

УДК 622.271.3

В.Н. Попов, О.Б. Сильченко, М.С. Парамонова

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С ГЛУБИНОЙ ЗАЛЕГАНИЯ

Приведены результаты исследований физико-механических свойств горных пород Сорского месторождения.

Ключевые слова: сцепление в массиве, угол внутреннего трения, плотность пород, коэффициент структурного ослабления, объемный вес, сцепление в куске, коэффициент запаса.

Свойства пород относятся к одним из основных характеристик при расчете устойчивости уступов и бортов карьера. Расчетными характеристиками являются сцепление в массиве (C_m), по контактам и трещинам пород, угол внутреннего трения (φ) и плотность пород (γ).

В 1962 году Уральским филиалом ВНИМИ была выполнена работа «Исследование устойчивости бортов карьера Сорского молибденового комбината». В результате двухгодичных исследований устойчивости бортов действующего карьера, глубина которого к тому времени была уже 150 м, были определены физико-механические свойства горных пород до глубины 500 м по данным испытаний кернового материала из скважин и даны рекомендации по углам наклона устойчивых бортов карьера. Были выделены три зоны по степени выветрелости пород.

В настоящее время известны три метода определения сдвиговой прочности по съемке оползней и обрушений, путем нагружения призм в массиве и по результатам лабораторных испытаний с последующим пересчетом с помощью коэффициента структурного ослабления.

Область применения первого метода ограничивается однородными массивами, когда получаемые данные могут быть распространены для аналогичных условий на других участках. При сложном структурно-тектоническом строении массива, состоящего из разнопрочных пород, этот метод, давая интегральные показатели, не характеризует наиболее слабые поверхности и отдельные типы пород. Кроме того, в скальных и полускальных породах искусственное создание оползневых явлений связано с определенной опасностью ведения горных работ.

Испытание пород по второму методу может быть проведено под действием одной или двух нагрузок. Метод был широко использован при определении прочности пород ряда месторождений. Трудоемкость работ при испытаниях пород в натуральных условиях существенно ограничивает масштабность применения метода.

Поэтому на данном этапе наиболее распространенным методом является третий, когда данные лабораторных испытаний образцов пересчитываются с учетом структурных ослаблений массива горных пород.

На основе результатов большого числа проведенных в различных условиях натуральных испытаний Г.Л. Фисенко

Таблица 1
**Значения коэффициента структурного ослабления
 для различных участков Сорского карьера**

Зона по глубине карьера	Группа пород	Среднее значение сцепления в куске, МПа	Коэффициент структурного ослабления по методу			
			Г.Л. Фи-сенко	Ю.И. Мартынова	С.И. Попова	Натурных испытаний
Верхняя	Сильновыветрелые	1,4	0,17	0,03	0,3	0,13
	Выветрелые	3,9	0,095	0,12	0,12	0,04
	Среднее по зоне	2,6	0,1325	0,075	0,21	0,085
Средняя	Маловыветрелые	18	0,03	0,07	0,2	0,012
	Невыветрелые трещиноватые	20	0,06	0,09	0,08	0,03
	Среднее по зоне	19	0,045	0,08	0,14	0,021
Нижняя	Невыветрелые средней трещиноватости	21	0,09	0,12	0,035	0,025
	Невыветрелые малой трещиноватости	23	0,136	0,15	0,2	-
	Невыветрелые монолитные	38	0,18	0,35	0,4	-
	Среднее по зоне	27,3	0,135	0,196	0,211	-

Таблица 2

Зоны	Глубина, м	Группы пород	Объемный вес γ , т/м ³	Сцепление в куске C_k , т/м ²	Угол внутреннего трения ϕ , град.	Коэффициент структурного ослабления	Сцепление в массиве, C_m т/м ²
Верхняя	0-50	Сильновыветрелые	2,38	143	36 30	0,154 0,0616	22 8,8
		Выветрелые	2,50	390	37 30	0,082 0,0328	32 12,8
		Средние	2,41	266	36,5 30	0,1018 0,0407	27 10,8
Средняя	50-250	Маловыветрелые	2,62	1800	36 30	0,0283 0,0113	51 20,4
		Невыветрелые, трещиноватые	2,68	2000	36,5 30	0,0335 0,0133	67 26,8
		Средние	2,65	1900	36,25 30	0,031 0,0124	59 23,6
Нижняя	250-500	Невыветрелые, средней трещиноватости	2,69	2100	37 30	0,031 0,0124	65 26
		Невыветрелые, малой трещиноватости	2,70	2300	36,5 30	0,0374 0,0150	86 34,4
		Невыветрелые, монолитные (условно)	2,72	3800	37,5 30	0,0321 0,0128	122 48,8
		Средние	2,703	2733	37 30	0,0333 0,0133	91 36,4

