

Б. Р. РАКИШЕВ<sup>1</sup>, С. К. МОЛДАБАЕВ<sup>1</sup>, Г. К. САМЕНОВ<sup>1</sup>, А. Н. ШАШЕНКО<sup>2</sup>, А.  
С. КОВРОВ<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы,  
Республика Казахстан,

<sup>2</sup>Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина)

## АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

**Аннотация.** В статье в соответствии с планом НИР по проекту №753 МОН ГФ.13. «Многофакторный анализ устойчивости высоких внутренних отвалов на основе численных геомеханических моделей в условиях полого-наклонного и наклонного основания», финансируемому МОН РК выполнен анализ современных критериев устойчивости бортов карьеров и отвалов. Представлены результаты моделирования устойчивости борта на угольном разрезе «Майкубенский» в программе конечно-элементного анализа Phase2 с использованием критериев прочности Кулона-Мора, Хоека-Брауна и Друккера-Прагера. Критерии Кулона-Мора и Друккера-Прагера учитывают сцепление пород и угол внутреннего трения. 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. Процесс разрушения хрупких горных пород наиболее точно описывают критерии прочности П. П. Баландина и Л. Я. Парчевского – А. Н. Шашенко. Критерий прочности П. П. Баландина является наиболее общим и может быть использован при решении объемных задач. Результаты моделирования показывают, что для точной оценки устойчивости бортов карьеров и отвалов рекомендуется использовать как аналитические, так и эмпирические критерии прочности, когда ясные физические модели корректируются обобщенными результатами лабораторных и натурных измерений. Это позволяет достаточно объективно моделировать нелинейный процесс разрушения пород.

**Ключевые слова:** устойчивость бортов карьеров и отвалов, коэффициент геологической прочности, коэффициент запаса устойчивости, критерий прочности.

**Тірек сөздер:** карьерлер мен үйінділердің жағдауларының тұрақтылығы, геологиялық беріктік коэффициенті, тұрақтылық қорының коэффициенті, беріктік критерийі.

**Keywords:** stability of slopes and waste piles, Strength Reduction Factor, Safety Factor, failure criterion.

**Введение.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов является одной из основных проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Установление макси-мальных углов откоса 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. 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 [1]. К наиболее популярным эмпирическим относятся критерии О. Мора, З. Т. Бенявского, Хоека-Брауна и др. 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 [2].

**Анализ критериев разрушения, используемых для оценки устойчивости бортов карьеров и отвалов.** Для оценки состояния бортов карьеров с мягкими покрывающими породами используют несколько критериев прочности, которые рассмотрены ниже.

**Аналитические критерии прочности.** Прочность пород, находящихся в условиях неравно-компонентного всестороннего сжатия, прежде всего, зависит от соотношения между главными напряжениями:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . В связи с этим обычно рассматриваются наиболее часто встречающиеся 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  $\sigma_2$  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  $\sigma_1 + \sigma_3$ . Имеются также исследования, в которых доказывается существенное влияние среднего по величине напряжения  $\sigma_2$  [3].

При исследовании плоских напряженно-деформированных состояний наибольший интерес представляет неравнокомпонентное напряженное состояние, когда  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ .

Теория прочности П. П. Баландина [1] 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:

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

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

Аналитическое выражение теории прочности Л. Я. Парчевского – А. Н. Шашенко [2], полученное из тех же предпосылок, что и теория прочности П. П. Баландина, выглядит так:

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

**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  $\rho$  и сцепление  $C$ , либо пределы прочности на одноосное сжатие  $R_c$  и растяжение  $R_p$ . При оценке предельного состояния широко используется линейное соотношение Кулона-Мора, имеющее вид:

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

Здесь  $\tau$  – напряжение сдвига,  $\sigma_n$  – нормальное напряжение. С известным допущением условие прочности Кулона может применяться, когда речь идет о грунтах или сыпучих породах.

Критерий Кулона-Мора также может быть выражен в основных напряжениях, как:

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

Одна из причин частого использования критерия Кулона-Мора в горной механике, – он может быть описан простым математическим выражением, легок для понимания и прост в использовании.

**Критерий Друкера-Прагера.** Этот критерий изначально был предложен для описания пластических деформаций в почвах и мягких породах, а позже для оценки прочности пород.

