

оңтайлы болып ұсынылатын шарттар мыналар: жинағыш шығымы – 500-600 г/т кенге, флотация ұзақтығы – 8-12 минут және кенді ұнтақтаудың мөлшері – -0,074 мм класстың 60-65%. Алынған қаралай мысты-молибденді концентрат басты компоненттердің мөлшері бойынша белгілі құрама сұлбамен өндеуге жататын материалдарға сай келеді.

Бағытты сөздер: баланстан тыс кен, Тастау кен орны, флотациялау өнімдері, бөліп алу, флотациялау көрсеткіштері.

Summary

It is shown the necessity to involve non-commercial sulfide copper-molybdenum ores into processing. Tastau deposit non-commercial sulfide ores washability studying results are presented with determination of processing modes and technological results. The laboratory experiments were carried out for each operation included into the closed processing cycle. Special attention was paid to the flotation concentration experiments. It was established that the completeness of copper recovery into a concentrate depends both on the collector consumption and the flotation duration, as well as the grinding fineness. Following optimum processing conditions: collector consumption – 500 to 600 g/t of ore, flotation duration – 8 to 12 minutes, ore grinding fineness – 60 to 65 % of -0.074 mm size fraction, are recommended. The produced rough copper-molybdenum concentrate, with regard to the main components content, corresponds to the similar materials to be treated by the conventional combination flow sheets.

Key words: non-commercial ore, sulfide ore, Tastau deposit, flotation, extraction, beneficiation

Поступила 12.05.2014.

УДК 622.73

**Комплексное использование
минерального сырья. № 2. 2014.**

А.М. МАКАШЕВА

Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Караганда, eia_hmi@mail.ru

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА И ИХ НАБОРА В ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

В современной вероятностной модели измельчения материалов анализируется влияние размеров мелющих шаров и их смеси на измельчение руды. При этом дано объяснение некоторым особенностям, ранее известным только по практическим данным. При использовании мелких шаров фракционный состав продукта характеризуется появлением двух аналитических максимумов в области крупных и мелких фракций, что является теоретической основой разделения этих фракций при работе мельницы в замкнутом цикле с классификатором. Скорость процесса при использовании смеси шаров оказывается более высокой, чем при использовании монофракций шаров той же общей массы, что указывает на синергетический эффект совместного их воздействия. Положение логарифмически нормального максимума, в отличие от раздельного применения шаров разного размера, смещаясь по времени в сторону мелких фракций, сопровождается прохождением через наибольшее абсолютное значение максимума, которое больше любого текущего значения максимума при раздельном использовании тех же шаров. Этот максимум формируется раньше в сравнении с раздельным применением шаров, а не в самом конце изучаемого интервала (3600 с), что является также весьма благоприятным фактором.

Ключевые слова: измельчение, вероятностная модель, кинетика, шаровая мельница, кварцевая руда

Введение. В развитие систематического анализа вероятностной модели измельчения [1-3] необходимо детализировать разрушающее и экранирующее воздействие шаров раз-

ного размера и особенно их смесей на зерновой материал, тем более, что последние широко применяются на практике путем эмпирического подбора состава смесей [4-9].

Прежде чем выявить прямое влияние шаров разного размера по-отдельности и в составе смесей на выход различных фракций, целесообразно рассмотреть зависимость константы скорости измельчения от размера шаров при прочих равных условиях, которые использовались ранее для модельных расчетов [2] по дробленной кварцевой руде: $d_{0,01} = 0,01$ м, $M_{SiO_2} = 0,0601$ кг/моль, $\gamma_z = 2650$ кг/м³, $E_a = \Delta H_m = 9170$ Дж/моль; по типовой мельнице МШЦ 3,6х4,0: $\gamma_u = 7874$ кг/м³, $G_u = 60000$ кг, $G_z = 18760$ кг, $\omega = 0,267$ с⁻¹, $D = 3,36$ м; по другим постоянным: $T = 298$ К, $R = 8,31441$ Дж/(моль · К), $g = 9,807$ м/с². Расчет констант скоростей измельчения проведен для размера шаров 0,06 м с массой для такого размера 0,891 кг, для 0,04 м – 0,264 кг, для 0,02 м – 0,033 кг, из которых первые две фракции взяты из практики работы Жезказганской фабрики, а третья образуется в результате износа шаров, а также характерна для лабораторных мельниц.

