0,79
35	1,43	1,29	1,17	1,07	0,98	0,91	0,85	0,78	0,72
	1,46	1,35	1,21	1,08	0,97	0,88	0,78	0,72	0,62
	1,31	1,20	1,07	1,00	0,94	0,87	0,82	0,76	0,74
40	1,34	1,20	1,09	1,00	0,93	0,84	0,78	0,72	0,67
	1,45	1,28	1,14	1,01	0,90	0,81	0,73	0,66	0,58
	1,23	1,13	1,04	0,94	0,88	0,82	0,77	0,74	0,67

Критерии прочности: ¹Мора-Кулона, ²Хоека-Брауна, ³Друкера-Прагера

В критерии Друкера-Прагера угол внутреннего трения и сцепление являются основными параметрами, которые учитываются для оценки устойчивости откосов и выражаются в виде параметров φ и k . Угол внутреннего трения для горных пород представляет собой сложную и во многом противоречивую характеристику. Неоднозначность толкования физической природы этой величины и несовершенство методики испытаний приводят к тому, что эта величина очень нестабильна даже для одной литологической разности. Для оценки влияния угла внутреннего трения на устойчивость откоса принимаем обоснованную ранее высоту $H=20$ м, угол откоса $\alpha=30...70^\circ$ и среднее значение сцепления пород $c=0,04$ МПа. Для мягких пород предел прочности на одноосное растяжение принимается равным сцеплению.

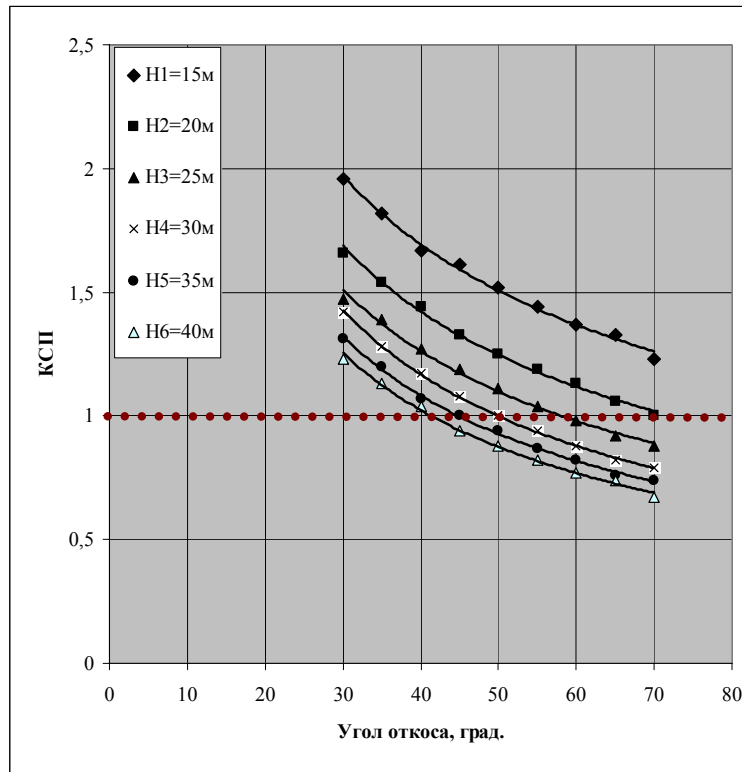


Рис. 2. Зависимость устойчивости откоса от геометрических параметров

Результаты расчетов коэффициента снижения прочности откоса высотой 20м при различных значениях угла внутреннего трения представлены на рис. 3.

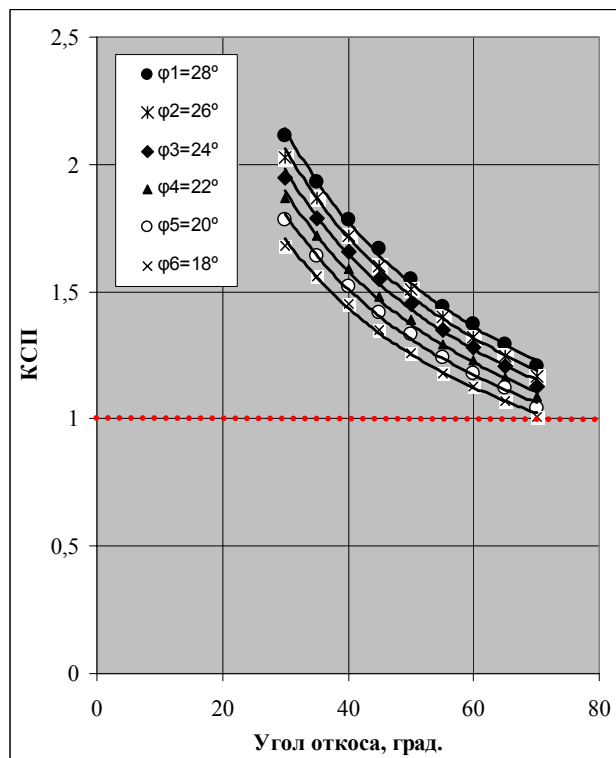


Рис. 3. Зависимость устойчивости откоса от угла внутреннего трения ϕ

Результаты данного этапа моделирования дают основание утверждать, что величина угла внутреннего трения ϕ при целесообразных геометрических параметрах откоса практически не влияет на его устойчивость.

