

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ПОРОДНЫХ ОТКОСОВ

Виконано аналіз сучасних критеріїв стійкості укосів та бортів кар'єрів. Представлено результати моделювання стійкості борту на кар'єрі Вільногірського ГМК в програмі кінцево-елементного аналізу Phase2 з використанням критеріїв міцності Кулона-Мора, Хоека-Брауна та Друккера-Прагера.

ASSESSMENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL ROCK SLOPES STABILITY

The analysis of up-to-date criteria for open-cast slope stability has been carried out. Results of slope stability modeling at the open-cast of Vilnogirs'k Mining and Metallurgical Plant with specialized finite-element method software Phase2 by Mohr-Coulomb, Hoek-Brown and Drucker-Prager failure criteria have been presented.

Устойчивость бортов карьеров и отвалов является одной из основных проблем при разработке месторождении полезных ископаемых открытым способом. Установление максимальных углов наклона бортов карьеров, при которых обеспечивается их устойчивость, требует детального изучения всех влияющих факторов: литологии, физико-механических свойств горных пород, трещиноватости, тектоники и обводненности массива.

Для описания геомеханических процессов в прибортовом массиве используют различные критерии прочности, однако все они не универсальны: хорошо описывая процесс разрушения одних твердых тел, они непригодны для других, отличающихся по структуре.

В связи с отсутствием единой универсальной теории прочности твердых тел в настоящее время много дискуссий ведется на предмет того, какая из существующих теорий прочности более точно описывает процесс разрушения горных пород, пригодны ли эти теории для практического применения.

Целью данной работы является сравнительный анализ современных критериев прочности, используемых при оценке устойчивости откосов и бортов карьеров.

По способу получения критерии прочности можно разделить на две большие группы: аналитические и эмпирические. Известны аналитические критерии прочности – Треска – Сен-Венана, Ю.И. Ягна, П.П. Баландина, И.Н. Миролюбова, Л.Я. Парчевского и А.Н. Шашенко. К наиболее популярным эмпирическим относятся критерии О. Мора, З.Т. Бенявского, Хоека-Брауна и некоторые другие. Эмпирические критерии прочности получают на основе обработки результатов лабораторных испытаний горных пород в сложных напряженных состояниях и натуральных измерений при соблюдении основных базовых положений

механики разрушения [1], аналитические – с использованием некоторой общей зависимости, приведенной в работе [2].

Для оценки состояния бортов карьеров с мягкими покрывающими породами используют несколько критериев прочности, которые рассмотрены ниже.

Аналитические критерии прочности.

Прочность пород, находящихся в условиях неравнокомпонентного всестороннего сжатия, зависит, прежде всего, от соотношения между главными напряжениями: σ_1 , σ_2 и σ_3 . В связи с этим в природе возможны три вида объемного напряженного состояния:

1. гидростатическое, когда все три компоненты напряжения равны между собой $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$;

2. неравнокомпонентное, когда две меньшие компоненты напряжения равны между собой, то есть $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$;

3. неравнокомпонентное, когда все три компоненты разные, то есть $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

По результатам многочисленных опытов было установлено, что промежуточное по величине напряжение σ_2 оказывает незначительное влияние на разрушение горных пород (гипотеза Мора), поэтому их прочность определяется, прежде всего, разностью наибольшего и наименьшего напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ и их суммой $\sigma_1 + \sigma_3$. При этом имеются исследования, в которых доказывается существенное влияние среднего по величине напряжения σ_2 [3].

При исследовании плоских напряженно-деформированных состояний наибольший практический интерес при изучении прочностных свойств горных пород представляет неравнокомпонентное напряженное состояние, когда $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (случай 2).

Теория прочности П. П. Баландина [2] в качестве критерия прочности использует результаты испытаний материала при предельных одноосном растяжении и одноосном сжатии. При этом, формула эквивалентности, приводящая сложное напряженное состояние (для случая, когда $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) к простому одноосному, выглядит так:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \frac{(1 - \psi)(\sigma_1 + 2\sigma_3) - \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + 2\sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{эkv}}$ – напряжение, эквивалентное одноосному напряженному состоянию; $\psi = R_p/R_c$.

Аналитическое выражение теории прочности Л.Я. Парчевского–А.Н. Шашенко [1], полученное из тех же предпосылок, что и теория прочности П.П. Баландина выглядит так:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c. \quad (2)$$

Критерий Кулона-Мора.

