

УДК 622.1

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА

Никольская О.В.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

В результате расчетов влияния степени трещиноватости массива горных пород на прочностные свойства пород, которые зависят от геологического индекса прочности. Выявлены структурно-геомеханические условия применения критерии прочности Кулона-Мора и Хоек-Брауна. Установлено, что критерий Кулона-Мора позволяет получить достоверные данные для монолитного или сильно трещиноватого) прибортового массива, а по критерию Хоек-Брауна – для массива слоистого и блочного строения

КАРЬЕРДИН ТУРУКТУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨДӨ БЫШЫКТЫК КРИТЕРИЙИН НЕГИЗДӨӨ

Никольская О. В.

КР УИАнын Геомеханика жана жер казынасын өздөштүрүү институту

Геологиялык күч индекси кез каранды болгон тоо тектеринин бекемдик касиеттерине тоо тектеринин массивдеринин жаракалык даражасынын таасирин эсептөөнүн натыйжасында. Структуралык геомеханикалык колдонуу шарттары Кулон-Мор жана Хоек-Браундун бекемдик критерийлери аныкталды. Кулон-Море критерийи монолиттүү же катуу жаракалуу) прибор массиви үчүн, ал эми Хоек-Браун критерийи боюнча катмарлуу жана блоктук түзүлүш массиви үчүн ишенимдүү маалыматтарды берет

SUBSTANTIATION OF THE STRENGTH CRITERION IN CALCULATING THE STABILITY OF THE SIDES OF THE QUARRY

Nikolskaya O.V.

Institute of Geomechanics and Subsoil Development of the National
Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (Bishkek)

As a result of calculations of the influence of the degree of fracturing of the rock mass on the strength properties of rocks, which depend on the geological strength index. The structural and geomechanical conditions of application of the Coulomb-Mohr and Hoek-Brown strength criteria are revealed. It is established that the Coulomb-Mohr criterion allows us to obtain reliable data for a monolithic or strongly fractured) instrument array, and according to the Hoek-Brown criterion – for an array of layered and block structure

Для современного горнопромышленного комплекса Кыргызстана характерно освоение нагорных месторождений в тектонически активных районах [1,2]. В настоящее время карьеры проектируют с большим запасом прочности прибортового массива, а для нагорных карьеров это приводит к увеличению объема вскрышных пород и удорожанию конечного продукта.

Практика ведения горных работ в скальных массивах показывает, что устойчивость откосов, достигающих по высоте десятков и даже сотен метров, сохраняется в течение многих лет даже при крутых углах. на многих рудниках [3 -6]. Однако, известны факты самообрушения отдельных участков бортов, которые существенно осложняют ведение горных работ, что приводит к экономическим потерям [7-9]. Поэтому формирование бортов карьеров с крутыми откосами должно сопровождаться геомеханическим обоснованием параметров бортов карьера, соответствующим геомеханическим и горно-геологическим условиям.

Золоторудные месторождения Кыргызстана как правило приурочены к разрывным тектоническим нарушениям [1]. В массивах явно выражены системы трещин различной ориентации, что обуславливает блочное строение породного массива. Вмещающие породы представлены, как правило, интрузивными и эффузивными породами, подвергнутыми гидротермально-метасоматическим изменениям [2].

В применяемых в настоящее время методиках обоснования параметров устойчивых бортов карьеров [10-13] на первый взгляд, учтены все факторы, действующие в массиве на момент формирования

борта: физико-механические характеристики пород, слагающих прибортовой массив; интенсивность трещиноватости; геометрия борта; гидрогеологические условия; показатели сопротивления сдвигу по плоскостям трещин. По этим факторам прогнозируется устойчивость прибортового массива при проектном угле наклона борта. При таком методическом подходе прогноз устойчивости борта карьера сводится к математическому расчету коэффициента запаса прочности, зависящего от соотношения удерживающих сил к сдвигающим силам по расчетным поверхностям скольжения [14].

Самым сложным в изучении прибортового массива оказывается определение и оценка тех сил и напряжений, которые приводят к изменению структурного строения массива, физико-механических характеристик пород и к потере устойчивости массива.

В последние годы внимание ученых сосредоточено на разработке критериев прочности при оценке состояния породного массива. [12-15]. Новые критерии прочности основаны на критерии Кулона-Мора и Хоек-Брауна. Однако до настоящего времени не проводилась сравнительная оценка этих критериев применительно к качеству массива.

Критерий Кулона-Мора. При аналитических исследованиях параметров упругопластического состояния горных пород чаще всего используется критерий прочности Мора [16]. 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 σ_c и растяжение σ_r . Линейное соотношение Кулона-Мора имеет вид [17]:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \rho. \quad (1)$$

Здесь τ - напряжение сдвига, σ_n - нормальное напряжение.