Таблица 3

Расчетные характеристики физико-механических свойств горных пород для определения параметров устойчивых бортов

Зоны	Глубина, м	Группы пород	Показатели с учетом коэффициента запаса $n_c=1,641$ и $n_{\square}=1,312$		
			$\gamma, \text{т/м}^3$	$C_{\text{ср}}, \text{т/м}^2$	$\phi, \text{град}$
Верхняя	0-50	Сильновыветрелые	2,38	13,4	29,66
		Выветрелые	2,50	19,5	30,55
		Средние	2,41	16,45	30,10
Средняя	50-250	Маловыветрелые	2,62	31,06	29,70
		Невыветрелые, трещиноватые	2,68	40,08	29,95
		Средние	2,65	35,57	29,63
Нижняя	250-500	Невыветрелые, средней трещиноватости	2,69	39,55	30,55
		Невыветрелые, малой трещиноватости	2,70	52,35	29,92
		Невыветрелые, монолитные (условно)	2,72	74,3	30,75
		Средние	2,703	55,4	30,4

Таблица 4

Расчетные показатели физико-механических свойств пород для расчета параметров устойчивых уступов

Зоны	Глубина, м	Группы пород	Коэффициент запаса				$\gamma, \text{т/м}^3$
			$n=1,0$		$n=2,0$		
			$C_m, \text{т/м}^2$	$\phi, \text{град.}$	$C_m, \text{т/м}^2$	$\phi, \text{град.}$	
Верхняя	0-50	Сильновыветрелые	22	36	11	20	2,38
			8,8	30	4,4	16	
		Выветрелые	32	37	16	20,5	2,50
12,8	30	6,4	16				
Средняя	50-250	Средние	27	36,5	13,5	20,25	2,44
			10,8	30	5,4	16	
		Маловыветрелые	51	36	25,5	20	2,62
20,4	30	10,2	16				
Средняя	50-250	Невыветрелые, трещиноватые	67	36,5	33,5	20,25	2,68
			26,8	30	13,4	16	
		Средние	59	36,25	29,5	20,15	2,65
23,6	30	11,8	16				
Нижняя	250-500	Невыветрелые, средней трещиноватости	65	37	32,5	20,5	2,69
			26	30	13	16	
		Невыветрелые, малой трещиноватости	86	36,5	43	20,25	2,70
			34,4	30	17,2	16	
Невыветрелые, монолитные (условно)	122	37,5	61	21	2,72		
	48,8	30	24,4	16			
Средние	91	37	45,5	20,5	2,708		
	36,4	30	18,2	16			
По сплошным трещинам		Контакты трещин заполнены глиной	-	-	3,5	13	-
		Контакты трещин незаполненные глиной	-	-	1,0	25	-

предложена эмпирическая формула для определения коэффициента структурного ослабления, которая нашла распространение в практике инженерных расчетов, так как проста в использовании и дает приемлемые результаты.

Обобщив результаты лабораторных и промышленных исследований, Ю.И. Туринцев разработал методику определения сцепления в массиве, которая учитывает угол между направлением среза и направлением трещиноватости, расстояние от точки массива до места проведения взрывных работ, зону максимального нарушения прочности в прибортовом массиве, направление ведения взрывных работ, что является существенным вкладом в решение вопроса комплексного учета геологических и технологических факторов при определении свойств в массиве.

Следует отметить, что разработанные методы дают результаты, отличающиеся между собой в 2-4 раза (табл. 1).

Как видно из таблицы, наиболее близки к данным натурных испытаний результаты, полученные по методу Г.Л. Фисенко.

На основе анализа погрешностей возникающих при определении физико-механических свойств пород [1] были установлены показатели физико-механических свойств горных пород, приведенные в табл. 2, а для определения углов наклона бортов карьера в табл. 3.