Критерий пластического течения Друкера-Прагера [5] имеет вид:

$$\sqrt{J_2} = A + BI_1, \quad (5)$$

где  $I_1$  и  $J_2$  – первый и второй инварианты тензора напряжений,  $A$  и  $B$  – константы, определяемые по экспериментальным данным.

В главных напряжениях критерий записывается так:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (6)$$

В виде эквивалентных напряжений критерий выражается в следующей форме:

$$\sigma_e = a + b\sigma_m, \quad (7)$$

где  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение,  $\sigma_m$  – гидростатическое напряжение,  $a$ ,  $b$  – материальные кон-станты. Если предел текучести  $R_t$  представлен одноосным сжатием  $R_c$ , тогда уравнение принимает вид:

$$\frac{1}{\sqrt{3}}R_c = A - BR_c. \quad (8)$$

Если предел текучести представлен одноосным растяжением  $R_p$ , тогда критерий Друкера-Прагера принимает вид:

$$\frac{1}{\sqrt{3}}R_p = A + BR_p. \quad (9)$$

Решение этих двух уравнений дает значения констант  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R_c R_t}{R_c + R_t}; \quad B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_t - R_c}{R_c + R_t}. \quad (10)$$

Коэффициент одноосной асимметрии для модели Друкера-Прагера выражается формулой:

$$\beta = \frac{R_c}{R_t} = \frac{1 - \sqrt{3}B}{1 + \sqrt{3}B}. \quad (11)$$

Поскольку поверхность текучести Друкера-Прагера во многом совпадает с аналогичной по-верхностью деформации в критерии Кулона-Мора, данный критерий может выражаться через сцеп-ление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ . Если предположить, что поверхность текучести Друкера-Пра-гера описывает поверхность текучести Кулона-Мора, тогда выражения для  $A$  и  $B$  принимают вид:

$$A = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}; \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}. \quad (12)$$

Если поверхность текучести Друкера-Прагера вписывается в поверхность текучести Кулона-Мора, тогда выражения для  $A$  и  $B$  принимают вид:

$$A = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}. \quad (13)$$

Как видно из вышеприведенных формул, в критерии Друкера-Прагера угол внутреннего трения и сцепление являются основными прочностными характеристиками, которые учитываются для оценки устойчивости бортов карьеров и отвалов [5].

**Критерий Хоека-Брауна.** В этом критерии изначально учитываются физико-механические свойства интактного, то есть неповрежденного породного массива, который в процессе моделиро-вания поэтапно подвергается внешним нагрузкам как природного (гравитация), так и техногенного происхождения (горные работы). В результате

снижаются прочностные характеристики горных пород. Если породный массив представлен откосом, то за счет уменьшения сил сцепления происходит его сдвиг по криволинейной поверхности скольжения. Устойчивость откосов выражается коэффициентом запаса устойчивости (КЗУ): при  $КЗУ > 1$  откос устойчив,  $КЗУ = 1$  соответствует критическому состоянию, переходящему в состояние обрушения при  $КЗУ < 1$ .

В общем виде критерий Хоека-Брауна выражается формулой:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \frac{Ж}{И} m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \frac{Ц}{Ш}^a, \quad (14)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – 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,  $\sigma_{ci}$  – предел прочности на одноосное сжатие массива горных пород в интактном состоянии [4].

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

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \frac{Ж}{И} m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \frac{Ц}{Ш}^{0.5}. \quad (15)$$

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 Г. Балмера [6]:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \frac{d\sigma_1'/d\sigma_3' - 1}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1}, \quad (16)$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \frac{\sqrt{d\sigma_1'/d\sigma_3'}}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1}, \quad (17)$$

где

$$d\sigma_1'/d\sigma_3' = 1 + am_b \frac{Ж}{И} m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \frac{Ц}{Ш}^{a-1}. \quad (18)$$

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

– предел прочности на одноосное сжатие  $R_{ci}$  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 2002 г. в критерии Хоека-Брауна было учтено влияние горных и особенно взрывных работ на физико-механические свойства породного массива, что выражается в уравнениях:

$$m_b = m_i \exp \frac{\text{ж}GSI - 100 \text{ц}}{\text{и} 28 - 14D \text{ц}}, \quad (19)$$

$$s = \exp \frac{\text{ж}GSI - 100 \text{ц}}{\text{и} 9 - 3D \text{ц}}, \quad (20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (21)$$

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 нарушения массива вследствие взрывных работ и эффекта релаксации напряжений, варьируется от 0 (для интактного) до 1 (для сильно нарушенного) породного массива.

