

УДК 622.1:550.82

**НАТУРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ПОРОДНЫХ КОНТАКТОВ**

**Ф. К. Низаметдинов, А. А. Нагибин, В. В. Левашов,
Р. Ф. Низаметдинов, Н. Ф. Низаметдинов, А. Е. Касымжанова**

*Карагандинский государственный технический университет,
E-mail: mdig_kstu@mail.ru, Бульвар Мира, 56, 100000, г. Караганда, Казахстан*

Предлагаются натурные способы изучения сцепления и угла внутреннего трения горных пород и контактов разрывных нарушений. Выполнены разработка и апробация технологий и устройств для проведения сдвига породных призм на карьере, лазерно-цифровой съемки локальных вывалов и обрушений породных блоков в недоступных местах карьерных откосов для составления уравнения предельного равновесия и вычисления прочностных свойств пород и породных контактов. Для подготовки породных призм в карьере используются буровые станки различной модификации, а сдвиг породной призмы осуществляется с помощью 40-тонного домкрата, помещенного в специальный металлический кожух с электрической маслостанцией. Для съемки локальных обрушений в недоступных местах откосов уступов применяются электронные тахеометры и горные 3D-сканеры. Апробация рассматриваемых методов исследований осуществлена на карьерах Казахстана и Киргизии.

Натурные испытания пород, сцепление пород и породных контактов, углы внутреннего трения и по контактам пород, породная призма, обрушение, гидродомкрат, сдвиг, уравнение предельного равновесия

Рациональная разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом предполагает полноту извлечения запасов при выполнении минимальных объемов вскрышных работ на основе надежного геомеханического обоснования устойчивости откосов уступов и бортов карьеров. При этом основной исходной информацией являются геологическая изученность месторождения, достоверность определения прочностных свойств горных пород и породных контактов, а также элементов залегания структурных особенностей горного массива и трещиноватости горных пород. К прочностным характеристикам горных пород, используемым при оценке устойчивости карьерных откосов, относятся плотность γ , сопротивление на сжатие $\sigma_{сж}$ и разрыв σ_p , сцепление K и угол внутреннего трения ρ , а породных контактов — сцепление K' и угол трения ρ' [1, 2].

Наиболее достоверные значения прочностных характеристик пород находятся в натуральных условиях при проведении испытаний породных призм, нарезанных непосредственно в массиве [1, 3–7]. На практике используются различные схемы натуральных испытаний породных призм на сдвиг с использованием систем гидродомкратов, гидроподушек [6, 7]. Процесс нарезки призм осуществляется с помощью штыковых лопат, долотьев, перфораторов, буровых станков, а сдвиг подготовленной породной призмы — оттарированным гидродомкратом. При сдвиге

ге породной призмы по манометру гидродомкрата фиксируют максимальное усилие Q_{\max} , возникающее при срезе, и минимальное Q_{\min} — при ее перемещении по поверхности сдвига. Линейные и угловые параметры призмы замеряются рулеткой и горным компасом.

При обработке результатов испытаний породных призм вычисляются: площадь поверхности среза S , фактическое сдвигающее усилие Q_{\max} и Q_{\min} через коэффициент тарировки гидродомкрата и вес срезанной породной призмы P . По данным полевых измерений и вычислений находятся касательные τ и нормальные σ_N напряжения и составляется паспорт прочности пород, откуда графически определяются сцепление K и угол внутреннего трения ρ [2].