Критерий Кулона-Мора также может быть выражен в основных напряжениях [18]:

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

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 общем виде критерий Хоека-Брауна выражается формулой [16,17]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (3)$$

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 [16,17].

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

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}. \quad (4)$$

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.

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

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

Коэффициент геологической прочности (GSI), предложенный Э. Хоеком в 1994 г. представляет величину, которая вместе с другими физико-механическими свойствами ненарушенного массива используется в расчетах для оценки снижения прочности в массиве для различных геологических условий [19-21]

В критерии Хоека-Брауна [16-17] было учтено влияние горных и особенно взрывных работ на физико-механические свойства пород прибортового массива, что выражается в уравнениях:

$$\begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

где GSI (Geological Strength Index) – коэффициент геологической прочности, учитывающий геологические особенности породного массива, в частности его структуру и наличие трещин ($5 \leq GSI \leq 100$); D – параметр, зависящий от степени нарушения массива вследствие взрывных работ и эффекта релаксации напряжений, варьирует от 0 (для ненарушенного массива) до 1 (для сильно нарушенного) породного массива.

Для определения границ применимости этих критериев была принята модель прибортового массива, трещиноватость которого

изменяли от монолитного до чрезвычайно трещиноватого. Высота борта принята 100 м, угол борта карьера 45°.

Основной задачей расчета коэффициента устойчивости для массива различной степени трещиноватости по вышеназванным критериям было установить зависимость этого коэффициента от геологического индекса прочности (GSI), который задавали в пределах от 0 до 100.

Свойства пород с учетом трещиноватости массива приведены в табл.1.

Таблица 1. Прочностные свойства пород с учетом геологического индекса прочности

Геологический индекс прочности GSI	Предел прочност и при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочност и при растяжении σ_r , МПа	Сцепление пород С, МПа	Угол внутреннего трения ϕ , град
100	250	25	50	50
90	140	12	32	43
80	82	5,53	23	41
70	50	2,6	18	39
60	26	1,23	15	35
50	15	0,58	12	33
40	8,27	0,27	11	31
30	4,3	0,13	8,8	28
20	2	0,06	6,9	24
10	0,71	0,03	4,8	21
5	0,36	0,02	3,6	18

Зависимость прочностных характеристик пород в массиве от геологического индекса прочности приведена на рис 1.

