

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.271.332

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ УГЛОВ ОТКОСОВ РАБОЧИХ УСТУПОВ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЦЕМЕНТНОГО СЫРЬЯ «КОММУНАРСКОЕ»

Оника С.Г., Халявкин Ф.Г., Семенова М.В., Ганцовский Е.И. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье рассмотрены результаты исследований допустимых углов откосов рабочих уступов применительно к карьерам, разрабатывающим месторождения цементного сырья «Коммунарское».

Введение

ОАО «Белорусский цементный завод» ведет разработку Коммунарского месторождения цементного сырья (высоко- и низкокарбонатных мергелей), состоящего из трех детально разведанных участков. В настоящее время эксплуатируется два из них: участок «Высокое» площадью 450 га и «Коммунары Западные» площадью 384,8 га.

Исследованиями ВНИМИ установлены допустимые углы откосов рабочих уступов. При высоте уступа 20 м они могут достигать следующих параметров: рабочий угол – 50°, нерабочий – 35°. Длительными наблюдениями за состоянием откосов маркшейдерской службой предприятия установлена возможность увеличения допустимых углов откосов рабочих уступов, что согласуется также с выводами ВНИМИ, отраженными в их предварительных рекомендациях [1]. Исследование устойчивости откосов уступов позволяет определить условия безопасной эксплуатации и способствует повышению полноты извлечения запасов полезного ископаемого из недр.

Результаты исследований

Обоснование увеличения допустимых углов откосов рабочих уступов потребовало выполнения комплексных исследований, которые включали:

- графоаналитические исследования устойчивости откосов уступов при различных вариантах вероятной поверхности скольжения с учетом сил фильтрации;
- моделирование устойчивости откосов с использованием программного комплекса GeoStudio;
- исследование устойчивости откосов по методу плоского откоса без учета и с учетом нагрузки от работы оборудования.

Аналитические исследования позволили разработать математические модели оценки устойчивости уступов с учетом сил фильтрации, позволяющие анализировать ситуацию с обеспечением устойчивости при увеличении углов откосов уступов в сравнении с принятыми значениями в проектах на разработку месторождения.

Для того чтобы учесть в расчетах действие фильтрационных сил необходимо, в первую очередь, построить линии скольжения и депрессии, а затем определить площадь w , ограниченную этими линиями, и градиент напора воды.

После построения линии скольжения одним из известных методов строим линию депрессии, уравнение которой имеет вид:

$$y = \sqrt{h^2 + \frac{x}{l} \cdot (H^2 - h^2)},$$

где H – напор воды, м;

x – координата;

h – глубина потока подземных вод на откосе борта карьера, м;

l – расстояние между откосом карьера и контуром питания, м.

Глубина потока на откосе карьера составит [2]:

$$h = \frac{l}{m_0 - 0,5} - \sqrt{\left(\frac{l}{m_0 - 0,5}\right)^2 - H^2 \cdot \frac{m_0 + 0,5}{m_0 - 0,5}},$$

где m_0 – условное заложение откоса, равное

$$m_0 = \frac{5}{1,75 \cdot \operatorname{tg} \varphi},$$

где φ – угол внутреннего трения грунта.

Расстояние между нижней бровкой откоса и контуром питания (l) определим по формуле И.П. Кусакина [3]:

$$l = 2 \cdot (H - h) \cdot \sqrt{H \cdot K_\phi},$$

где K_ϕ – коэффициент фильтрации грунта, м/сут.