Схема испытаний породных призм путем плоского среза (рис. 1) используется при нарезке призм в карьере на берме с оконтуриванием ее с четырех сторон. При этом происходит плоский срез породной призмы, а возникающие напряжения находятся по формулам [8–10]:

$$\sigma_N = \frac{P}{S}, \quad \tau = \frac{Q_{\max}}{S}, \quad (1)$$

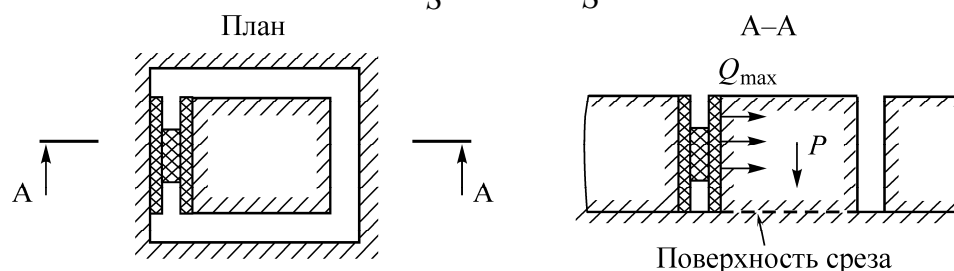


Рис. 1. Схема натурных испытаний породных призм путем плоского среза

При этом сцепление породы может быть вычислено как [9]:

$$K = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{S}, \quad (2)$$

а угол внутреннего трения по формуле

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{Q_{\min}}{P}. \quad (3)$$

Схема испытаний путем косого среза (рис. 2) применяется при нарезке породной призмы на дне шурфа или в основании откоса уступа.

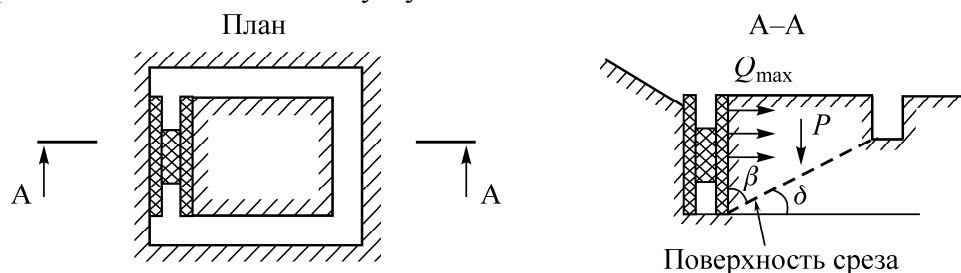


Рис. 2. Схема косого среза породной призмы

При сдвиге происходит косой срез, а напряжения по поверхности сдвига вычисляются по формулам:

$$\sigma_N = \frac{Q_{\max} \cos \beta + P \cos \delta}{S}, \quad \tau = \frac{Q_{\max} \sin \beta - P \sin \delta}{S}, \quad (4)$$

где β — угол между направлением усилия сдвига и плоскостью среза; δ — угол наклона поверхности среза.

Для данной схемы сцепление породы может быть определено также по формуле (2), а угол внутреннего трения — из выражения

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{Q_{\max} (\sin \beta - 1) - P \sin \delta - Q_{\min}}{Q_{\max} \cos \beta + P \cos \delta} \quad (5)$$

Для проведения натуральных испытаний породных призм на срез собрана специальная сдвигающая конструкция, включающая 40-тонный гидравлический домкрат, помещенный в металлическую обойму (кожух) с помощью крепежных болтов и сдвигающих металлических плит (рис. 3а). Для создания сдвигающего усилия в гидродомкрате использовалась электрическая маслостанция (рис. 3б), а для нарезки породных призм в гранодиоритах и мраморизованных известняках — буровой станок [5]. Подготовленная породная призма для сдвига приведена на рис. 4.

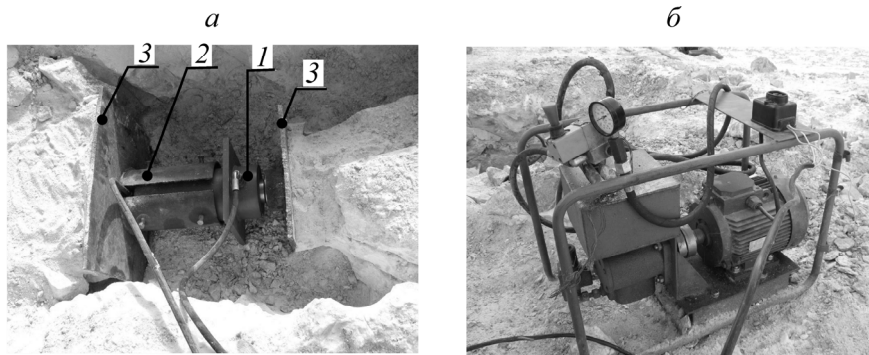


Рис. 3. Натурно-полевой комплекс для испытания пород на сдвиг: а — конструкция сдвигающей установки: 1 — гидродомкрат; 2 — металлический кожух; 3 — упорные металлические плиты; б — электрическая маслостанция