Экспериментальная часть и обсуждение полученных результатов. Общая формула для константы скорости при выражении активационного фактора не через массу шара, а через его размер примет вид:

$$k_j = \frac{8[(d_j/d_u) - (d_j/d_u)^2] \omega G_u G_z}{(1 + 2\omega\sqrt{2D/g})(G_u/\gamma_u + G_z/\gamma_z + G_6/\gamma_6)^2 \gamma_u \gamma_z} \exp\left(-\frac{E_a}{RT + 0,5MgD(\gamma_u/\gamma_z)(d_u/d_j)^3}\right), \quad (1)$$

или в расчетном варианте [2]:

$$k_j = \frac{1,332 \cdot 10^{-3} [(d_j/d_u) - (d_j/d_u)^2] G_u}{(G_u/7874 + 14,579)^2} \exp\left(-\frac{9170}{2477,7 + 2,942(d_u/d_j)^3}\right). \quad (2)$$

В последнем варианте оставлена масса шаровой загрузки G_u в качестве переменной для расчета константы скорости при использовании смеси шаров, когда каждый размер шара будет представлен своей весовой загрузкой. Пока же выясняется картина влияния размера шара при полной загрузке мельницы только данным сортом шаров общей массой 60000 кг.

Результаты расчетов приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Из этих данных следует, что максимумы константы скорости измельчения для всех трех размеров шаров локализируются в области миллиметровых размеров зерен ($j = 2 \div 4$), характерных для нижнего порога песковой фракции, со сдвигом в сторону мелких фракций для мелких шаров и с явным преимуществом в скорости измельчения крупных зерен крупными шарами.

Это является причиной наибольшего измельчения именно таких фракций, на рубеже которых формируется контрастное содержание крупных и мелких зерен в начале процесса и которые служат основанием для классификации продукта с возвратом песковой фракции в загрузку мельницы.

Таблица 1 – Зависимость константы скорости от размера зерен d_j и шаров d_u для модельных условий измельчения

j	d_j , м	k_j , с ⁻¹ , при d_u , м		
		0,06	0,04	0,02
1	0,010	$1,184 \cdot 10^{-3}$	$9,754 \cdot 10^{-4}$	$1,037 \cdot 10^{-3}$
2	0,005	$3,684 \cdot 10^{-3}$	$1,775 \cdot 10^{-3}$	$9,754 \cdot 10^{-4}$
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,236 \cdot 10^{-3}$	$5,055 \cdot 10^{-3}$	$1,775 \cdot 10^{-3}$
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$3,217 \cdot 10^{-3}$	$4,475 \cdot 10^{-3}$	$5,055 \cdot 10^{-3}$
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$1,666 \cdot 10^{-3}$	$2,465 \cdot 10^{-3}$	$4,475 \cdot 10^{-3}$
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	$8,399 \cdot 10^{-4}$	$1,255 \cdot 10^{-3}$	$2,465 \cdot 10^{-3}$
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	$4,212 \cdot 10^{-4}$	$6,309 \cdot 10^{-4}$	$1,255 \cdot 10^{-3}$
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	$2,109 \cdot 10^{-4}$	$3,161 \cdot 10^{-4}$	$6,309 \cdot 10^{-4}$
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	$1,055 \cdot 10^{-4}$	$1,582 \cdot 10^{-4}$	$3,161 \cdot 10^{-4}$
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	$5,278 \cdot 10^{-5}$	$7,915 \cdot 10^{-5}$	$1,582 \cdot 10^{-4}$
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	$2,639 \cdot 10^{-5}$	$3,958 \cdot 10^{-5}$	$7,915 \cdot 10^{-5}$
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	$1,320 \cdot 10^{-5}$	$1,980 \cdot 10^{-5}$	$3,958 \cdot 10^{-5}$
13	$2,441 \cdot 10^{-6}$	$6,599 \cdot 10^{-6}$	$9,898 \cdot 10^{-6}$	$1,980 \cdot 10^{-5}$
14	$1,221 \cdot 10^{-6}$	$3,299 \cdot 10^{-6}$	$4,949 \cdot 10^{-6}$	$9,898 \cdot 10^{-6}$

Что касается измельчения тонких классов, то для них преимущество использования мелких шаров выявляется в полной мере, которое для целевой фракции 10^{-5} м при $j = 8$ составляет по соотношению скоростей измельчения для размеров 0,06, 0,04 и 0,02 м как 1:1,5:3,0.

Этим диктуется целесообразность использования смеси шаров, которая обеспечивала бы одновременное эффективное измельчение крупных и тонких фракций.

Пока же для сравнения приведем результаты расчета по выходу фракций при раздельном измельчении шарами разного размера с

полной загрузкой мельницы каждым видом мелющего тела при $G_{\text{ш}} = 60000$ кг при прочих равных модельных условиях для мокрого измельчения (таблица 2-4 и рисунок 2).