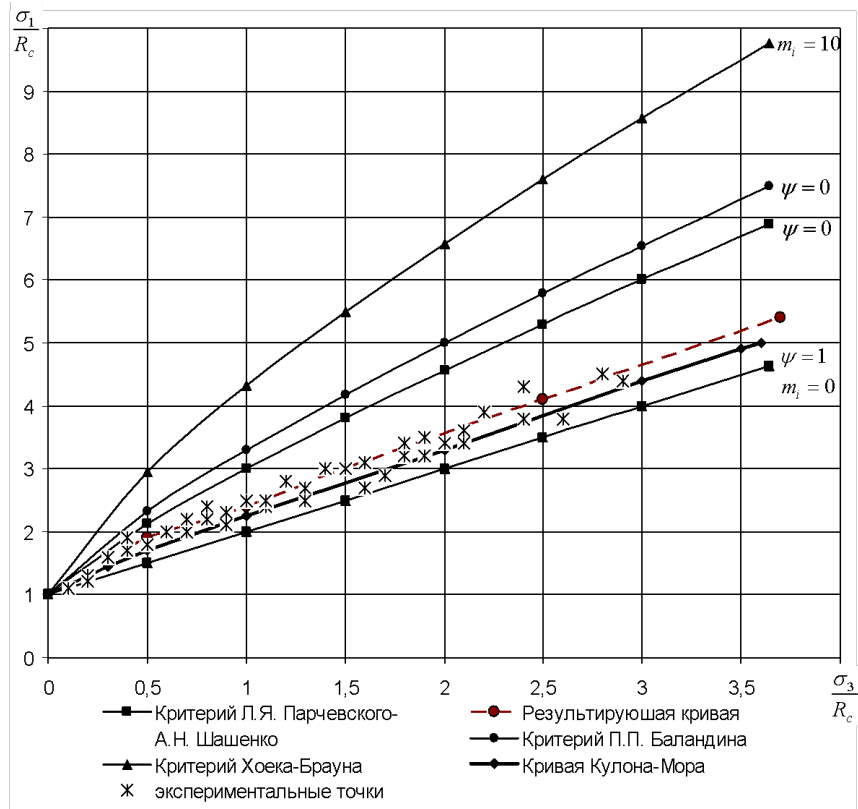
Применительно к устойчивости бортов карьеров и отвалов  $D = 1,0$  для высоких уступов и очень больших откосов, которые подвержены значительным нарушениям в результате взрывных работ и снятия напряжений при удалении вскрыши;  $D = 0,7$  для бортов с мягкими породами при использовании драглайнов и экскаваторов,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

*Коэффициент геологической прочности (КГП)*, используемый в критерии Хоека-Брауна, является величиной неоднозначной, так как в расчетах рекомендуется учитывать его ориентировочное значение без особой точности. Следует заметить, 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 [7].

**Результаты исследований.** С целью качественной оценки рассмотренных теорий 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 (см. рисунок).

В качестве базовой использовалась усредняющая кривая, построенная в пределах этой же системы координат по экспериментальным точкам, полученным А.Н. Ставрогиным [4] (рисунок).



### Сравнение существующих критериев прочности с экспериментальными данными

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:

$$\frac{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} + 2\frac{\sigma_3}{R_c}\right)} \leq 1; \quad (22)$$

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

$$\frac{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_1}{R_c} + \frac{\sigma_3}{R_c}\right)} \leq 1; \quad (23)$$

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

$$\left(\frac{\sigma_1}{R_c} - \frac{\sigma_3}{R_c}\right)^2 - 3,5 \frac{\sigma_3}{R_c} \leq 1. \quad (24)$$

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

Чуть ниже результирующей кривой располагается кривая критерия Л. Я. Парчевского – А. Н. Шашенко при  $m_i \cong 0$ . Кривая, соответствующая критерию Хоека-Брауна при  $m_i = 3,5$ , 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 к породному массиву, содержащему 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.