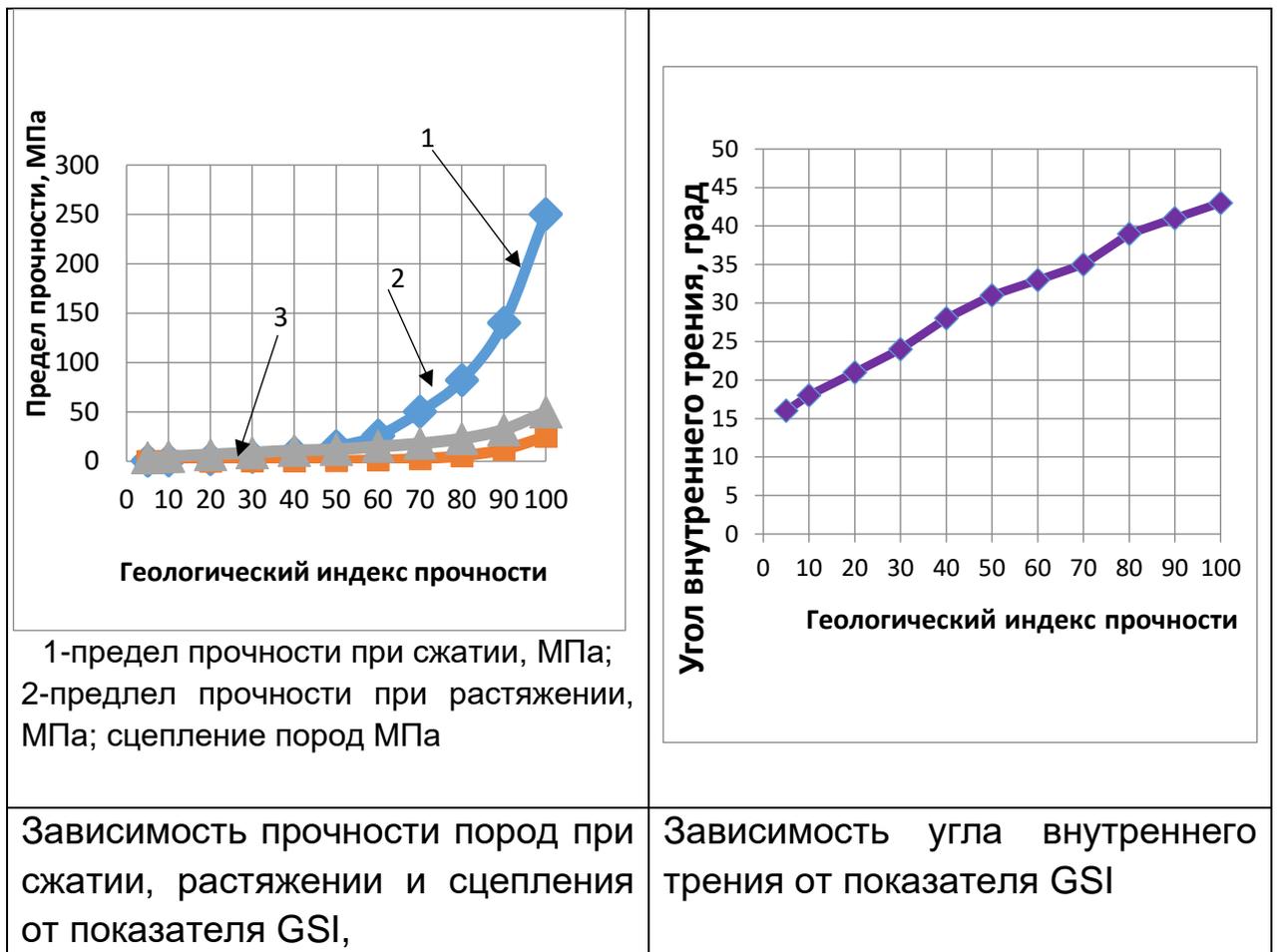


Рис. 1. Изменение прочностных свойств пород в зависимости от геологического индекса прочности

На основании анализа зависимости свойств пород установлено, что наиболее чувствительным параметром среды являются прочность пород при сжатии, при растяжении и сцепления который изменяется от максимальных значений в монолитном массиве практически до 0 в чрезвычайно трещиноватых массивах. Угол внутреннего трения увеличивается практически в три раза при переходе от чрезвычайно трещиноватого к монолитному.

Производя расчеты коэффициента устойчивости с использованием критерии Кулона-Мора и Хоек-Брауна для гипотетического карьера выявлено их несовпадение (рис. 2)

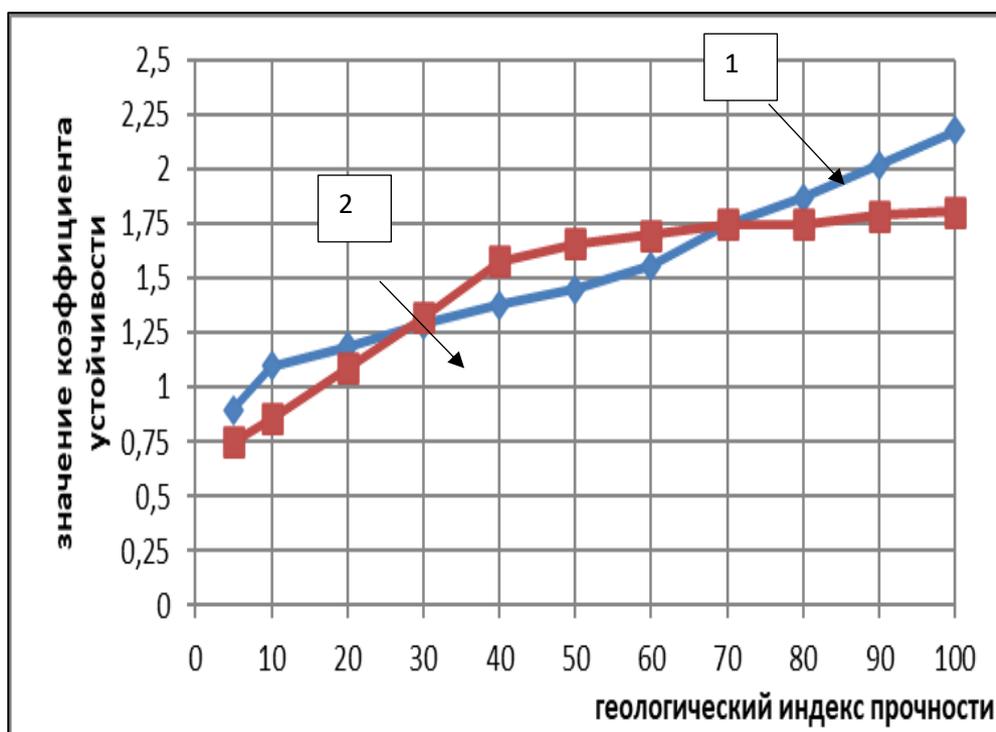


Рис.2. Зависимость коэффициента устойчивости по критерию Кулона-Мора (1) и по критерию Хоек-Брауна (2)