По этим результатам просматривается некоторое усиление контрастности измельчения по мере перехода на мелкие шары со сдвигом максимума в сторону тонких фракций вплоть до целевого класса ($7,812 \cdot 10^{-5}$ м при $j = 8$), но с одновременным понижением этого максимума за счет остающихся в большей мере неизмельченными крупных классов, что особенно четко проявляется при часовой продолжительности процесса.

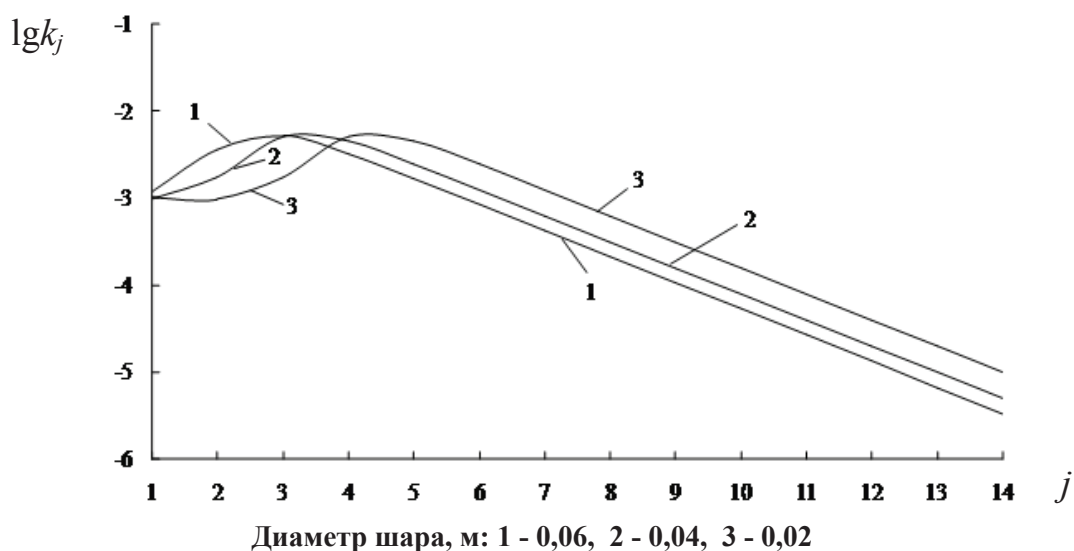


Рисунок 1 – Зависимость константы скорости измельчения от кратности разрушения (размера) зерна j при использовании шаров различного диаметра

Таблица 2 – Зависимость выхода фракций P_j от размера зерен d_j и продолжительности измельчения τ для шаров диаметром 0,06 м

j	d_j , м	P_j при τ , с								
		0	60	120	180	240	600	1200	3000	3600
1	0,010	1	0,932	0,868	0,809	0,754	0,493	0,243	0,029	0,014
2	0,005	0	0,061	0,106	0,138	0,161	0,181	0,110	0,014	0,007
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	0,006	0,021	0,039	0,057	0,118	0,092	0,013	0,006
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0	0,001	0,004	0,012	0,024	0,120	0,165	0,122	0,016
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0,002	0,005	0,069	0,221	0,324	0,071
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,017	0,134	0,330	0,268
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,002	0,033	0,120	0,388
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,003	0,017	0,192
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,035
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	—	1	1,000	0,999	1,000	1,001	1,000	1,001	1,002	0,999

Таблица 3 – Зависимость выхода фракций P_j от размера зерен d_j и продолжительности измельчения τ для шаров диаметром 0,04 м

j	d_j , м	P_j при τ, c								
		0	60	120	180	240	600	1200	3000	3600
1	0,010	1	0,943	0,890	0,839	0,792	0,558	0,311	0,054	0,030
2	0,005	0	0,054	0,099	0,137	0,169	0,259	0,235	0,060	0,035
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	0,003	0,009	0,017	0,027	0,074	0,087	0,026	0,015
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0	0	0,002	0,005	0,010	0,055	0,096	0,035	0,021
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0,001	0,003	0,038	0,129	0,089	0,057
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,013	0,102	0,225	0,179
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,002	0,036	0,306	0,336
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,005	0,167	0,250
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0	0,035	0,070
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,008
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	–	1	1,000	1,000	0,999	1,001	0,999	1,001	1,000	1,001

 Таблица 4 – Зависимость выхода фракций P_j от размера зерен d_j и продолжительности измельчения τ для шаров диаметром 0,02 м

j	d_j , м	P_j при τ, c								
		0	60	120	180	240	600	1200	3000	3600
1	0,010	1	0,940	0,883	0,830	0,780	0,537	0,288	0,045	0,024
2	0,005	0	0,059	0,110	0,156	0,195	0,340	0,372	0,152	0,100
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	0,002	0,006	0,013	0,022	0,086	0,164	0,118	0,084
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0,001	0,003	0,019	0,050	0,046	0,033
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0,001	0,011	0,045	0,056	0,043
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,006	0,046	0,112	0,093
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,002	0,027	0,194	0,197
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,008	0,186	0,251
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,001	0,078	0,141
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0	0,013	0,032
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0,003
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	–	1	1,001	0,999	1,000	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001

Одновременно минимум между контрастными по входу фракциями смещается в область более тонких классов ($c_j = 3$ до $j = 4$).

