

УДК 621.867.72

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНОЙ СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ В ВОДЕ ЗЕРЕН СЕРПЕНТИНИТОВЫХ РУД ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПУНТА ГОРДА

М.СВАРЕС, В.ЛАБРАДОР

Серпентинитовые породы образуют широкий пояс, который прослеживается по северной части провинции Ольгина на востоке Кубы. Они залегают совместно с никелесодержащими латеритовыми рудами.

Дождевая вода, которая содержит CO_2 выщелачивает из серпентинитов Mg , Si . Железо тоже принимает участие в растворе, но очень быстро окисляется и осаждается. Конечный латеритовый продукт почти не содержит Mg и очень мало Si , хотя они составляют около 75 % первичных пород. Такие мало растворимые элементы как Al , Cr , Fe , Co и Ni превращаются в статочные концентраты.

Идеальный стратиграфический профиль этих месторождений макроскопически выглядит так: внизу расположены серпентинизированные гасбургиты с присутствием карманов в вертикальном направлении. Над серпентинитами обнажаются сильно десинтегрированные серпентиниты (мягкие серпентиниты) с переменной мощностью серо-зеленого, желто-зеленого или желто-пестрого цвета. Все эти слои содержат обычно никель. Над слоями расположены мягкие глинистые латериты красного или темного цвета. Они характеризуются меньшим содержанием Ni , Mg и SiO_2 и большим содержанием Fe , Co и Al . Железо, содержащее латериты, выходит на поверхность. Латериты красного и темно-фиолетового цвета имеют большое количество содержаний железных конкреций и малое содержание Ni , Mg , SiO_2 .

Типичная зона месторождения Пунта Горда имеет верхний слой руды мощностью в среднем 10 м, содержащий 50-53 % Fe , нижний слой мощностью 6 м содержит 46 % Fe . Далее идут мягкие серпентиниты, переходная зона между железными латеритами и скальной породой, которая содержит 25 % Fe . Средняя мощность вскрышных пород составляет 1,8 м (табл.1).

Для изучения гранулометрического состава руд была отобрана проба мягкой серпентинитовой руды массой 118 кг. Материал был измельчен и просеян через сита с модулем $\sqrt{2}$. Классы крупности: -12,5+6,3; -6,3+3,15; -3,15+2,5; -2,5+1,25; -1,25+0,63; -0,63+0.

Выход материала каждого класса определен по известной методике. Результаты приведены в табл.2 и на рис.1. Из рис.1 видно, что распределение объемов для каждого размера частиц не является равномерным, существует заметное различие между выходом крупных зерен и мелкими зернами.

Соединение	Содержание, %		
	Промышленные никелевые серпентиниты	Промышленные никелевые латериты	Железистые латериты (в скрине)
SiO_2	31,20-32,10	10,45	1,08
Al_2O_3	13,33-13,43	13,95	14,0
Cr_2O_3	0,17-0,28	1,96	3,16
Fe_2O_3	10,99-9,89	51,30	69,50
FeO	2,89-2,54	-	-
MnO	0,15-0,21	0,65	0,25
MgO	23,86-20,74	2,86	0,25
CaO	0,20-0,65	0,20	-
TiO_2	-	0,07	0,10
K_2O	-	Следы	-
Na_2O	-	Следы	-
SO_3	-	0,10	-
H_2O (320-1050 °C)	8,85-9,66	10,0	-
H_2O (120-320 °C)	1,64-1,62	0,40	-
H_2O (110 °C)	3,91-6,78	6,44	-

Таблица 2

Результаты ситового анализа пробы

Классы, мм	Выход отдельных классов		Суммарный выход по плюсу (суммарные остатки на ситах), %	Суммарный выход по минусу (суммарный просев), %
	по массе, кг	процентный, %		
12,5-6,3	48,0	40,63	40,63	100
6,3-3,15	33,33	28,21	68,84	59,37
3,15-2,5	4,92	4,16	73,0	31,16
2,5-1,25	8,0	6,78	79,78	27,0
1,25-0,63	9,75	8,25	88,03	20,22
0,63-0	14,15	11,97	100	11,97