При аналитических исследованиях параметров упругопластического состояния чаще всего используется критерий прочности Мора с прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений [4].

Прочностными характеристиками, входящими в условие прочности, основанное на прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений, являются угол внутреннего трения ρ и сцепление C , либо пределы прочности на одноосное сжатие R_c и растяжение R_p . В механику горных пород, объектом исследований которой являются, как правило, породы скального типа, угол внутреннего трения и величина сцепления как прочностные характеристики были перенесены из механики грунтов, науки более старой, чем геомеханика. Так, при оценке предельного состояния широко используется линейное соотношение Кулона-Мора, имеющее вид:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \rho. \quad (3)$$

Здесь τ - напряжение сдвига, σ_n - нормальное напряжение. С известным допущением условие прочности Кулона может применяться, когда речь идет о грунтах или сыпучих породах, хотя, как показал М.М. Протождяконов, огибающая предельных кругов Мора даже при испытаниях песка имеет все же криволинейную форму (рис. 1). Для связных пород в области сжатия отличие реальной криволинейной огибающей от прямолинейной весьма существенно.

Критерий Кулона-Мора применяется в горной механике относительно разрушений при сдвиге в породе, соединении пород и массивах. Критерий предполагает, что обрушение происходит вдоль плоскости без всякого расширения. Критерий Кулона-Мора также может быть выражен в основных напряжениях как

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2C \cos \varphi}{\sigma_3 (1 - \sin \varphi)} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (4)$$

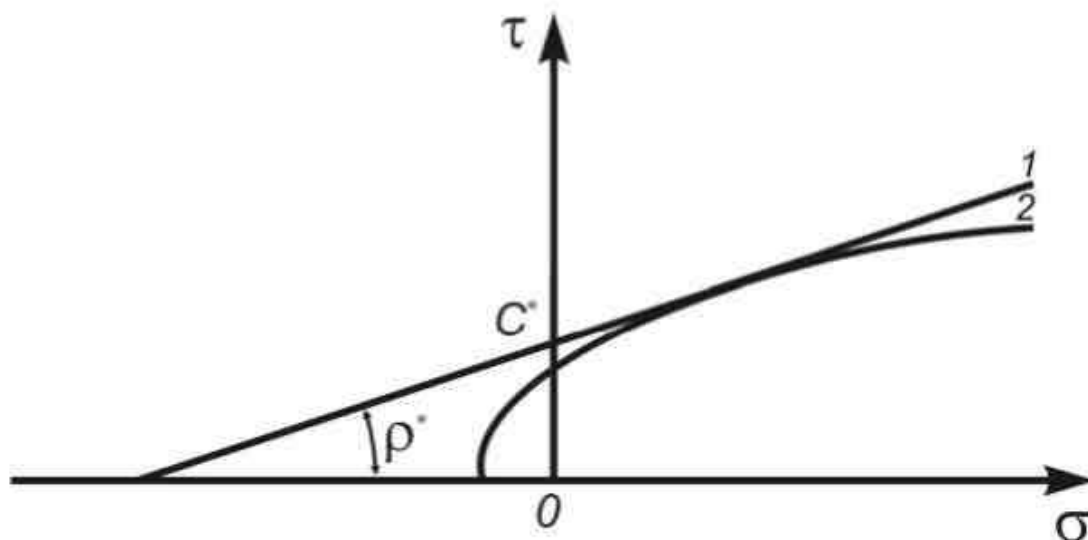


Рис. 1 – Переход от криволинейной огибающей предельных кругов Мора к прямолинейной:
1 - прямолинейная; 2 - криволинейная

Одна из причин, по которой критерий Кулона-Мора часто используется в горной механике – то, что он может быть описан простым математическим выражением, легок для понимания и прост в использовании.

Критерий Хоека-Брауна.

В этом критерии изначально учитываются физико-механические свойства интактного, то есть неповрежденного породного массива, который в процессе моделирования поэтапно подвергается внешним нагрузкам как природного (гравитация), так и техногенного происхождения (горные работы). В результате снижаются прочностные характеристики откоса за счет уменьшения сил сцепления и происходит сдвигение горного массива по криволинейной поверхности скольжения. Устойчивость откосов выражается коэффициентом запаса устойчивости (КЗУ): при $KЗУ > 1$ откос устойчив, $KЗУ = 1$ соответствует критическому состоянию, переходящему в состояние обрушения при $KЗУ < 1$.