Исходя из точности определения физико-механических свойств горных пород нами установлено, что коэффициенты запаса для сцепления и угла внутреннего трения различны. С учетом анализа точности было определено, что для расчета устойчивости бортов коэффициент запаса для сцепления составлял

1,641, а для угла внутреннего трения 1,312. Это нашло отражение в табл. 3.

Исследованиями установлено и практикой проверено, что при расчете устойчивых параметров приконтурных уступов следует коэффициент запаса брать равным 2 и более [1,2]. Поэтому при оценке устойчивости нерабочих уступов южного борта карьера были рассчитаны физико-механические свойства пород с коэффициентом запаса равным 2.

На численные значения физико-механических свойств пород существенное значение оказывает направление и характер трещиноватости. Поэтому по направлениям, совпадающим с элементами залегания трещин принято сцепление в 2,5 раза меньше относительно благоприятного расположения трещин (табл. 4).

По всем профилям на участках формирования временно нерабочих бортов были отобраны образцы пород и испытаны в соответствии с ГОСТом 21153.4-75.

Результаты определения физико-механических свойств 1180 образцов пород приведены в табл. 5 и 6.

Из таблиц 5 и 6 следует, что плотность, сцепление и угол внутреннего трения изменяются с глубиной залегания пород согласно ранее установленным нами закономерностям, которые имеют вид уравнений:

$$\gamma = 2,43 + 0,0363H^{0,32}$$

$$c = 0,3 + 1,1H^{0,995}$$

$$\varphi = 36 + 0,0025H$$

где γ – плотность, т/м^3 ; c – сцепление в куске, $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$; φ – угол внутреннего трения, град.; H – глубина, м.

Корреляционное отношение для плотности и сцепления составляет соответственно 0,88-0,87. Для угла внутреннего трения коэффициент корреляции 0,69.

112 Таблица 5

№ профиля	Номер горизонта и мешка	$\sigma_{рас.}$, МПа	Коэф. вариации, %	$\sigma_{сж.}$, МПа	Коэф. вариации, %	Сцепление c_0 , МПа	Угол внутреннего трения, φ_0°	Условное сцепление c_k , МПа	Угол внутреннего трения φ°
1	Гор. 640 Меш. 1	11,5±1,99	17,3	97±24,3	25,0	17	45	29	35
	Гор. 690 Меш. 62	14,0±2,91	20,8	132±8,58	6,5	23	38	35	37
	Гор. 710 Меш. 63	11,6±1,93	16,6	111±7,05	6,4	20	50	32	36
	Гор. 720 Меш. 56	14,4±2,9	20,2	109±14,4	13,2	23	36	26	37
	Гор. 770 Меш. 31	1,46±0,204	14,0	17,7±2,24	12,6	3	47	5	38
	Гор. 770 Меш. 41	17,7±3,27	18,5	181±16,8	9,3	30	46	53	38
2	Гор. 690 Меш. 53	21,9±2,84	13	197±21,5	11	40	51	50	31
	Гор. 690 Меш. 60	16,7±3,59	21	168±11,4	7	30	54	43	34
	Гор. 710 Меш. 54	13,9±1,59	11	142±16,2	12	26	49	37	38
	Гор. 750 Меш. 64	11±2,2	20	131±12,6	9,6	22	55	36	39
3	Гор. 550 Меш. 15	18,1±3,29	18	171±31,2	18	31	55	48	35
	Гор. 550 Меш. 17	14,3±2,52	18	123±26,3	21	24	48	39	34
	Гор. 580 Меш. 13	16,3±2,88	18	140±16,72	12	27,5	48	40	35
	Гор. 580 Меш. 25	20±3,07	15	190±25,1	13	35	50	50	35
	Гор. 640 Меш. 3	12,3±1,68	14	131±14,89	11	23	49	37	37