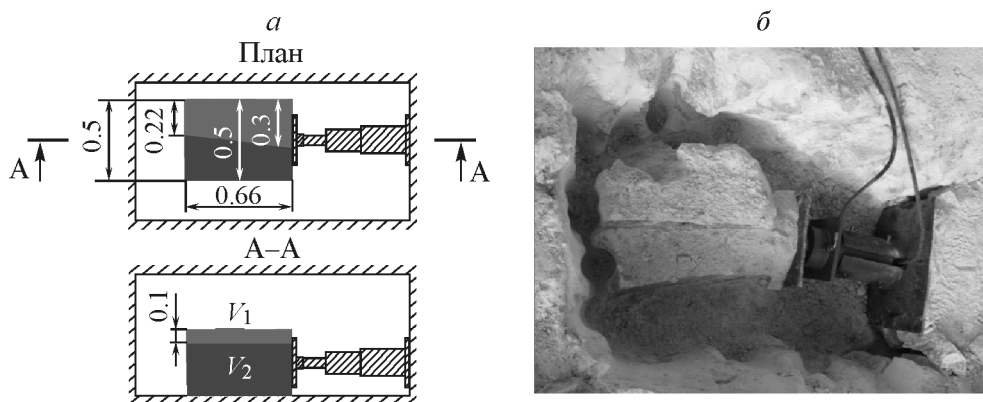


Рис. 4. Породная призма: а — схема подготовленной призмы; б — породная призма до сдвига

Для примера параметры подготовленных и сдвинутых породных призм на карьере Бозымчак сведены в табл. 1, где представлены результаты расчетов величин сцепления.

ТАБЛИЦА 1. Результаты сдвига породных призм на карьере Бозымчак (Киргизия)

Порода	Параметры сдвинутой призмы, м			Площадь среза после сдвига, м ²	Объем призмы, м ³	Показание манометра, кПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
	высота	ширина	длина		вес призмы, Н	усилие сдвига, кПа		
Мраморизованный известняк	0.412	0.50	0.66	0.330	0.136	24517	25	1.17
					3797.5	379.85		
Гранодиорит	0.425	0.55	0.900	0.504	0.214	11964	25	0.36
					6019.2	185.08		

При проведении натуральных испытаний породных призм в крепких породах (гранодиоритах и мраморизованных известняках) возникли некоторые вопросы их подготовки. Установлено, что сначала следует выполнить оконтуривание породной призмы с помощью мелкошпурового перфоратора или осуществить нарезку ее алмазным диском, а затем уже продолжить оконтуривание призмы с внешней стороны буровым станком [5]. Полученные значения сцепления пород (табл. 1) отражают комбинированное состояние породной призмы, учитывают наличие в ней трещин и массивной части. В табл. 2 приведены обобщенные данные испытаний породных призм на срез в карьерах Казахстана.

ТАБЛИЦА 2. Результаты натуральных испытаний горных пород и контактов пород месторождений Казахстана