В общем виде критерий Хоека-Брауна выражается формулой:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (5)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальные и минимальные напряжения в массиве; m_b – константа Хоека-Брауна для породного массива; s и a постоянные величины, учитывающие генезис и состояние (качество) породного массива; σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие массива пород в интактном состоянии [4].

Для породного массива в интактном состоянии критерий Хоека-Брауна сводится к следующему выражению:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (6)$$

Здесь константа m_i , в отличие от константы m_b , учитывает только генезис и текстуру горных пород ($4 \leq m_i \leq 33$). Большая величина m_i соответствует хрупким породам, чем она меньше, тем пластичнее порода, а при $m_i = 0$ имеет место идеальная пластичность.

Нормальные и сдвигающие напряжения относятся к главным напряжениям согласно уравнениям, опубликованными Г. Балмером [5]:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{d\sigma_1'/d\sigma_3' - 1}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1} \quad (7)$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \frac{\sqrt{d\sigma_1'/d\sigma_3'}}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1} \quad (8)$$

где

$$d\sigma_1'/d\sigma_3' = 1 + am_b \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (9)$$

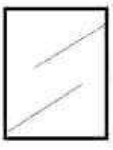





Чтобы использовать критерий Хоека-Брауна для оценки прочности и деформируемости связных пород необходимо учесть три параметра:

- предел прочности на одноосное сжатие σ_{ci} для ненарушенного (интактного) массива пород;
- значение константы Хоека-Брауна m_i для интактного массива;
- значение коэффициента геологической прочности (КГП) пород.

Коэффициент геологической прочности (КГП), предложенный Э. Хоеком в 1994 г. представляет величину, которая вместе с другими физико-механическими свойствами интактного массива используется в расчетах для оценки снижения прочности в массиве для различных геологических условий.

В табл. 1 представлена характеристика горного массива в зависимости от степени сцепления и связности кусков породы.

Таблица 1 – Зависимость КГП от степени сцепления и связности [6]

<p>КОЭФФИЦИЕНТ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ СВЯЗНЫХ ПОРОД (КГП)</p> <p>Оцените среднее значение КГП с учетом литологии, структуры и состояния поверхности с нарушениями сплошности Не старайтесь соблюдать точность.</p>		<p>СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ</p> <p>ОЧЕНЬ ХОРОШЕЕ Очень грубые, свежие, невыветренные поверхности</p> <p>ХОРОШЕЕ Грубые, слабо выветренные поверхности с пятнами ржавчины</p> <p>СРЕДНЕЕ Гладкие, умеренно выветренные или измененные поверхности</p> <p>ПЛОХОЕ Очень выветренные поверхности с плоскостями скольжения, с компактными слоями, включениями или угловатыми фрагментами</p> <p>ОЧЕНЬ ПЛОХОЕ Сильно выветренные поверхности с плоскостями скольжения с слоями мягкой глины или включениями</p>				
<p>СТРУКТУРА</p>		<p>Ухудшение качества поверхности →</p>				
	<p>Неповрежденная или монолитная - неповрежденные или монолитные куски породы с несколькими далеко расположенными нарушениями сплошности</p>	90	80	70	60	Н/д
	<p>Блочная - хорошо сцепленный неповрежденный породный массив, состоящий из блоков кубической формы с взаимно пересекающимися нарушениями сплошности</p>	80	70	60	50	Н/д
	<p>Многоблочная - сцепленный, частично поврежденный массив с многогранными угловатыми блоками, сформированными 4 или более поверхностями соединения</p>	70	60	50	40	Н/д
	<p>Блочная / Поврежденная / Слоистая - складчатый массив с угловатыми блоками, сформированными множеством пересекающихся плоскостей разрыва. Сланцеватость.</p>	60	50	40	30	Н/д
	<p>Дезинтегрированная - слабо связанный, сильно нарушенный породный массив с примесью угловатых или округлых кусков породы</p>	50	40	30	20	Н/д
	<p>Слоистая - отсутствие блоков вследствие близкого расположения слабых прослоек или плоскостей сдвига</p>	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	10

В табл. 2 представлена характеристика гетерогенного массива (флиш).