	Гор. 640 Меш. 30	12,5±2,45	20	113±9	8	22	51	30	36
	Гор. 670 Меш. 40	11,6±1,54	13	131±12,2	9,3	22	52	36	38
	Гор. 670 Меш. 50	7,14±1,23	14	73,3±10	14,6	13,5	51	20	29
	Гор. 690 Меш. 55	11,8±2,31	20	139±20,6	15	23	44	36	39
	Гор. 690 Меш. 57	11,5±1,26	11	111±10,7	9,6	21	52	31	38
	Гор. 690 Меш. 59	14,7±4,63	32	157±30,2	19	26	54	43	36
4	Гор.590-1 Меш. 14	14,7±4,48	30	140±22,7	16	27	46	50	34
	Гор.590-2 Меш. 22	13,0±1,31	10	128±12,8	10	24	54	36	36
	Гор. 600-1 Меш. 9	15,7±2,63	18	160±20,1	13	29	49	43	37
	Гор. 600-2 Меш. 10	11,5±2,56	22	115±7,70	6,7	21	52	31	38
	Гор. 620-1 Меш. 29	14,2±1,16	8,2	141±14,3	10	26	52	38	38
	Гор. 620-2 Меш. 42	14,2±2,16	15	139±14,5	10	25	50	38	34
	Гор. 630-1 Меш. 24	22,6±3,93	17	178±34,7	19	26	48	50	35
	Гор. 630-2 Меш.43	11,3±2,64	23	120±23,6	20	22	52	36	37
	Гор. 630-3 Меш. 52	10,8±1,8	17	112±13,0	12	20	52	36	37
	Гор. 640-1 Меш. 32	14,3±4,52	32	130±10,3	7,9	25	51	31	35
5	Гор. 550 Меш. 23	8,997±1,5	16,9	66,70±12,0	18,1	13	48	20	33

	Гор. 550 Меш. 65	12,86±2,3	17,7	117,77±17,3	14,7	21	51	31	36
	Гор. 580 Меш. 2	14,88±4,5	30,5	121,59±18,0	14,8	23	51	37	34
	Гор. 580 Меш. 38	17,66±6,3	35,5	90,41±17,4	19,3	21	40	26	28
	Гор. 590 Меш. 21	12,10±2,5	20,8	102,88±29,6	28,8	20	48	29	35
	Гор. 590 Меш. 39	16,26±4,0	24,6	151,98±42,4	27,9	29	52	42	37
	Гор. 600 Меш. 66	12,95±6,5	50,0	93,74±33,7	36,0	20	48	28	33
	Гор. 600 Меш. 67	12,51±3,4	27,55	88,45±24,8	28,0	19	48	27	31
	Гор. 610 Меш. 19	12,32±2,2	17,9	98,99±34,3	34,7	19	49	27	33
	Гор. 610 Меш. 51	13,9±3,1	22,4	123,5±42,8	34,6	24	53	34	35
	Гор. 640 Меш. 4	16,29±2,5	15,3	112,63±30,9	27,4	20	47	22	35
	Гор. 970 Меш. 44	12,93±3,2	25,0	117,92±33,8	28,7	22	43	31	36
	Гор. 670 Меш. 46	11,34±3,3	28,99	106,49±36,0	33,8	19	54	28,5	36
6	Гор. 550 Меш. 35	11,11±4,6	41,3	112,23±22,5	20,0	20	52	22	36
	Гор. 550 Меш. 49	9,30±2,7	29,3	93,41±37,2	39,8	17	54	26	36
	Гор. 570 Меш. 34	12,55±2,6	21,7	112,84±28,5	25,3	21	51	30	33

Гор. 570 Меш. 48	8,68±1,9	21,9	125,39±40,4	32,2	20	54	38	38
Гор. 590 Меш. 16	10,57±3,8	36,2	163,66±38,0	23,2	25	54	51	32
Гор. 590 Меш. 26	10,68±3,3	30,7	152,92±28,4	18,6	20	57	42	41
Гор. 590 Меш. 28	11,94±3,5	29,6	92,55±25,6	27,7	18	54	25	33
Гор. 610 Меш. 8	16,45±2,4	14,4	171,22±43,8	25,6	30	52	46	38
Гор. 610 Меш. 27	17,53±2,1	11,8	114,22±33,7	29,6	26	49	32	31
Гор. 610 Меш. 36	9,02±1,8	19,7	53,77±11,4	21,3	11	43	17	28
Гор. 620 Меш. 68	15,53±2,8	18,6	146,70±30,7	20,9	27	50	37	38
Гор. 640 Меш. 11	13,53±4,9	36,8	110,35±31,0	28,1	22	50	30	36
Гор. 640 Меш. 37	8,85±2,9	33,7	61,63±12,2	19,9	14	49	19	27
Гор. 350 Меш. 12	12,27±3,5	28,9	108,28±20,4	18,8	20	51	31	35
Гор. 650 Меш. 33	9,38±4,0	42,7	117,85±38,8	32,9	17,5	56	35	40