Площадь, ограниченную линиями депрессии и скольжения w (рисунок 1), определим с помощью двойного интеграла по правилу внутренней переменной x . Область интегрирования w находится между прямыми $y = 0$ и $y = H$, а переменная x изменяется в данной области при каждом фиксированном значении y от точек параболы:

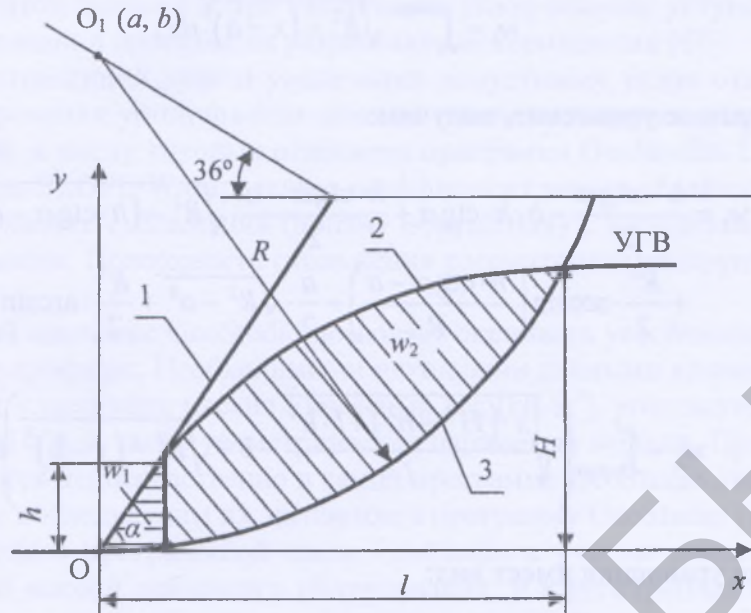
$$x = \frac{l \cdot (y^2 - h^2)}{H^2 - h^2},$$

до точек окружности

$$x = a + \sqrt{R^2 - (y - b)^2},$$

где a, b – координаты центра дуги скольжения точки O_1 , м;

R – радиус дуги скольжения, м.



1 – линия откоса с уступами; 2 – депрессионная кривая; 3 – поверхность скольжения;
 O₁ – центр поверхности скольжения; УГВ – уровень грунтовых вод; w₁, w₂ – площади, ограниченные линиями депрессии и скольжения; h – глубина потока подземных вод на откосе карьера; H – напор воды; R – радиус поверхности скольжения; l – расстояние между откосом карьера и контуром питания; α – угол откоса уступа; a, b – координаты точки O₁

Рисунок 1 – Схема к расчету устойчивости откоса при поверхности скольжения, проходящей через нижнюю бровку откоса

Тогда величина площади w составит [4]:

$$w = \int_0^H dy \cdot \int_{\frac{l \cdot (y^2 - h^2)}{H^2 - h^2}}^{a + \sqrt{R^2 - (y-b)^2}} dx = \int_0^H \left(a + \sqrt{R^2 - (y-b)^2} - \frac{l \cdot (y^2 - h^2)}{H^2 - h^2} \right) dy,$$

$$w = \int_0^H \left(a + \sqrt{R^2 - (y-b)^2} - \frac{l \cdot (y^2 - h^2)}{H^2 - h^2} \right) dy.$$

Градиент напора I фильтрационного потока в пределах площади w будет равен:

$$I = \frac{H - h}{l}.$$

Линию депрессии можно построить задаваясь различными значениями x в пределах расстояния l между низом откоса и контуром питания [5].

Рассмотрим вариант, когда линия (дуга) поверхности скольжения проходит через нижнюю бровку откоса (рисунок 1).

Тогда

$$w = w_1 + w_2,$$

где w₁ – площадь, ограниченная откосом уступа и линией скольжения, м²;

w₂ – площадь, ограниченная линиями депрессии и скольжения, м².

$$w_1 = \int_0^{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha} \sqrt{R^2 - (x-a)^2} dx.$$

Решая данное уравнение, получим:

$$w_1 = \frac{h^2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2} - b \cdot h \cdot \operatorname{ctg} \alpha + \frac{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a}{2} \cdot \sqrt{R^2 - (h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a)^2} + \\ + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a}{R} \right) + \frac{a}{2} \cdot \sqrt{R^2 - a^2} + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{a}{R} \right).$$

$$w_2 = \int_{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha}^i \left(\sqrt{\frac{x \cdot (H^2 - h^2) + l \cdot h^2}{l}} - b + \sqrt{R^2 - (y-b)^2} \right) dx.$$