Таблица 2 – Оценка коэффициента геологической прочности (КГП) для гетерогенных породных массивов (флиш) [6]

<p>КГП ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОРОДНОГО МАССИВА (ФЛИШ) Выберите соответствующую ячейку в таблице исходя из описания литологии, структуры и состояния поверхности (в частности слоистых поверхностей). Определите позицию в ячейке, которая соответствует состоянию неоднородностей и оцените среднее значение КГП по контурам. Не старайтесь соблюдать точность. Критерий Хоэка-Брауна не применяется к структурно контролируемым нарушениям. Если имеют место неблагоприятно ориентированные плоскости разрывов, то они будут играть доминирующую роль. Прочность породного массива снижается в присутствии грунтовых вод, поэтому допускается небольшое смещение в правую часть колонок СРЕДНИЕ, ПЛОХИЕ и ОЧЕНЬ ПЛОХИЕ условия. Давление воды не влияет на значение КГП, который используется в анализе эффективных напряжений.</p>	<p>ОЧЕНЬ ХОРОШЕ - очень грубые, свежие, невыветренные поверхности</p>	<p>ХОРОШЕ - грубые, слетка выветренные поверхности</p>	<p>СРЕДНИЕ - гладкие, умеренно выветренные и измененные поверхности</p>	<p>ПЛОХОЕ - очень гладкие поверхности с единичными поверхностями скопления, с компактными слои или включениями угловатых фрагментов</p>	<p>ОЧЕНЬ ПЛОХОЕ - очень гладкие поверхности с плоскостями скопления или сильно выветренные поверхности с слоями мягкой глины или включениями</p>
<p>СОСТАВ И СТРУКТУРА</p> <p>А. Толстослойный, сильно кусковатый песчаник. Эффект пелитовых слоев на слоистых поверхностях сведен к минимуму посредством ограничения породного массива. В неглубоких тоннелях или откосах эти слоистые поверхности могут вызывать структурно контролируемую нестабильность.</p> <p>В. Песчаник с тонкими прослоями алевролита</p> <p>С. Песчаник и алевролит в одинаковых кол-вах</p> <p>Д. Алевролит или солевой глинистый сланец с прослоями песчаника</p> <p>Е. Слабый алевролит или глинистый сланец с прослоями песчаника</p> <p>С, D, E G - возможно более или менее складчатые, чем изображено, но это не изменяет прочность. Тектоническая деформация, разрыв и потеря сплошности снижает эти категории к F и H.</p>	<p>70</p>	<p>60</p>	<p>40</p>	<p>30</p>	<p>20</p>
<p>Г. Невысокая прочность, деформация после тектонического нарушения</p>	<p>70</p>	<p>60</p>	<p>40</p>	<p>30</p>	<p>20</p>
<p>Н. Тектонически деформированный наносной или глинистый сланец, образующий хаотическую структуру с включениями глины. Тонкие слои песчаника трансформированы в маленькие куски породы.</p>	<p>70</p>	<p>60</p>	<p>40</p>	<p>30</p>	<p>20</p>

↑ : Деформация после тектонического нарушения

В 2002 г. в критерии Хоека-Брауна было учтено влияние горных и особенно взрывных работ на физико-механические свойства пород прибортового массива, что выражается в уравнениях:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (10)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (12)$$

где GSI (*Geological Strength Index*) – коэффициент геологической прочности, учитывающий геологические особенности породного массива, в частности его структуру и наличие трещин ($5 \leq GSI \leq 100$). Параметр GSI во многом аналогичен параметру RMR (*Rock Mass Rating*), предложенного З.Т. Бенявским; D – параметр, зависящий от степени нарушенности массива вследствие взрывных работ и эффекта релаксации напряжений, варьирует от 0 (для интактного) до 1 (для сильно нарушенного) породного массива.

Применительно к устойчивости откосов и бортов карьеров $D=1,0$ для высоких уступов и очень больших откосов, которые подвержены значительным нарушениям в результате взрывных работ и снятия напряжений при удалении вскрыши; $D=0,7$ для бортов с мягкими породами при использовании драглайнов и экскаваторов, при этом степень повреждения откосов меньше.

Как видно из вышеприведенных таблиц, КГП является величиной неоднозначной, так как в расчетах рекомендуется учитывать его ориентировочное значение без особой точности. Представленная классификация пород является довольно условной, потому что в реальных горно-геологических условиях трудно классифицировать образцы породы по структуре, составу и качеству поверхности. Так, для глин, мергелей, суглинков и других мягких пород осадочного происхождения значение КГП находится в диапазоне 5...35.

С целью дать качественную оценку рассмотренным теориям прочности в пределах одной безразмерной системы координат ($X = \frac{\sigma_3}{R_c}; Y = \frac{\sigma_1}{R_c}$) были построены нелинейные паспорта прочности для различных пород с учетом их структурных характеристик (рис. 2).