Таблица 6
Физические свойства пород

№ п/п	№ профи-ля	Высотная отметка горизонта	Номер мешка	Плотность кг/м ³		Влажность, %
				в естественном состоянии	в сухом состоянии	
1	5	550	23	2600	2523	3,05
2	5	550	65	2547	2516	1,23
3	5	580	2	2634	2589	1,74
4	5	580	38	2761	2676	3,06
5	5	590	21	2546	2513	1,30
6	5	590	39	2628	2616	0,46
7	5	600	66	2562	2546	0,63
8	5	600	67	2658	2624	1,30
9	5	610	19	2562	2497	2,60
10	5	610	51	2755	2745	0,36
11	5	640	4	2718	2630	3,35
12	5	670	44	2617	2557	2,35
13	5	670	46	2567	2538	1,14
14	6	550	35	2856	2782	2,70
15	6	550	49	2634	2577	2,21
16	6	570	34	2517	2476	1,70
17	6	570	48	2553	2539	0,55
18	6	590	16	2509	2499	0,40
19	6	590	26	2545	2524	0,83
20	6	590	28	2806	2782	0,86
21	6	610	8	2581	2562	0,74
22	6	610	27	2804	2764	1,45
23	6	610	36	2574	2514	2,39
24	6	620	68	2757	2739	0,66
25	6	640	11	2614	2564	1,95
26	6	640	37	2673	2620	2,0
27	6	650	12	2763	2733	1,1
28	6	650	33	2585	2572	0,40

Таблица 7
Физико-механические свойства пород в массиве уступов

Номер профиля	Горизонты, м	Плотность пород, т/м ³	Сцепление в куске, МПа	Угол внутреннего трения, φ, град	Коэффициент структурного ослабления	Сцепление в массиве, С _м ,
1	770-570	2,64	30	18	0,012	0,36
2	770-560	2,61	41,5	18	0,012	0,498
3	690-550	2,63	37,3	18	0,012	0,45
4	640-590	2,66	38,9	18	0,012	0,466
5	670-550	2,63	31,8	18	0,012	0,382
6	650-550	2,65	32,06	18	0,012	0,384
По сплошным трещинам [9]		Контакты трещин заполненные глиной трения		16	-	0,100
		Контакты трещин не заполненные глиной трения		18	-	0,01

Это говорит о надежности связей. Если учесть, что глубина отсчитывается от максимальной отметки рельефа местности расположения карьера, то значения показателей физико-механических свойств пород относятся, согласно принятой классификации, к средней и нижней зонам. Более того определенные сейчас прочностные свойства в средней и нижней зонах оказались выше, чем было определено ранее (см. табл. 2 и 5).

С учетом отмеченной трещиноватости на карьере коэффициент структурного ослабления равен 0,012, что соответствует табл. 2

для средней и нижней зоны. Тогда с учетом отмеченных выше условий, количественные характеристики пород в массиве по принятым профилям будут иметь значения, приведенные в табл. 7. Принятый угол внутреннего трения 18° по контактам слоев при ровной гладкой поверхности и отсутствии заполнителя соответствует группе пород гранодиоритам, гранодиорит-порфирирам, сиенитам и диоритам [1]. При заполнителе трещин глиной трения, значения сцепления и угла внутреннего трения приняты согласно данным ВНИМИ [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров.* – Л.: ВНИМИ, 1972, 165 с.
2. *Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии.* – М.: Минцветмет СССР, Унипромедь, 1989г., 128 с.
3. *Попов В.Н., Ильин А.И. Устойчивость бортов карьеров.* М.: МГИ, 1991. - 109 с.
4. *Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов.* М., Недра, 1965.
5. *Попов В.Н., Несмеянов Б.В., Попова О.В. Конструкции нерабочих бортов карьеров.* М., Изд-во НИИ – Природа, 1999-148 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Попов В.Н. – декан, зав. кафедрой, профессор, доктор технических наук кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Московского государственного горного университета, mdg@msmu.ru

Сильченко О.Б. – профессор, доктор технических наук кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Московского государственного горного университета, mdg@msmu.ru

Парамонова М.С. – аспирант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Московского государственного горного университета, paramonovagg104@mail.ru
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