Решение уравнения имеет вид:

$$w_2 = \frac{2 \cdot l}{3 \cdot (H^2 - h^2)} \left(\sqrt{[l \cdot (H^2 - h^2) + l \cdot h^2]^3} - \sqrt{[h \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot (H^2 - h^2) + l \cdot h^2]^3} \right) - \\ - b \cdot (l - h \cdot \operatorname{ctg} \alpha) + \frac{l-a}{2} \cdot \sqrt{R^2 - (x-a)^2} + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{l-a}{R} \right) - \\ - \frac{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a}{2} \sqrt{R^2 - (h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a)^2} - \frac{R^2}{2} \arcsin \left(\frac{h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - a}{R} \right).$$

Тогда

$$w = w_1 + w_2 = \frac{h^2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2} + \frac{a}{2} \cdot \sqrt{R^2 - a^2} + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{a}{R} \right) + \\ + \frac{2l}{3(H^2 - h^2)} \left(\sqrt{[l \cdot (H^2 - h^2) + l \cdot h^2]^3} - \sqrt{[h \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot (H^2 - h^2) + l \cdot h^2]^3} \right) - \\ - b \cdot l + \frac{l-a}{2} \cdot \sqrt{R^2 - (x-a)^2} + \frac{R^2}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{l-a}{R} \right).$$

Для каждого варианта прохождения линии поверхности скольжения величину площади w , ограниченной линиями депрессии и скольжения, умножают на длину откоса. Полученный объем грунта и будет тем объемом, на который воздействуют силы гидростатического взвешивания и гидродинамического давления. Их величина составит:

$$F = w \cdot I \cdot \gamma_v \cdot L_0,$$

где γ_v – плотность воды;

L_0 – длина откоса.

Численный анализ графоаналитических моделей показывает возможность сохранения устойчивости уступов сложенных низкими и высокими мергелями с норма-

тивным коэффициентом запаса 1,2 при увеличении углов откосов уступов в сравнении с принятыми значениями в проектах на разработку месторождения [6].

Решение поставленной задачи увеличения допустимых углов откосов потребовало также моделирования устойчивости откосов с использованием современных компьютерных моделей, к числу которых относится программа GeoStudio. Подключенный программный модуль SLOPE/W определяет коэффициент запаса устойчивости и строит критическую поверхность скольжения (призму обрушения) с использованием методов предельного равновесия. Поверхность скольжения рассматривается круглоцилиндрической формы.

Программный комплекс GeoStudio позволяет оценивать устойчивость откосов уступов по заданному профилю. Необходимыми исходными данными являются характеристика горных пород, слагающих массив (объемный вес [кН/м^3], угол внутреннего трения [град], сцепление [кПа]), а также геометрические параметры модели. Профили откосов уступов отстраиваются непосредственно в самой программе GeoStudio либо выполняются в среде AutoCad с последующим их экспортом в программу GeoStudio [7].

Модель уступа в программной среде GeoStudio с учетом дополнительной нагрузки, создаваемой массой добычного оборудования, и иллюстрацией коэффициента запаса устойчивости имеет вид, представленный на рисунке 2.