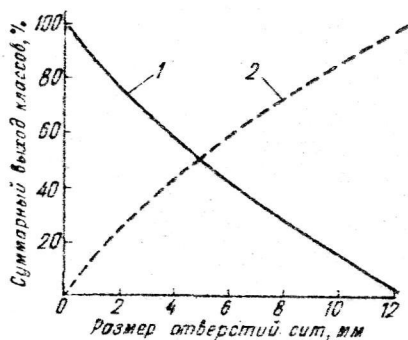


Рис. 1. Ситовая характеристика: 1 - по плюсу; 2 - по минусу

Плотность мягкой серпентинитовой руды по пяти опытам составила $2,2 \text{ т/м}^3$. Для экспериментального определения конечной скорости падения в воде зерен серпентинита была измельчена и классифицирована при помощи сита проба породы на следующие классы: $-12,5+10,0$; $-10,0+8,0$; $-8,0+6,35$; $-6,35+5,0$; $-5,0+4,76$; $-4,76+3,15$; $-3,15+2,5$; $-2,0+2,0$; $-1,25+1,0$; $-0,63+0,5 \text{ мм}$. Из каждого класса выбрали по 15 зерен. Опыты проводили в стеклянной трубе длиной 100 см, поставленной вертикально. По каждому классу проводили 15 опытов. Результаты приведены ниже:

Крупность, мм	Среднее время падения, с	Конечная скорость падения, м/с
$-12,5+10,0$	2,49	0,321
$-10,0+8,0$	2,75	0,290
$-8,0+6,35$	3,17	0,252
$-6,35+5,0$	3,53	0,226
$-5,0+4,76$	4,06	0,197
$-4,76+3,15$	4,49	0,178
$-3,15+2,5$	5,55	0,144
$-2,5+2,0$	5,88	0,136
$-1,25+1,0$	8,0	0,100
$-0,63+0,5$	12,12	0,068

Для анализа и теоретического обобщения экспериментальных результатов были использованы различные критерии.

При выводе формулы конечной скорости падения Риттингер учитывал только динамическое сопротивление среды, поэтому формула применима при турбулентном режиме движения относительно крупных шарообразных зерен:

$$V_0 = \sqrt{2,67 g d \left(\frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \right)},$$

где ρ_T и ρ_0 - соответственно плотность зерна и среды; d - диаметр зерна, м.

Видно, что величина конечной скорости падения зависит от диаметра падающего зерна и его плотности. Обозначая $\sqrt{2,67 g} = k$, получим

$$V_0 = k \sqrt{d \left(\frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \right)}.$$

Коэффициент k зависит от формы и плотности зерен; для шара при $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $k = 5,12$. Для воды при $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, конечная скорость падения шара по Риттингеру

$$V_0 = 0,16 \sqrt{d(\rho_T - \rho_0)}.$$

Формула Риттингера дает хорошую совпадаемость результатов с экспериментальными данными для зерен размером от 0,8 мм и выше.

При определении конечной скорости падения относительно малых по размеру частиц Стокс пренебрег динамическим сопротивлением среды и учел лишь силы внутреннего трения (вязкостное сопротивление):

$$V_0 = 0,545 d^2 \frac{(\rho_T - \rho_0)}{\mu_0},$$

где μ_0 — коэффициент вязкости жидкости.

Из формулы Стокса следует, что конечная скорость падения шарообразного зерна в случае учета только вязкостного сопротивления прямо пропорциональна квадрату его диаметра и разности плотности зерна и среды и обратно пропорциональна коэффициенту вязкости среды. Она применима только для относительно мелких частиц размером от 0,012 до 0,12 мм.

Конечная скорость падения зерен крупностью от 0,12 до 0,8–1,0 мм не подчиняется законам Риттингера и Стокса. Для указанного диапазона крупности Аллен предложил следующую эмпирическую формулу для воды при $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$V_0 = \frac{0,1146 \sqrt[3]{(\rho_T - \rho_0)^2}}{\sqrt[3]{\mu_0}} d.$$

Формула Аллена, как показали эксперименты, дает хорошую совпадаемость результатов для зерен от 0,085 до 0,15 мм.

Критерий Антонова учитывает эффект динамического и вязкостного сопротивления среды, его рекомендуется применять для малых размеров зерен:

$$V_0 = \left(\frac{\nu}{d_3} \right) \left(\sqrt{20,4 + 2,95 \sqrt{Re^2 \psi}} - 4,52 \right)^2,$$

где d_3 — эквивалентный диаметр зерна, м; ν — кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$; Re — число Рейнольдса; $Re^2 \psi$ — коэффициент Ляшенко.