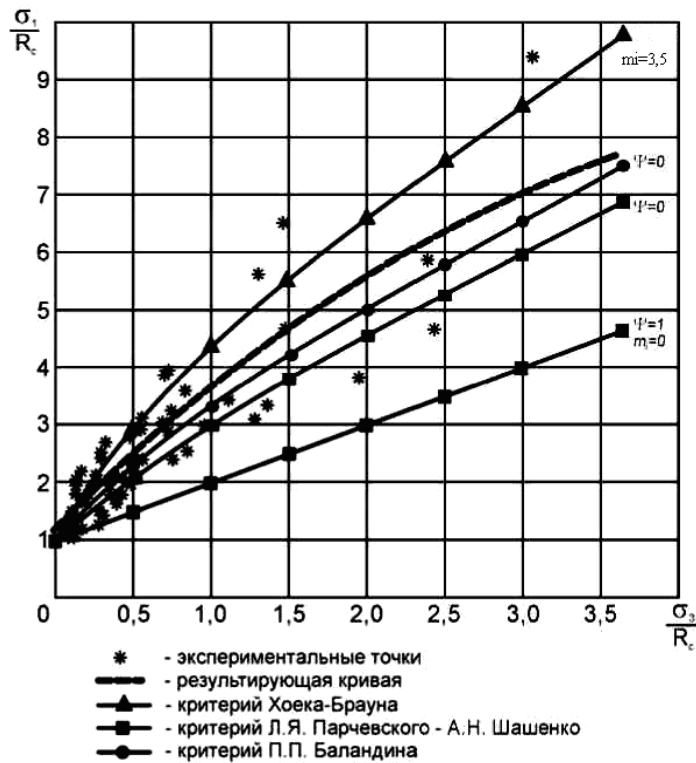


Рис. 2 – Сравнение существующих критериев прочности с экспериментальными данными

В качестве базовой использовалась усредняющая кривая, построенная в пределах этой же системы координат по экспериментальным точкам, полученным А.Н. Ставрогиным [4] в результате многочисленных испытаний горных пород различного генезиса. Критерии прочности оценивались по степени отклонения описанных ими паспортов прочности от экспериментальной кривой.

В соответствии с заданной системой координат, где главные напряжения определены в долях от предполагаемого предела прочности горных пород на одноосное сжатие, критерии для хрупких пород ($\psi = 0$) примут следующий вид:

- критерий прочности П. П. Баландина:

$$\frac{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} + 2\frac{\sigma_3}{R_c}\right)} \leq 1 \quad (13)$$

- критерий прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко:

$$\frac{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} + \frac{\sigma_3}{R_c}\right)} \leq 1 \quad (14)$$

- критерий прочности Хоека-Брауна (среднее значение постоянной m для хрупких пород равно 3,5):

$$\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^2 - 3,5 \frac{\sigma_3}{R_c} \leq 1 \quad (15)$$

Логично предположить, что кривая, соответствующая тому или иному предлагаемому критерию прочности, должна находиться как можно ближе к результирующей кривой.

Критерии П.П. Баландина, Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко и Хоека-Брауна для пластичных пород с коэффициентом хрупкости ψ близким к 1, или при m_i близким к 0, наилучшим образом описывают поведение твердых тел, одинаково сопротивляющихся усилиям растяжения-сжатия и склонных к вязкому разрушению.

Для хрупких пород сравниваемые критерии прочности дают отличающиеся результаты. Чуть ниже результирующей кривой располагается кривая критерия Л.Я. Парчевского-А.Н. Шашенко. Кривая, соответствующая критерию Хоека-Брауна, при $m_i = 3,5$, что отвечает тестируемым породам в исследованиях А.Н. Ставрогина, располагается выше результирующей кривой. При $m_i > 10$ кривая уходит резко вверх. Поле рассеяния точек практически полностью охватывается двумя кривыми: снизу – по Л.Я. Парчевскому-А.Н. Шашенко, сверху – по Хоеку-Брауну.

Ближе всего к результирующей кривой испытаний горных пород расположена кривая, соответствующая критерию прочности П.П. Баландина. Расчеты, выполняемые по критерию Хоека-Брауна, будут тем точнее, чем слабее, пластичнее рассматриваемые породы. В случае же крепких, хрупких пород расчеты, выполняемые по этому критерию, будут несколько завышены, что должно корректироваться при оценке прочности проектируемых сооружений введением соответствующего запаса прочности.