Месторождение (карьер)	Наименование пород	Прочностные характеристики пород		Количество сдвинутых породных призм, шт.
		Сцепление K , МПа	Угол внутреннего ρ , град	
Топарское известняковое (Топарский)	Глинистые отложения	0.022	18	18
	Глинистые отложения в теле оползня	0.010	15	
	Выветрелый глинистый сланец (красный)	0.056	26	
	Выветрелый глинистый сланец (желтый)	0.076	29	
Алексеевское доломитовое (Алексеевский)	Глинистые отложения	0.037	22	10
	Углисто-глинистый сланец	0.052	26	
	Выветрелый глинистый сланец	0.042	23	
Тургайское бокситовое (Карьеры)	Неогеновые гипсоносные глины	0.043	12	40
	Пестроцветные глины	0.0125	12	
	Пестроцветные огнеупорные глины	0.087	15	
		0.122	21	
	Бокситоподобные глины (по контакту)	0.127	18	
	Подрудные глины (по контакту)	0.044	18	
	Подрудные глины	0.054	15	
Качарское железорудное (Качарский)	Глинистые отложения	0.0104	10°20'	10
	Оползни глинистых отложений	0.0109	—	3
Чиганакское боритовое (Чиганак)	Глинистые сланцы:			15
	выветрелые	0.03	20	
	раскливажированные	0.07	30	
	Яшмокарциты тонкоплитчатые:			
	трещиноватые (контакт)	0.04	22	
	трещиноватые, пликвативно нарушен- ные (контакт)	0.06	22	
	Яшмокарциты массивные:			
	слаботрещиноватые (массив)	0.11	34	
	разбитые редкими трещинами (массив)	0.17	34	
	Глинистые сланцы раскливажированные:			
	контакт	0.02	20	
	пликвативно нарушенные	0.07	3	
приконтактная зона уплотнения (интенсивно перемятые до состояния тектонической глинки)	0.06	30		

Для оценки устойчивости горных выработок в [11] предложен экспериментально-аналитический метод, основанный на использовании численных методов расчета НДС и данных натурных наблюдений за характером и параметрами нарушений приконтурного массива, позволяющий определять его прочностные свойства.

Следует отметить, что достаточно надежно можно получить сцепление и угол трения по породным контактам (трещинам, разрывным нарушениям и слоям) на основе использования разработанного нами метода “обратных расчетов обрушений и породных вывалов” в откосах рабочих уступов на карьерах (обратные задачи решались, например, в [12]). Это стало возможным за счет использования современных электронно-лазерных приборов (тахеометров, сканеров, GPS приемников), а также программных продуктов (Surpac, Datamine), позволяющих достаточно точно выполнять съемку и определять размеры и объемы породных обрушений и вывалов (рис. 5, табл. 3).