При использовании этих критериев мы включили понятие «эквивалентный диаметр по массе и по размеру», так как в каждом классе размеров серпентиновых зерен имеются зерна разных размеров и формы. Эквивалентный диаметр по размеру $d_{\text{ср}} = 1,05\text{--}1,1$ от среднего арифметического из размеров отверстий двух сит, на которых выделяется данный класс,

$$d_{\text{ср}} = k d_c = k \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right),$$

где d_c — средний диаметр, м.

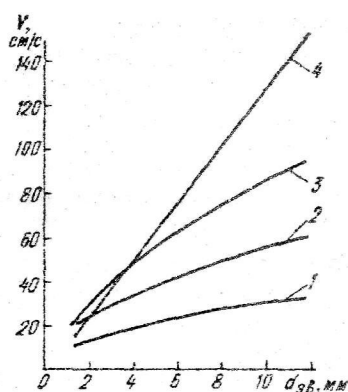


Рис.2. Сравнение конечных скоростей падения мягких серпентинитовых зерен разной крупности в воде: 1 - экспериментальная; 2 - по Риттингеру; 3 - по Антонову; 4 - по Аллену

Эквивалентный диаметр по массе $d_{эв}$ получается, если учитывать каждое зерно как шар и сравнить его массу с массой действительного зерна. Эквивалентный диаметр определяется по формуле

$$d = d_{эв} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_T}}$$

где M - масса зерна, кг.

Параметрами, которые оказывают влияние на конечную скорость падения, являются: плотность среды, плотность зерна, вязкость среды, диаметр зерна, число Рейнольдса, т.е. $V = f(\rho_T, \rho_0, \mu, d, Re)$.

Конечная скорость падения твердых тел зависит от их формы. Исследование показывает, что зерна одинаковой массы одного и того же вещества осаждаются в одинаковых условиях с разными скоростями благодаря их разной форме. Это значит, что придется включить в теоретические выражения поправочные коэффициенты (коэффициент формы), которые повышают точность расчетов. Коэффициент формы был определен для каждого теоретического выражения $\varphi = V_э / V_T$, где $V_э$ - экспериментальная конечная скорость падения; V_T - теоретическая конечная скорость падения.

По результатам исследования конечной скорости падения зерен с использованием различных критериев построен график (рис.2).

Видно, что критерий Риттингера имеет более равномерное и стабильное значение по отношению к экспериментальным данным и остальным критериям. Таким образом, при использовании понятия «эквивалентный диаметр по массе» применять критерий Риттингера наиболее целесообразно. Число Рейнольдса для каждого из классов крупности всегда находится в зоне турбулентного режима, что является необходимым требованием применения критерия Риттингера (табл.3).

Таблица 3

Результаты исследований по критерию Риттингера

Диапазон	Крупность, мм	Число Рейнольдса	Коэффициент формы по $d_{эв}$	Коэффициент формы по $d_{эв}$
I	-12,5+10,0	11123,7	0,520	0,535
	-10,0+8,0	10049,5		
	-8,0+6,35	8732,6		
	-6,35+5,0	7831,6		
II	-5,0+4,76	6826,7	0,486	0,543
	-4,76+3,15	6168,7		
	-3,15+2,5	4990,0		
	-2,5+2,0	4712,8		
III	-1,25+1,0	3465,3	0,517	0,533
IV	-0,63+0,65		По критерию Стокса	

Используя критерий Риттингера, теоретическую конечную скорость падения серпентинитовых зерен можно вычислить по формуле $V = \varphi V_0$.

Выводы

1. Для определения теоретической конечной скорости падения мягких серпентинитовых зерен рекомендуется использовать критерий Риттингера.

2. Наиболее приемлемые результаты получены при использовании понятия "эквивалентный диаметр по массе зерна".

3. Коэффициент формы φ , который использован в формуле Риттингера, колеблется от 0,486 до 0,543 при крупности 12,5-1,0 мм.

4. Для крупности зерен меньше 1,0 мм не рекомендуется использовать критерий Риттингера, в таких случаях критерий Стокса дает лучшие результаты.