При более детальном представлении временного интервала (через 240 с на всем его протяжении) на рис. 2 впервые особенно четко проявляется формирование двух аналитических максимумов измельчения для крупности шаров 0,04 м, начиная с 2100 с, и 0,02 м – еще раньше, после 900 с, создающих подлинную контрастность измельчения в отличие от данных для размера шаров 0,06 м, где эта контрастность проявляется лишь по времени измельчения с наибольшим (но не аналитически максимальным) выходом самого крупного класса ($j = 1$).

При использовании шаров диаметром 0,04 и 0,02 м первый максимум приходится на $j = 2$, а второй – на $j = 5, 6, 7, 8$, по мере протекания процесса. Тем самым впервые получено математически строгое подтверждение появлению двойных максимумов для фракционного состава измельченного материала. Оно вызывается неоднократным выравниванием градиентов стерического и активационного факторов на фоне изменения выходов фракций во времени.

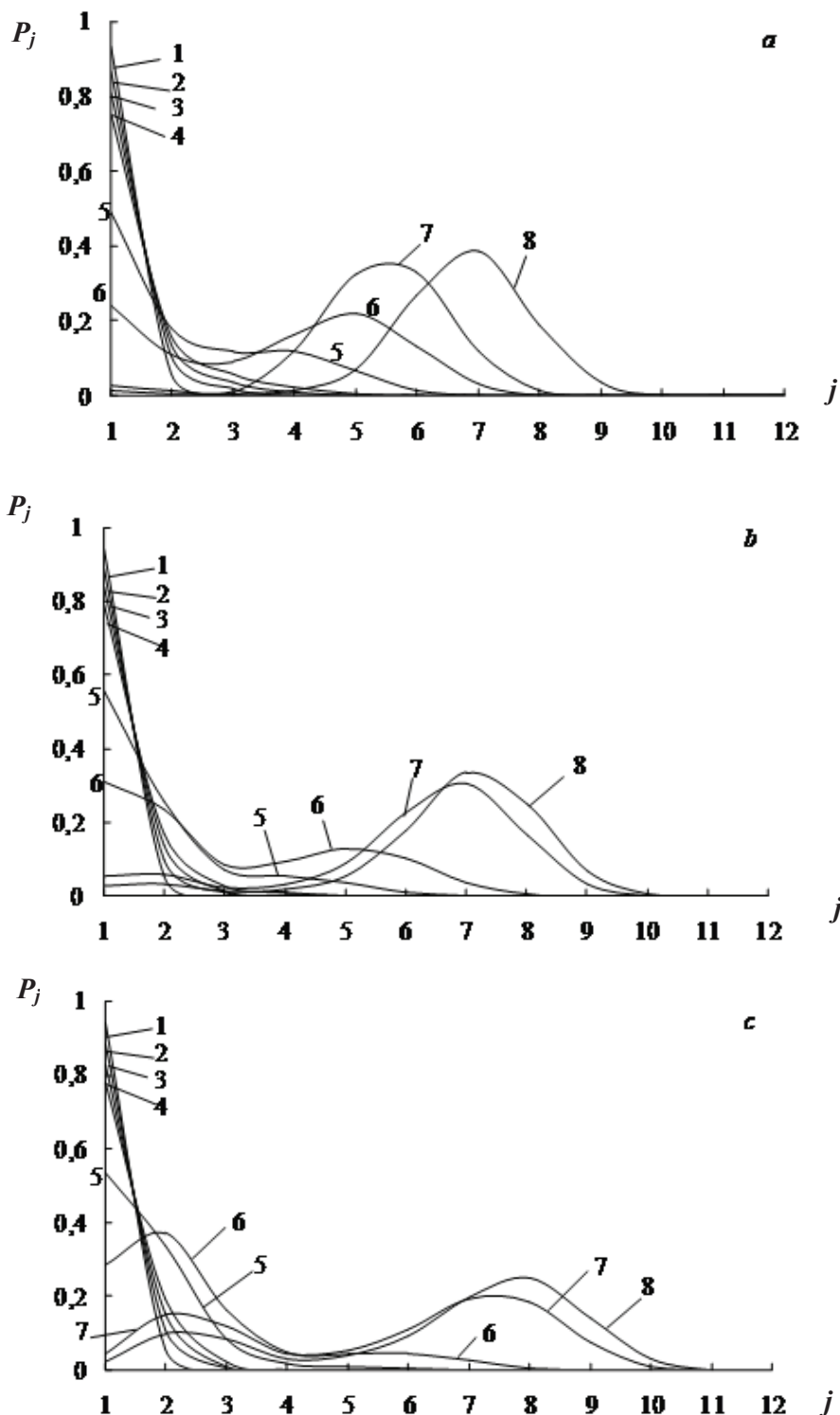
Переходя к анализу воздействия на процесс измельчения смеси шаров, условимся представлять общие массы для каждого их размера, 0,06, 0,04 и 0,02 м, равной загрузкой по 20000 кг. Этим определится изменение ве-

