

УДК 622.32.002.3

*В.К. Багазеев, Н.Г. Валиев, С.В. Гринченко*

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В ШТАБЕЛЕ КУЧНОГО  
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**

Семинар № 4

**Ф**изико-механические свойства минерального сырья в штабеле кучного выщелачивания (КВ) определяют основные технологические параметры и показатели выщелачивания: высоту и угол штабеля, скорость фильтрации раствора, время выщелачивания.

Основные исходные данные, необходимые для проектирования КВ, принимают на основании результатов технологического исследования, которое проводят в лабораторном и крупном лабораторном масштабах, а также на опытно-промышленной установке. Специальных исследований для оценки устойчивости откосов не проводится, обычно определяется прочность материала после окомкования - прочность окатышей. Согласно результатам исследований [1]:

- частицы руды фракции -10 +3 мм практически не окатываются, окомкование происходит у частиц крупностью до 1 мм, предел прочности гранул на раздавливание 0,36-0,38 МПа;

- при выщелачивании происходит разрушение гранул частично или полностью, прочность неразрушенных гранул снижается до 0-0,18 МПа.

Значительно меньшие значения прочности окатышей получены при окомковании руд месторождения Куранах (Россия) - 0,069-0,072 МПа [2].

О низкой прочности окатышей свидетельствует также их низкая водоус-

тойчивость и значительная усадка штабелей КВ.

В этой связи сделаем следующий вывод - для оценки устойчивости откосов штабеля наиболее соответствующими являются прочностные характеристики сырья до окомкования, т.е. прочностные характеристики дробленой руды. Технологическими испытаниями до настоящего времени предусматривается только оценка прочности на раздавливание по отдельным фракциям - сопротивление дробленой горнорудной массы сдвигу не определяется. Необходимо специальное определение физико-механических характеристик (сцепления -  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ ) для расчета устойчивости штабеля рудной массы.

Измерение прочностных характеристик пород нарушенной структуры должно производиться в условиях максимально соответствующих условиям сдвига откосов при кучном выщелачивании. Это требование удовлетворяется при соблюдении соответствия по критерию плотности - влажности. В зависимости от влажности и плотности пород под нагрузкой, при определении прочностных характеристик выделяют три схемы испытаний:

1. Консолидированно-недренированные (ускоренные) испытания, когда образцам породы предварительно задается определенная плотность - влаж-

ность, а затем они доводятся до сдвига при неизменной пористости. Эта схема отвечает условиям, при которых свойства пород и интенсивность нагружения не обеспечивают достаточно быстрого дренажа.

2. Схема консолидированно-дренированных (медленных) испытаний, когда происходит свободное изменение пористости и влажности породы в соответствии с нагрузкой. Эта схема отвечает условиям, при которых свойства пород и интенсивность нагружения обеспечивают полную консолидацию слоя, что характерно, например, для гидроотвалов из хорошо фильтрующих пород с малой скоростью или при наличии в массиве отвалов хорошо фильтрующих прослоев пород.

3. Схема неконсолидированно-недренированных (быстрых) испытаний, когда влажность породы остается неизменной и поровое давление воды имеет максимальную величину. Эта схема применяется для определения сопротивления сдвигу глинистых пород при неблагоприятных условиях дренирования и при высокой интенсивности нагружения.

Применительно к условиям выщелачивания в штатном режиме соответствующей будет схема консолидированно-дренированных испытаний (медленный сдвиг). В аварийных ситуациях при полном влагонасыщении, когда дренажный слой не успевает отвести воду, соответствующей будет схема недренированных по указанной схеме) выполняющийся на приборах трехосного сжатия (в стабилометрах), однако, их можно выполнить и на приборах одноплоскостного среза при разной скорости приложения сдвигающих усилий. Методика испытаний достаточно полно отражена в специальной литературе [3].

Однозначное определение свойств в лаборатории оправданно для сравнительных исследований и непосредственно в забое в процессе добычи для автоматического регулирования режима работы оборудования [4]. В других случаях целесообразно использовать корреляционные зависимости. По данным исследованиям [5] примерно 75 % показателей может быть вычислено по результатам простейших определений физических свойств породы, особенно при наличии гранулометрического состава исследуемого материала.

При технологическом исследовании проб для КВ обязательно определяется гранулометрический состав исходного сырья.