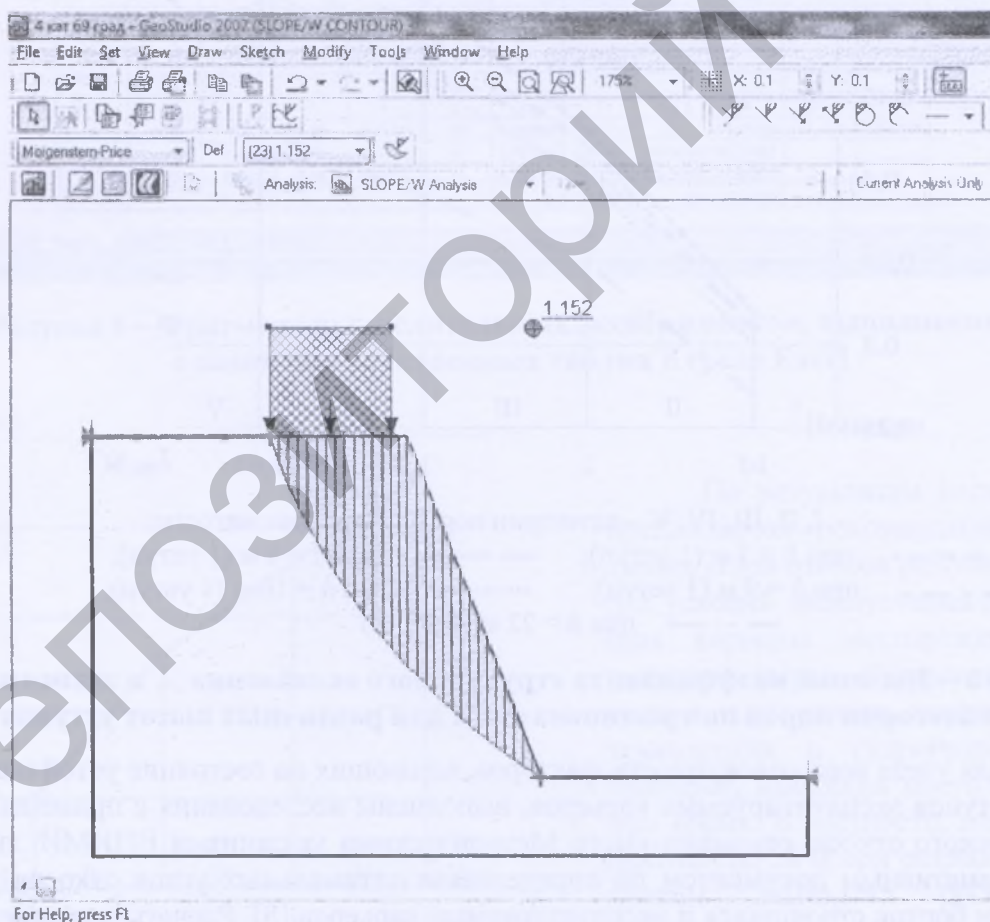


Рисунок 2 – Модель уступа в программной среде GeoStudio.
Исследование устойчивости с учетом статической нагрузки от оборудования

ЖУРНАЛУ «ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ» 15 ЛЕТ

Плотностные и горнотехнические свойства исследуемого массива определялись с поправкой на коэффициент структурного ослабления λ , с учетом категории пород по трещиноватости, который был вычислен по эмпирической формуле ВНИМИ [1]:

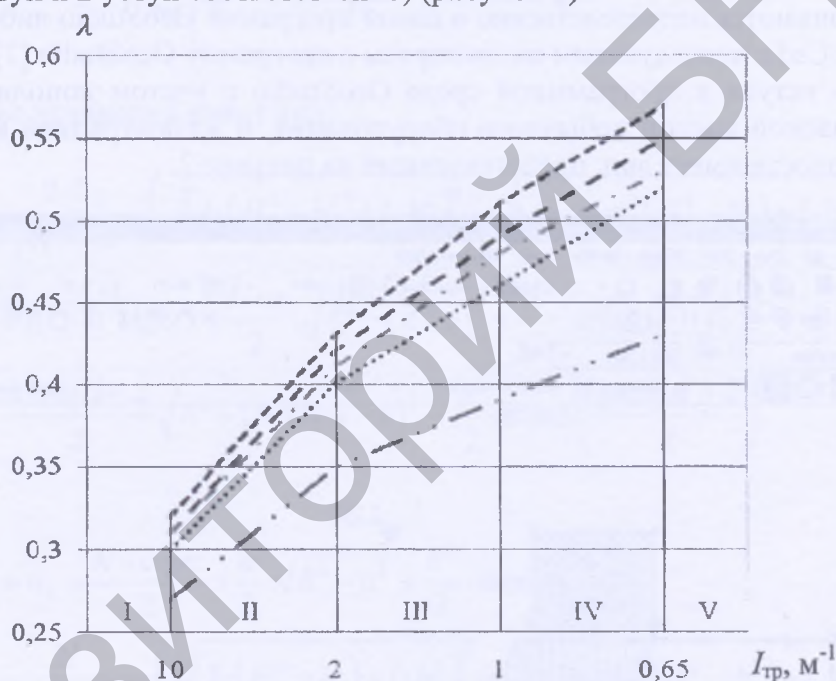
$$\lambda = 1 \cdot (1 + a \cdot \ln(H_y \cdot I_{тр}))^{-1}$$