Во втором случае в обобщенный критерий прочности вводится пять параметров:  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $GSI$ ,  $D$ , определение которых является достаточно сложной и в известной степени субъективной процедурой. Стремление максимально учесть в аналитическом выражении особенности рассматриваемого породного массива неизбежно делает эмпирические зависимости все более громоздкими и менее точными [4].

В таблице представлены результаты моделирования устойчивости откоса для условий угольного разреза «Майкубенский» с использованием различных критериев прочности, выполненные в программе конечно-элементного анализа *Phase2*. При заданных физико-механических характеристиках породного массива были определены наиболее целесообразные геометрические параметры откоса, обеспечивающие безопасность технологии отвалообразования при открытых горных работах.

Анализ ее показывает, что для некоторых геометрических параметров значения КЗУ, рассчитанные по разным критериям, практически совпадают. Определенные различия в расчетах обусловлены различным набором исходных данных.



Таким образом, использование нескольких критериев прочности позволяет более точно оценить не только КЗУ, но и исходные данные.

**Выводы.** Для точной оценки устойчивости бортов карьеров и отвалов рекомендуется использовать как аналитические, так и эмпирические критерии прочности, что позволяет достаточно объективно моделировать нелинейный процесс разрушения пород.

Критерии Кулона-Мора и Друккера-Прагера учитывают сцепление пород и угол внутреннего трения, которые в реальных условиях варьируют в широком диапазоне, что снижает достоверность результатов оценки устойчивости откосов.

#### Зависимость *КСП* от геометрических параметров откоса

Высота уступа ( <i>H</i> , м)	Зависимость <i>КСП</i> от угла откоса, градусы								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
15	<sup>1</sup> 2,18	2,02	1,87	1,78	1,66	1,59	1,52	1,47	1,37
	<sup>2</sup> 2,09	1,81	1,59	1,52	1,31	1,23	1,17	1,01	0,90
	<sup>3</sup> 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

*Примечание:* Критерии прочности: <sup>1</sup>Кулона-Мора, <sup>2</sup>Хоека-Брауна, <sup>3</sup>Друкера-Прагера.

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 уравнения параметры определяются приблизительно, их получение на практике весьма затруднительно.

Процесс разрушения хрупких горных пород наиболее точно описывают критерии прочности П. П. Баландина и Л. Я. Парчевского – А. Н. Шашенко. Критерий прочности П. П. Баландина является наиболее общим и может быть использован при решении объемных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Том I. – М.: МАШГИЗ, 1956. – 884 с.
- 2 Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород. – Киев: Новий друк, 2003. – 400 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. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Моно-графия. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
- 5 Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quarterly of Applied Mathematics. – 1952. – Vol. 10, N 2. – P. 157-165.
- 6 Balmer G. A general analytical solution for Mohr's envelope. // Am. Soc. Test. Mat. – 1952. – P. 1260-1271.
- 7 Hoek E. Practical Rock Engineering. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 2002. – P. 325.

## REFERENCES

- 1 Ponomarev S.D., Biderman V.L. i dr. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. Tom I. M.: MASHGIZ, 1956. 884 s.
- 2 Shashenko A.N., Pustovojtenko V.P. Mehanika gornyh porod. Kiev: Novij dрук, 2003. 400 s.
- 3 Alekseev A.D., Nedodaev N.V. Predel'noe sostojanie gornyh porod. Kiev: Naukova dumka, 1982. 198 s.
- 4 Shashenko O.M., Sdvizhkova O.O., Gapeev S.M. Deformiruemost' i prochnost' massivov

gornyh porod: Monografiya. Dnepropetrovsk: Nacional'nyj gornyj universitet, 2008. 224 s.

5 Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10, N 2. P. 157-165.