Разработаны научно-обоснованные рекомендации по определению прочностных  $\phi$  и  $C$  и деформативных (модуля общей деформации -  $E_0$ ) показателей крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями по их физическим характеристикам [6]. Рекомендации рассчитаны на содержание в грунтах фракции +2 мм 20 % и более. Для грунтов, в которых содержание фракции +2 мм меньше, значения  $\phi$  и  $C$  рекомендуется определять по данным инженерно-геологических исследований, а при их отсутствии принимать по заполнителю – глинам и суглинкам, например по СНиП [7]. Исходные данные для расчета: гранулометрический состав материала, естественная влажность, число пластичности глинистого заполнителя. В качестве обобщенного показателя физических свойств принимается коэффициент  $M_\tau$ , названный в методике [6] физическим эквивалентом грунта:

$$M_\phi = \frac{D}{R_s} I_p (1 + I_s), \quad (1)$$

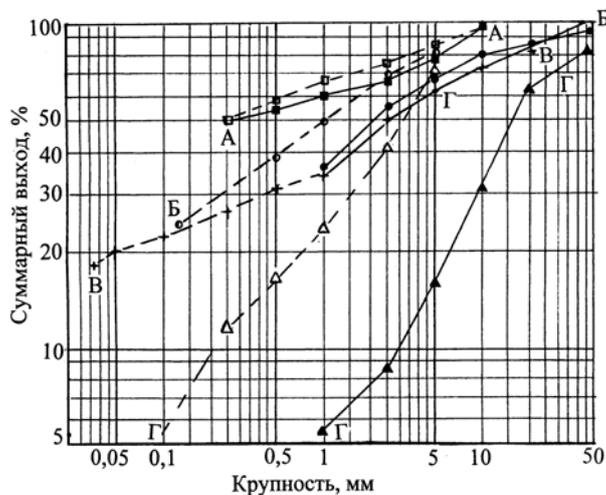


Рис. 1. Гранулометрический состав горнорудного сырья при КВ: А, Б, В, Г — месторождения; карьерная руда; — — руда после дробления.

где  $D_2$  — суммарный выход частиц менее 2 мм, %;  $R_2$  — суммарный выход частиц крупнее 2 мм, %;  $I_p$  — число пластичности, доли ед.

Установлена экспериментальная зависимость между коэффициентом  $M_\tau$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ , между  $M_\tau$  и удельным сцеплением  $C$  для условий консолидированного среза, а также между  $M_\tau$  и модулем деформации  $E_0$ :

$$\varphi = k_1 \cdot k_\varphi \cdot 46 \cdot \exp(1,18M_\tau) = \text{град}; \quad (2)$$

$$= k_1 \cdot k_\varphi \cdot 46(0,3)^{M_\tau},$$

$$C = \frac{k_2 \cdot k_p \cdot 79 \cdot M_\tau^{0,32}}{(1 + I_p)^{3,62}}, \text{ кПа}; \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{1}{0,07 \cdot M_\tau + 0,017}, \text{ кПа} \quad (4)$$

где  $k_1$  — коэффициент окатанности крупного материала, для грунтов с остроугольными обломками  $k_1 = 1,0$ ;  $k_\varphi$  — коэффициент, учитывающий прочность крупнообломочного материала, для прочных пород  $k_\varphi = 1,0$ ;  $k_2$  — коэффициент, учитывающий остроугольность материала, для остроугольных камней  $k_2 = 1,0$ ;  $k_p$  — коэффициент соответствия плотности ма-

териала нормативным значениям,  $k_p = 1,0$ .

Для условий неконсолидированного среза

$$\varphi = k_1 \cdot k_\varphi \cdot 37 \cdot (0,234)^{M_\tau}, \quad (5)$$

$$C = \frac{k_2 \cdot k_p \cdot 87 \cdot M^{0,51}}{(1 + I_p)^{3,85}}. \quad (6)$$

Таким образом, на основании гранулометрического состава и основных физических характеристик горнорудной массы, можно рассчитать физико-механические характеристики: угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль общей деформации, которые необходимы для оценки устойчивости штабеля КВ. Задача нашего исследования сводится:

- к оценке соответствия дробленой ГРМ для КВ крупнообломочным грунтам с глинистым заполнителем, т.е. в ГРМ содержание фракции +2 мм должно быть более 20 %;

- к оценке соответствия расчетных (по гранулометрическому составу и физическим характеристикам) по формулам (1 ÷ 6) и измеренных показателей прочности в лабораторных условиях. На рис. 1 приводится гранулометрический состав ГРМ при выщелачивании на месторождениях: А — Среднего Урала; Б — Южного Урала; В — Читинской области; Г — Красноярского края.

На графиках видно, что состав сырья после дробления содержит 25 - 65 % фракции крупнее 2 мм и не менее 3 % глинистых фракций, т.е. дробленая

Таблица 1  
**Расчет прочностных характеристик по гранулометрическому составу**

Номер пробы	Суммарный выход частиц крупностью 2 мм, %		Эквивалент грунта, $M\tau$	Удельное сцепление $C_p$ , кПа	Угол внутреннего трения, $\varphi_p$ , град
	проход $D_2$	остаток $R_2$			
1	58	42	0,116	31,0	40
2	74,4	35,6	0,176	35,2	37,2
3	87,2	22,8	0,32	43,0	31,3

Таблица 2  
**Сравнение показателей удельного сцепления**

Номер пробы	Измеренные		Расчетные	
	$C_v$ , МПа	$\sigma_{св}$ , МПа	$C_p$ , МПа	$\sigma_{св}$ , МПа
1	0,035	0,0053	0,031	0,009
2	0,04	0,0081	0,035	0,009
3	0,045	0,0049	0,043	0,009