где a – коэффициент, зависящий от породы и характера ее трещиноватости ($a = 0,5$);

H_y – высота откоса уступа, м;

$I_{тр}$ – интенсивность трещиноватости пород, m^{-1} (соответствует категории пород по трещиноватости).

Исследованиями установлены численные значения коэффициента структурного ослабления для уступов, сложенных различными горными породами (низкий и высокий мергель: 1 уступ и 2 уступ соответственно) (рисунок 3).



I, II, III, IV, V – категории пород по трещиноватости;
 - - - - - при $h = 7$ м (1 уступ); - - - - - при $h = 8$ м (1 уступ);
 - · - · - при $h = 9$ м (1 уступ); ········ при $h = 10$ м (1 уступ);
 - · · - · при $h = 22$ м (2 уступ)

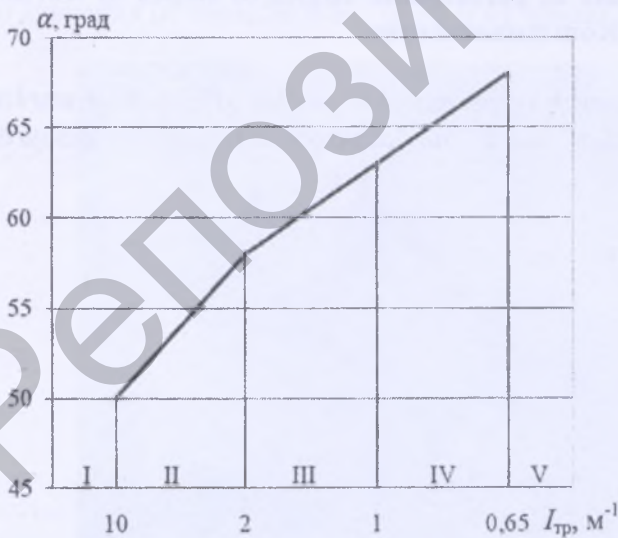
Рисунок 3 – Значение коэффициента структурного ослабления λ в зависимости от категории пород по трещиноватости для различных высот уступов

Для учета всей совокупности факторов, влияющих на состояние устойчивости откосов уступов эксплуатируемых карьеров, выполнены исследования с применением метода плоского откоса, рекомендуемого Методическими указаниями ВНИМИ, являющимися нормативным документом по определению оптимальных углов откосов уступов, отвалов и бортов строящихся и эксплуатируемых карьеров [5]. Расчеты выполнены с помощью электронных таблиц в среде Excel для различных условий. Фрагмент вычислительных экспериментов представлен на рисунке 4.