6 Balmer, G. A general analytical solution for Mohr's envelope. Am. Soc. Test. Mat. 1952, P. 1260-1271.

7 Hoek E. Practical Rock Engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy. 2002. P. 325.

## Резюме

*Б. Р. Рақышев<sup>1</sup>, С. К. Молдабаев<sup>1</sup>, Г. К. Сәменов<sup>1</sup>, А. Н. Шашенко<sup>2</sup>, А. С. Ковров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы,

<sup>2</sup> Ұлттық тау-кен университеті, Днепропетровск, Украина)

## КАРЬЕРЛЕР МЕН ҮЙІНДІЛЕР ЖАҒДАУЛАРЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУҒА ҚАТЫСТЫ БЕРІКТІК КРИТЕРИЙЛЕРІН ТАЛДАУ

Мақалада ҒЗЖ жоспарына сәйкес ҚР БҒМ қаржыландыратын №753 МОН ГФ.13. «Жайпақ-көлбеу және көлбеу негізді жағдайларда сандық геомеханикалық модельдердің негізінде биік ішкі үйінділердің тұрақты-лығын көпфакторлы талдау» жобасы бойынша карьерлер мен үйінділердің жағдауларының тұрақтылығының заманауи критерийлерін талдау орындалды. Кулон-Мор, Хоек-Браун және Друкер-Прагер беріктік критерийлерін пайдаланып Phase2 соңғы-элементтік талдау бағдарламасында «Майкөбе» көмір разрезінің жағ-дауының тұрақтылығын модельдеу нәтижелері көрсетілген. Кулон-Мор және Друкер-Прагер критерийлері жыныстардың ілінісуін және ішкі үйкеліс бұрышын есепке алады. Хоек-Браун критерийі иілімді жыныстар-дың беріктігін бағалау кезінде дәл нәтижелер береді. Бірақ массивтің жарықшақтар және әлсіз жазықтықтары түріндегі құрылымдық ақауларын есепке алу кезінде Хоек-Браун критерийінің көлемі ұлғая береді. Сынғыш тау жыныстарының бұзылу процесін П. П. Баландин және Л. Я. Парчевский – А. Н. Шашенко беріктік критерийі дәл сипаттайды. П. П. Баландиннің беріктік критерийі жалпы болып табылады және көлемдік есептерді шешу кезінде пайдаланылуы мүмкін. Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, карьерлер мен үйінділердің жағдауларының тұрақтылығын дәл бағалау үшін беріктіктің аналитикалық, сонымен қатар эмпирикалық

кри-терийлері пайдаланылады, ал анық физикалық модельдер зертханалық және табиғи өлшеулердің жалпылама нәтижелерімен дұрысталады. Бұл жыныстардың бұзылуының сызықсыз процесін жеткілікті дәл модельдеуге мүмкіндік береді.

**Тірек сөздер:** карьерлер мен үйінділердің жағдауларының тұрақтылығы, геологиялық беріктік коэффициенті, тұрақтылық қорының коэффициенті, беріктік критерийі.

## Summary

*B. R. Rakishev<sup>1</sup>, S. K. Moldabayev<sup>1</sup>, G. K. Samenov<sup>1</sup>, O. M. Shashenko<sup>2</sup>, O. S. Kovrov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan,

<sup>2</sup>National Mining University, Dnipropetrovs'k, Ukraine)

## ANALYSIS OF THE STRENGTH CRITERIA FOR ASSESSMENT OF OPEN PIT WALLS AND WASTE DUMPS STABILITY

The analysis of the modern criteria for assessment of open pit walls and waste dumps stability is carried out. The numerical results of modeling stability of the pit wall at the coal strip mine «Maikubenskiy» by the finite element analysis software Phase2 with application of Mohr-Coulomb, Hoek-Brown and Drucker-Prager failure criteria. Mohr-Coulomb and Drucker-Prager failure criteria consider rock cohesion and friction angle. Hoek-Brown criterion is more accurate in assessing the strength of plastic rocks. But taking into account the structural defects such as cracks into the massif and layers attenuation Hoek-Brown criterion becomes more cumbersome. The process of brittle rock failure is better described by Balandin Parchevsky – Shashenko strength criteria. Balandin strength criterion is the most common and can be applied for three-dimensional engineering problems. The simulation results show that for the purpose of accurate assessment of pit walls and waste dumps stability, it is recommended to use both analytical and empirical strength criteria as clear physical models are adjusted by generalized results laboratory and field measurements, which allows to objectively simulate nonlinear process of rock failure.

**Keywords:** stability of slopes and waste piles, Strength Reduction Factor, Safety Factor, failure criterion.

*Поступила 16.09.2013 г.*