Таблица 3  
**Сравнение значений угла внутреннего трения**

Номер пробы	Угол внутреннего трения, град		Отклонение	
	измеренный	расчетный	абсолютное, град	относительное, %
1	37	40	3	8,0
2	35	37,2	2,2	6,3
3	42	31,3	3,7	10,6

ГРМ соответствует условиям аналитического определения прочностных характеристик. Исходя из общепринятой классификации грунтов [7] глинистый материал ГРМ относится к супесям твердой консистенции, характеризующихся значениями  $I_p = 0,01 - 0,07$ ,  $0 < I_L \leq 0,25$ . Для расчетов принимаем значения:  $I_p = 0,07$ ,  $I_L = 0,25$  при которых величина  $\varphi$ ,  $C$  будет минимальной, тогда физический эквивалент грунта

$$M_r = 0,07 \cdot 1,12 \frac{D_r}{R_s} = 0,084 \frac{D_r}{R_s}, \quad (7)$$

а прочностные характеристики для оценки устойчивости в штатном режиме выщелачивания

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 46(0,3)^{M_r}, C = 61,8M_r^{0,32}, \text{кПа} \\ &\text{в аварийном} \\ \varphi_B &= 37(0,234)^{M_r}, \\ C_B &= 26M_r^{0,51}, \text{кПа.} \end{aligned} \right\} (8)$$

Физико-механические свойства определялись для трех проб (№1 - месторождение А; №2, №3 – месторождение Б). Испытания на сдвиг проводились в лабораторных условиях на срезном приборе ВСВ-25, модуль общей деформации по результатам компрессионных испытаний на приборе ПЛЛ-9. Определение плотности пикнометрическим методом, насыпной плотности – методом долива воды, определение влажности и пластичности – весовым методом. Ре-

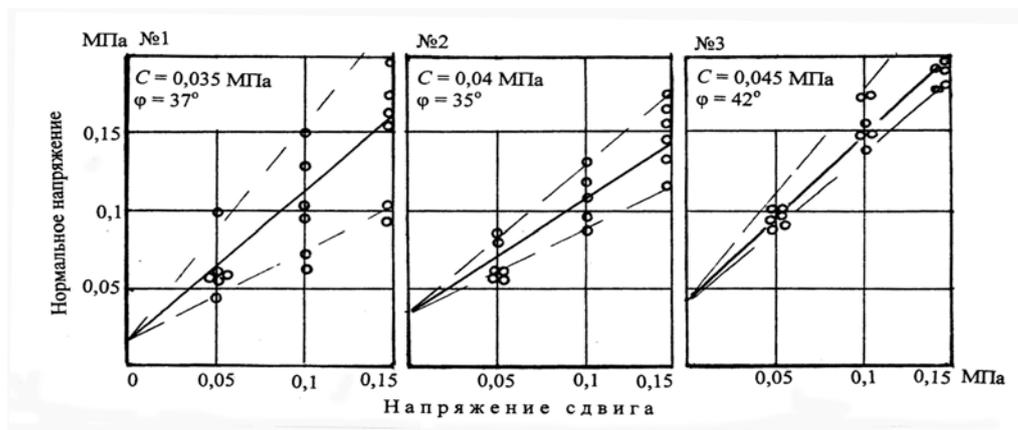


Рис. 2. График зависимости сопротивления горной массы сдвигу

зультаты измерений приводятся на рис. 2, результаты расчета по формулам (7, 8) в табл. 1, сопоставление измеренных и расчетных значений в табл. 2, 3.

Величина относительных отклонений не превышает 10,6 %.

Таким образом, для оценки устойчивости откосов штабеля КВ в каче-

стве исходных значений удельного сцепления и угла внутреннего трения можно принять значения, рассчитанные по гранулометрическому составу и физическим характеристикам отсыпаемого в штабель материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучное выщелачивание благородных металлов / Под ред. М. И. Фазлуллина. – М.: Изд. Академии горных наук, 2001. – 647 с.
2. Дружина Г.Я., Строганов Г.А., Зырянов М.Н. Кучное выщелачивание золота из предварительно окомкованных руд // Цветные металлы, 1997. - № 9. – С. 17-19.
3. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.
4. Ржевский В.В. Физико-технические параметры горных пород. – М.: Наука, 1975. – 212 с.
5. Грунтоведение / Под ред. Сергеева Е. М. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1973. – 388 с.
6. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем с крупнообломочными включениями / ДальНИИС. – М.: Стройиздат, 1989. – 24 с.
7. СНиП-II-15-74. Нормы проектирования, основания зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1975. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Багазеев В.К. – доктор технических наук, профессор,  
 Валиев Н.Г. – доктор технических наук, профессор,  
 Гринченко С.В. – инженер,  
 Уральский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007».  
 Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.