Скриншот фрагмента вычислительных экспериментов в среде Excel. Таблица содержит следующие данные:

№ n/n	a	h	γ	ρ	α	sin α	T	cos α	N	K*L	n	
1	8,7	9,81	1,79	152,7711	54	0,809017	139,5481	0,587785	101,3876	131,4497	1,227095	
2	6	12,24	1,79	131,4576	35	0,573576	75,40098	0,819152	107,6838			
3	7,75	4,95	1,79	68,66888	22	0,374607	25,72381	0,927184	63,66867			
							Σ=	240,6729		272,7401		
							L=	33,34781				
							ΔP=	19,71983				
№ n/n	a	h	γ	ρ	α	sin α	T	cos α	N	K*L	n	
1'	4,35	7,1	1,79	55,28415	60	0,866025	55,1341	0,5	31,83169	117,1805	1,291573	
2'	6	9,19	1,79	98,7006	47	0,731354	72,18505	0,681998	67,31365			
3'	7,75	3,96	1,79	54,9351	34	0,559193	30,71932	0,829038	45,54326			
							Σ=	158,0385		144,6886		
							P=	94,96457				
							L=	29,72781				
							ΔP=	31,5				
№ n/n	a	h	γ	ρ	α	sin α	T	cos α	N	K*L	n	
1'	4,35	7,1	1,79	55,28415	60	0,866025	75,15728	0,5	43,39208	117,1805	1,185344	
2'	6	9,19	1,79	98,7006	47	0,731354	72,18505	0,681998	67,31365			
3'	7,75	3,96	1,79	54,9351	34	0,559193	30,71932	0,829038	45,54326			
							Σ=	178,0616		156,249		

Рисунок 4 – Фрагмент вычислительных экспериментов, выполненных с помощью электронных таблиц в среде Excel



I, II, III, IV, V – категории пород по трещиноватости

Рисунок 5 – Значение допустимых углов для уступа высотой 22 метра для различных категорий пород по трещиноватости

Выводы

По результатам исследований предлагаются рекомендации допустимых углов откосов рабочих уступов для условий эксплуатации действующих карьеров месторождения цементного сырья «Коммунарское» с учетом совокупного влияния горно-технических и гидрогеологических факторов, имеющих место в настоящее время. В частности, для уступов высотой до 22 м при разработке драглайном ЭШ-6,5/45 (МЗШ-6,5/45) нижним черпанием, допустимые углы откосов достигают значений, представленных на рисунке 5.

Рекомендациями учитываются плотностные свойства пород, сла-

гающих уступы, их трещиноватость, статические и динамические нагрузки на откос от работы оборудования, применяемого при разработке месторождения, высота уступа.

Установлена возможность увеличения допустимых углов откосов рабочих уступов при эксплуатации месторождений цементного сырья «Коммунарское». Исследование устойчивости откосов уступов позволило определить условия безопасной эксплуатации и обеспечить повышение полноты извлечения запасов полезного ископаемого из недр.

Список использованных источников

1. Заключение о допустимых углах откосов Коммунарского карьера мергелей. – ВНИМИ. – 1978 г.
2. Защита карьеров от воды / С.К. Абрамов [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 230 с.
3. Скабалланович, И.А. Гидрогеология, инженерная геология и осушение месторождений / И.А. Скабалланович, М.В. Седенко. – М.: Недра, 1980. – 205 с.
4. Халявкин, Ф.Г. Графоаналитический метод расчета устойчивости откосов с учетом сил фильтрации / Ф.Г. Халявкин, С.Г. Оника, В.С. Марцинкевич // Горная механика и машиностроение. – № 3. – 2010 г.
5. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – ВНИМИ. – Ленинград, 1972.
6. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965.
7. GeoStudioTutorials. Includes student edition lessons. First edition. – May, 2004. – 485 с.

Onika S.G., Khalyaykin F.G., Semionova M.V., Gantsovski Ye.I.

Geomechanical study of the increase of permissible angles of slopes of working benches at the cement resources deposit «Kommunarskoye»

The article gives findings of the research of permissible angles of slopes of working benches with regard to the quarries that work out deposits of cement resources «Kommunarskoye».

Поступила в редакцию 24.10.2013 г.