В двух рассматриваемых выше критериях прочности Л.Я. Парчевского - А.Н. Шашенко и Хоека-Брауна предусмотрен переход от оценки прочности ненарушенного породного массива и породного массива, содержащего структурные дефекты в виде трещин.

В первом случае это достигается введением в основную зависимость коэффициента структурного ослабления, учитывающего масштабный эффект, наличие в реальных породах внутренней неоднородности и блочной структуры. Для определения величины коэффициента структурного ослабления достаточно знать два параметра: среднее расстояние между трещинами и вариацию испытаний породных образцов на одноосное сжатие. Физический смысл этих величин ясен и понятен, а их получение не представляет никакой трудности.

Во втором случае в обобщенный критерий прочности вводится пять пара-

метров: m_b , s , a , GSI , D , определение которых является достаточно сложной и в известной степени субъективной процедурой. Стремление максимально учесть в аналитическом выражении особенности рассматриваемого породного массива делает эмпирические зависимости все более громоздкими и менее точными, учитывая разброс значений каждого из вводимых параметров [4].

В табл. 3 представлены результаты моделирования устойчивости откоса для условий карьера Вольногорского горно-металлургического комбината с использованием различных критериев прочности, выполненные в программе конечно-элементного анализа *Phase2* [7]. При заданных физико-механических характеристиках породного массива были определены наиболее целесообразные геометрические параметры откоса, обеспечивающие безопасность технологии открытых горных работ.

Как видно из таблицы, для некоторых геометрических параметров значения КЗУ, рассчитанные по разным критериям, практически совпадают. Возможно, определенные различия в расчетах обусловлены различным набором исходных данных. Так, например, в критерии Кулона-Мора ключевыми параметрами являются сцепление и угол внутреннего трения, а в критерии Хоека-Брауна используется предел прочности на сжатие, коэффициент геологической прочности и расчетные коэффициенты для интактного породного массива.

Анализируя результаты таблицы, можно сделать вывод, что использование нескольких критериев дает возможность более точно оценить не только КЗУ откосов, но и достоверность исходных данных.

Таблица 3 – Зависимость KCI от геометрических параметров откоса

Высота уступа (H , м)	Зависимость KCI 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: ¹Кулона-Мора, ²Хоека-Брауна, ³Друкера-Прагера

Выводы. Для точной оценки устойчивости откосов на карьерах рекомендуется использовать как аналитические, так и эмпирические критерии прочности, что позволяет достаточно хорошо моделировать нелинейный процесс разрушения пород.

Критерий Кулона-Мора учитывает сцепление пород и угол внутреннего трения, которые в реальных условиях варьируют в широком диапазоне даже в пределах одного месторождения и зависят от других факторов, определяющих прочность массива (водонасыщенность, трещиноватость, слоистость и др.), что снижает достоверность результатов оценки устойчивости откосов.

Критерий Хоека-Брауна дает более точные результаты при оценке прочности пластичных пород. Но при учете структурных дефектов массива в виде трещин и плоскостей ослабления критерий Хоека-Брауна становится все более громоздким. Входящие в обобщенные уравнение параметры определяются приблизительно, их получение на практике весьма затруднительно.

Из рис. 2 следует, что процесс разрушения хрупких горных пород наиболее точно описывают критерии прочности П.П. Баландина и Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко и именно их следует рекомендовать для практического использования. При этом критерий прочности П. П. Баландина является наиболее общим и может быть использован при решении объемных задач.

Возможный компромисс на пути дальнейшего развития критериев прочности породных массивов лежит, видимо, в разумном сочетании двух подходов – аналитического и эмпирического, когда ясные физические модели корректируются обобщенными результатами лабораторных и натуральных измерений. При этом лабораторные и натурные тесты должны быть максимально простыми, доступными и лишены возможности субъективной оценки [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород: Учебник для вузов. – К.: Новый друк, 2003. – 400 с.
2. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Том I. – Москва: МАШГИЗ, 1956. – 884 с.
3. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. — Киев: Наукова думка, 1982. - 198 с.
4. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 224 с. – Рос. мовою.
5. Balmer, G. 1952. A general analytical solution for Mohr's envelope. *Am. Soc. Test. Mat.* 52, 1260-1271.
6. Hoek E. (2002). *Practical Rock Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy. pp. 325.
7. Tutorials for *Phase 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses*.