Поскольку высота уступа до 20м в широком диапазоне углов от 30° до 70° обеспечивает достаточную устойчивость откоса, принимаем это значение для дальнейших расчетов зависимости КСП от предела прочности на одноосное сжатие. Этот фактор можно рассматривать равным сцеплению пород в массиве, которое варьирует в диапазоне от 0,01 до 0,11 МПа (рис. 4).

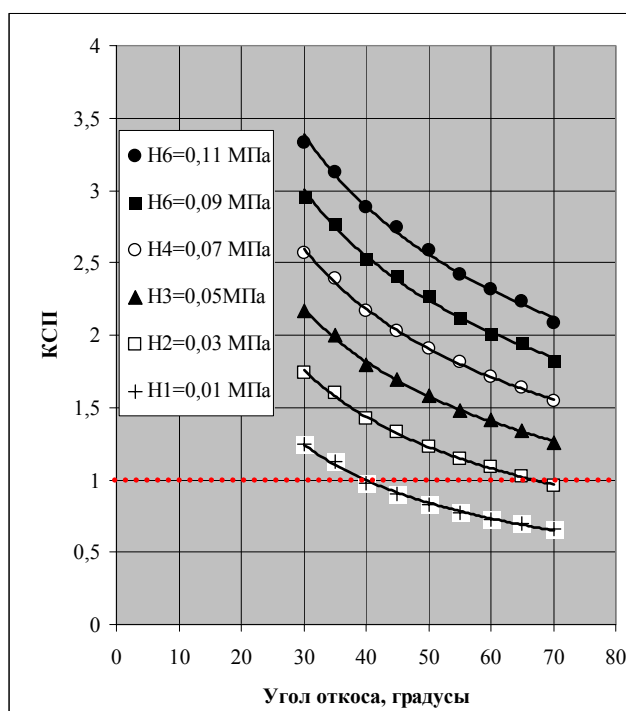


Рис. 4. Зависимость устойчивости откоса от предела прочности на растяжение

При значении предела прочности пород на сжатие более 0,03 МПа откос находится в устойчивом состоянии. Однако, согласно лабораторным данным, сцепление пород в образцах, отобранных в пределах одного участка месторождения, значительно варьирует, что снижает достоверность результатов расчета устойчивости откосов. Поэтому, при использовании в расчетных схемах фактора сцепления необходимо учитывать структурные особенности, водонасыщенность массива и другие факторы.

Выводы.

1. Применение метода конечных элементов с использованием программного пакета Phase2 позволило проанализировать геомеханические процессы, происходящие в откосе при сдвигении массива пород, и установить закономерности нарушения его устойчивости. Для вскрышных пород наиболее устойчивым является откос с высотой уступа до 20 м в рассматриваемом диапазоне углов откоса от 30° до 70°. Анализируя рис. 2, можно определить также оптимальные параметры для уступов высотой более 20м. Так, устойчивость откоса обеспечивается при следующих значениях высоты уступа Н и угла откоса α : Н=25м и $\alpha \leq 55^\circ$; Н=30м и $\alpha \leq 50^\circ$; Н=35м и $\alpha \leq 45^\circ$; Н=40м и $\alpha \leq 40^\circ$. При необходи-

мости можно получить ряд значений КСП для конкретных геометрических параметров уступа.

2 Угол внутреннего трения φ при заданных геометрических параметрах и физико-механических характеристиках пород практически не влияет на устойчивость откоса.

3. Сцепление пород наряду с геометрическими параметрами является ключевым фактором устойчивости откоса. Однако, значения этого параметра даже в рамках одного участка месторождения могут варьировать в широком диапазоне и зависят от других факторов, определяющих прочность массива (водонасыщенность, трещиноватость, слоистость и др.), что снижает достоверность результатов оценки устойчивости откосов. Для более точных расчетов рекомендуется выполнять параллельную оценку, например с использованием критериев Мора-Кулона, Хоека-Брауна и т.д.

Список литературы.

1. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Хозяйкина Н.В. Механика грунтов: Учебный посібник. – К.: Новий друк, 2008. – 128 с. іл.

2. Собко Б.Ю. Удосконалення технології відкритої розробки розсіпних титаноцирконієвих руд: Монографія. - Д. Національний гірничий університет, 2008. -167 с.- Рос. мовою.

3. Определение параметров устойчивости внутреннего отвалообразования при разработке Мотроновско-Анновского участка, а также разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости внутренних отвалов. - Кривой Рог: КТУ. - К.: УкрНИИПроект, 2004. -С. 115-116.

4. Ковров А.С. Моделирование явления потери устойчивости породных уступов на эквивалентных материалах // Науковий вісник НГУ, 2009, №9.

5. Tutorials for Phase 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Сдвіжковою О.А.
Надійшла до редакції 28.08.10*

УДК 622.672.1

© К.С. Заболотный, М. А. Рутковский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ МНОГОКАНАТНОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ СО ШКИВОМ ТРЕНИЯ

Предложена модель для исследования процесса торможения многоканатной шахтной подъемной установки, которая дает возможность определения рациональных параметров дискового тормоза, позволяющих обеспечить требования Правил безопасности

Запропонована модель для дослідження процесу гальмування багатоканатної шахтної підйомної установки, яка дає можливість визначення раціональних параметрів дискового гальма, що дозволяють забезпечити вимоги Правил безпеки.

The model for studying the process of braking the drum shaft hoisting plant, which makes it possible to determine the rational parameters of disk brakes, allowing for the requirements of safety rules.