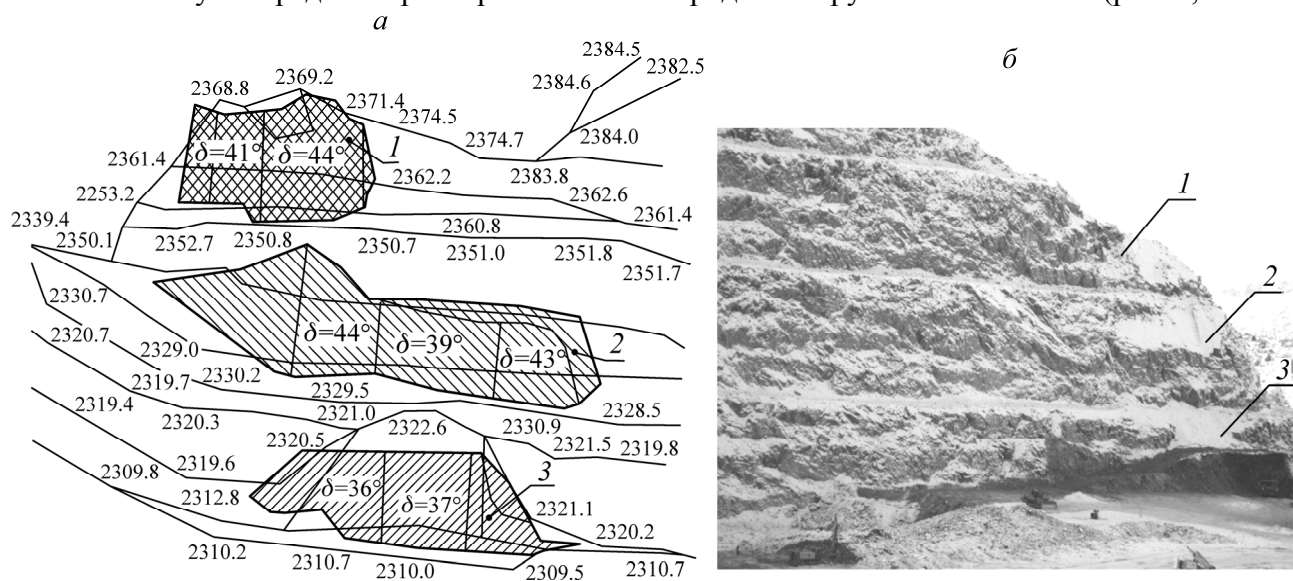


Рис. 5. Результаты съемки локальных обрушений на карьере: а — план горных работ с локальными обрушениями (1 — $V = 662 \text{ м}^3$, $S = 406.805 \text{ м}^2$; 2 — $V = 1180 \text{ м}^3$, $S = 692.444 \text{ м}^2$; 3 — $V = 886 \text{ м}^3$, $S = 393.704 \text{ м}^2$); б — фотография южного борта с обрушениями

ТАБЛИЦА 3. Данные породных обрушений на южном борту карьера Бозымчак

Характеристика	№ 1 плоское	№ 2 плоское	№ 3 плоское	№ 4 объемное (клин сползания)
Горизонт, м	2370–2350	2340–2350	2320–2310	2240
Угол наклона зеркала поверхности скольжения $\delta_{\text{ср}}$, град	36.5	42	42.5	65.5/43.0
Площадь поверхности зеркала скольжения S , м^2	394	692.4	406.8	96.5/61.0
Объем горной массы V , м^3	886	1180	662	168/209
Плотность гранодиорита γ , $\text{т}/\text{м}^3$	2.89	2.89	2.89	2.87
Масса обрушившейся горной породы в гранодиоритах P , т	2542.8	3386.6	1899.94	482.1/599.8
Угол трения по породному контакту ρ' , град	25	25	25	25
Вычисленное значение сцепления по контакту K' , МПа	0.014	0.016	0.016	0.035

В этих случаях механизм деформирования обрушенного блока (рис. 6) достаточно точно описывается уравнением предельного равновесия:

$$P_i \sin \delta_{cp} = P_i \cos \delta_{cp} \operatorname{tg} \rho' + K'S + \sigma_p S_{отр}, \quad (6)$$

где P_i — вес обрушенного породного блока, Н; δ_{cp} — средний угол наклона поверхности ослабления (скольжения), град; ρ' — угол трения по породному контакту (поверхности разрывного нарушения), град; K' — сцепление по породному контакту, МПа; σ_p — сопротивление на отрыв, МПа; $S_{отр}$ — площадь поверхности отрыва, м².

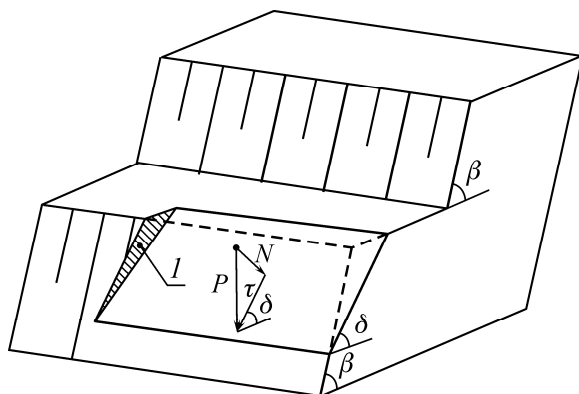


Рис. 6. Схема обрушенного породного блока

Наличие выявленного факта сползания по наклонной плоскости трех породных блоков из гранодиоритов позволяет для каждого случая составить уравнение предельного равновесия согласно выражению (6).