Выводы

На основании анализа выполненных расчетов установлено, что критерий Кулона-Мора позволяет получить достоверные данные значения коэффициента устойчивости для монолитно и чрезвычайно-трещиноватого прибортового массива, а по критерию Хоек-Брауна – для прибортового массива слоистоого и блочного строения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никоноров В.В., Караев Ю.В., Борисов Ф.И., Тольский В.И., Замалетдинов Т.С., Ларина Т.В., Горбанева Т.В. Золото Кыргызстана. Книга 2. Описание месторождений. Рудные. Бишкек, "Наси", 2004, 272 с.:
2. Королев В.Г. Схема тектонического районирования ТяньШаня и смежных регионов // Изв. Кирг. фил. Всесоюз. георг. о-ва. 1961. Вып.3. С. 81–102
3. Ильин С.А. Нагорные карьеры мира. Ч. 1. – М.: Информационно-аналитический центр горных наук, 1993.

4. Макеев А.Ю., Чернышов А.В. Нагорные карьеры Дальнегорского датолитового месторождения // Горный журнал. – 2002. – №1. – С. 31–34.
5. В.И. Нифадьев, С.Ф. Усманов особенности разработки высокогорных месторождений /Вестник КРСУ. 2009. Том 9. № 4 с.175-178
6. Лобанов Е.А., Еременко А.А., Обоснование возможности укрупнения откосов бортов и вскрышных уступов при ведении горных работ. /Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019, №3 с.61-67
7. Сашурин А.Д. Механизм формирования аварийных ситуаций различного масштаба вследствие современных геодинамических движений / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин // Черная металлургия. - 2017. - № 1 (1405). - С. 21 - 25. 2016.
8. Свиридова Т.В., Боброва О.Б., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Сомова Ю.В. Обеспечение устойчивости откосов карьеров с целью предотвращения несчастных случаев и чрезвычайные ситуации. Вестник Магнитогорского Государственного Технического Университета им. Г.И. Носова [Вестник Носова Магнитогорского государственного Технический университет]. 2016, том. 14, вып.4, стр. 5–10.
9. Козырев А.А., Рыбин В.В., Жиров Д.В. и др. Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом /Вестник МГТУ, том 12, №4, 2009 г. стр.644-653
10. Дзевомский Я. Инженерно-геологические исследования при гидротехническом строительстве / Я. Дзевомский, И.С. Комаров, Л.А. Молоков, Ф. Рейтер. – М.: Недра, 1981. – 352 с,
11. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Составители: Фисенко Г.Л., Сапожников В.Т., Мочалов А.М.,

- Пушкарев В.И., Козлов Ю.С. / Одобрено и рекомендовано к применению Госгортехнадзором СССР. - Л.: ВНИМИ, 1972.
12. Алексеев А.Д. Предельное состояние горных пород/ А.Д.Алексеев, Н.В. Недодаев. –К.: Наукова думка, 1982. –198 с.
 13. Нейштадт Л.И., Пирогов И.А. Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М.: Энергия. – 1969. - 248 с
 14. Жабко А. В. Обобщенный аналитический критерий пластичности, прочности и разрушения горных пород для условий объемного неравнокомпонентного сжатия / Горный информационно-аналитический бюллетень - 2024;(1-1) с.5—20
 15. Ватутин А.С. Закономерности пространственного изменения геодинамической опасности // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2007, № 12, с. 36-43
 16. Coulomb C.A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. Memoires de Mathematique et de Physique, presentes a l'Academie Royales Des Sciences, 7, pp. 343-387
 17. ГОСТ 21153.5-88 (1988). Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. М: Изд-во стандартов, 7 с16
 18. Hoek E., Brown E.T. (1980). Underground excavations in rock. London, The Institution of Mining and Metallurgy, 527 p.
 19. Kumar P. (1998). Shear Failure Envelope of Hoek-Brown Criterion for Rockmass. Tunnelling and Underground Space Technology, 13(4), pp. 453-458
 20. Hoek E. and Died Erich V.S. Empirical estimation of rock mass modulus. Int. J. of Rock Mech. And Min.Sci. 2006. Vol.43.-P. 203-2015
 21. Hoek E., Carranza-Torres C/ and Corkum B. Hoek E.-Brown failure criterion. Proc. NARMS, 2002. Vol.1 -P.267-273