Для первого породного блока

$$P_1 \sin \delta_1 = P_1 \cos \delta_1 \operatorname{tg} \rho'_1 + K'_1 S_1 + \sigma_p S_{отр}^1; \quad (7)$$

для второго

$$P_2 \sin \delta_2 = P_2 \cos \delta_2 \operatorname{tg} \rho'_2 + K'_2 S_2 + \sigma_p S_{отр}^2; \quad (8)$$

для третьего

$$P_3 \sin \delta_3 = P_3 \cos \delta_3 \operatorname{tg} \rho'_3 + K'_3 S_3 + \sigma_p S_{отр}^3. \quad (9)$$

Если породный контакт представлен практически одним разрывным нарушением с присутствием гидроксида железа, то можно принять, что $K'_1 \approx K'_2 \approx K'_3 \approx K'$ и $\rho'_1 \approx \rho'_2 \approx \rho'_3 \approx \rho'$, $\sigma_p \approx 0$. С учетом полученных геометрических параметров оползших породных блоков (табл. 3) и поверхностей скольжения формулы (7)–(9) примут следующий вид:

$$K'_1 = 3.839 - 5.188 \operatorname{tg} \rho'_1, \quad K'_2 = 3.273 - 3.635 \operatorname{tg} \rho'_2, \quad K'_3 = 3.155 - 3.442 \operatorname{tg} \rho'_3.$$

Для равноценных условий обрушенных блоков можно записать систему уравнений сначала для первого и второго обрушения, а затем и для второго и третьего.

Первая система уравнений:

$$\begin{cases} K' = 3.839 - 5.188 \operatorname{tg} \rho', \\ K' = 3.273 - 3.635 \operatorname{tg} \rho'; \end{cases} \quad (10)$$

вторая система уравнений:

$$\begin{cases} K' = 3.272 - 3.635 \operatorname{tg} \rho', \\ K' = 3.155 - 3.442 \operatorname{tg} \rho'. \end{cases} \quad (11)$$

Решая первую систему уравнения (10), получаем $K' = 0.02$ МПа и $\rho' = 20^\circ$, а решая вторую систему (11): $K' = 0.01$ МПа и $\rho' = 31^\circ$. Тогда усредненные значения сцепления и угла трения по разрывным нарушениям в гранодиоритах составят: $K' = 0.015$ МПа, $\rho' = 25.5^\circ$ и могут быть использованы при оценке устойчивости откосов уступов на проектном контуре южного борта карьера Бозымчак.

Значения сцепления и углов трения по контактам слоев и трещинам некоторых типов пород, согласно исследованиям многих авторов, обобщены и сведены в табл. 4 [2, 5, 13–16]. Видно, что в дальнейшем при анализе типовых расчетных схем по оценке устойчивости откосов можно принимать значения прочностных свойств контактов пород в следующих пределах: сцепление $K' = 0.01 - 0.10$ МПа, угол трения $\rho' = 10 - 30^\circ$ [8].

ТАБЛИЦА 4. Усредненные значения прочностных свойств по породным контактам

Тип породного контакта	Сцепление K' , МПа			Угол трения ρ' , град		
	Диапазон		Среднее	Диапазон		Среднее
	от	до		от	до	
Филлиты	—	—	—	9.0	25.0	17.0
Глина	0.02	03.0	0.16	8.0	27.0	17.5
Уголь	0.011	01.85	0.098	13.0	25.0	19.0
Сланцы	0.075		0.075	9.0	28.0	18.5
Аргиллиты	0.095	01.40	0.118	12.0	28.0	20.0
Диабаз	—	—		21.0	—	21.0
Уголь по глине	0.030	—	0.030	13.0	30.0	21.5
Известняки	—	—	—	16.0	27.0	21.5
Магнетиты	—	—	—	16.0	27.0	21.5
Вторичные кварциты	—	—	—	17.0	28.0	22.5
Кварцевые порфиры и гранодиоритпорфиры	—	—	—	17.0	28.0	22.5
Скарнированные породы	—	—	—	17.0	28.0	22.5
Сиениты	—	—	—	17.0	28.0	22.5
Диориты	0.40	07.0	0.55	17.0	28.0	22.5
Гранодиориты	0.50	—	0.50	17.0	28.0	22.5
Алевролиты	—	—	—	17.0	30.0	23.5
Серпентиниты	0.182	—	0.182	24.0	—	24.0
Брекчия	0.30	—	0.30	24.0	—	24.0
Уголь по диориту	0.011	0.024	0.018	23.0	27.0	25.0
Порфиры	—	—	—	20.0	31.0	25.5
Роговики	0.50	07.0	0.60	20.0	31.0	25.5
Джеспилиты	—	—	—	20.0	31.0	25.5
Песчаники	0.185	0.100	0.592	20.0	33.0	26.5
Опока	—	—	—	25.0	37.0	31.0
Порфирит выветренный	0.242	—	0.242	31.0	—	31.0
Мраморы	—	—	—	36.0	—	36.0
Перидотит	0.42	08.6	0.640	36.0	—	36.0

Приведенные значения прочностных свойств породных контактов могут быть использованы, во-первых, для сравнения, а во-вторых, для оценки устойчивости откосов в трещиноватых массивах.

ВЫВОДЫ

Разработана и апробирована методика проведения натурно-полевых испытаний горных пород на сдвиг для определения их прочностных свойств путем создания сдвиговой конструкции на базе стандартного гидравлического домкрата с электрической маслостанцией. Предложены схемы сдвига породных призм и аналитические формулы для вычисления сцепления и угла внутреннего трения пород.

Предложены оценки сцепления и угла трения породных (разрывных) контактов, основанные на лазерно-цифровой съемке обрушенных блоков, составлении для них систем уравнений предельного равновесия и их решении, апробированные в условиях карьера Бозымчак.

Приведены обобщенные данные исследований прочностных свойств горных пород и породных контактов на отдельных месторождениях Казахстана и Киргизии, которые использованы при оценке устойчивости откосов уступов и бортов карьеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М., 1965. — 378 с.
2. Попов И. И., Низаметдинов Ф. К., Окатов Р. П., Долгоносков В. Н. Природные и техногенные основы управления устойчивостью уступов и бортов карьеров. — Алматы: Гылым, 1997. — 216 с.
3. Виттке В. Механика скальных массивов. — М: Недра, 1990. — 439 с.
4. Bieniawski Z. Engineering classification of joined rock masses, Trans South Africa Inst. Civ. Eng., 1973, Vol. 15. — P. 335–344.
5. Низаметдинов Ф. К., Ожигин С. Г., Долгоносков В. Н. и др. Управление устойчивостью техногенных горных сооружений. — Караганда: Изд-во Каз.-Рос. ун-та, 2014. — 657 с.
6. Бабелло В. А. Исследование прочностных свойств пород Уртуйского бурого угольного разреза в натурных условиях // ГИАБ. — 2004. — № 10. — С. 203–206.
7. Бабелло В. А., Криворотов А. П., Федосеева Л. В. Результаты определения прочностных характеристик горных пород методом обрушения призм // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 1. — С. 98–103.
8. Ильницкая Е. Н., Тедер Р. Н., Ватолин Е. С и др. Свойства горных пород и методы их определения. — М.: 1969. — 392 с.
9. Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. Н. Полевые методы инженерно-геологических исследований. — М.: 1967. — 372 с.
10. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. — Л., 1972. — 312 с.
11. Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 20–28.
12. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Усольцева О. М., Кучай О. А. Применение решений обратных задач для оценки состояния и свойств геомеханических объектов различного масштабного уровня // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 33–43.
13. Попов И. И., Шпаков П. С., Поклад Г. Г. Устойчивость породных отвалов. — Алма-Ата, 1987. — 225 с.
14. Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. — М.: Горная книга, 2008. — 683 с.
15. Багдасарьян А. Г., Лукишов Б. Г., Родионов В. Н., Федянин А. С. Выявление признаков формирования структуры разрушения на бортах карьера Мурунтау // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 80–89.
16. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В. Прочность и деформируемость горных пород. — М., 1979. — 269 с.