личины константы скорости процесса, которое следует рассчитать по формуле (2) для каждого размера шаров с целью определения парциального вклада в общую константу скорости для смеси шаров, как это вообще характерно для любых параллельных процессов:

$$k_j = \sum_{i=1}^l k_{j,i}, \quad (3)$$

где в данном случае $l = 3$.

Результаты расчета парциальных констант скоростей и общей константы скорости процесса приведены в таблице 5 и на рисунке 3.

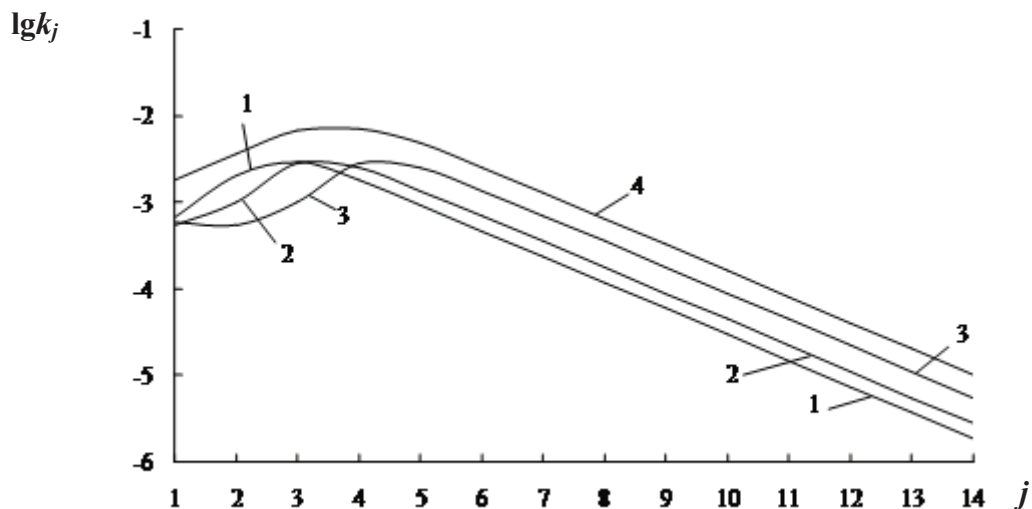


Время измельчения (τ , с): 1 – 60, 2 – 120, 3 – 180, 4 – 240, 5 – 600, 6 – 1200, 7 – 3000, 8 – 3600
Диаметр шара, м: а - 0,06, б - 0,04, с - 0,02

Рисунок 2 – Зависимость фракционного состава (P_j , д.ед.) от кратности j и продолжительности измельчения зерна (τ)

Таблица 5 – Зависимость парциальных ($k_{j,p}$) и общей (k_j) констант скоростей от размера зерен d_j и шаров $d_{ш}$ для модельных условий измельчения

j	$d_j, \text{м}$	$k_{j,p}, \text{с}^{-1}, \text{при } d_{ш}, \text{м}$			$k_j, \text{с}^{-1}$
		0,06	0,04	0,02	
1	0,010	$6,638 \cdot 10^{-4}$	$5,467 \cdot 10^{-4}$	$5,812 \cdot 10^{-4}$	$1,792 \cdot 10^{-3}$
2	0,005	$2,065 \cdot 10^{-3}$	$9,951 \cdot 10^{-4}$	$5,467 \cdot 10^{-4}$	$3,607 \cdot 10^{-3}$
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,935 \cdot 10^{-3}$	$2,833 \cdot 10^{-3}$	$9,951 \cdot 10^{-4}$	$6,763 \cdot 10^{-3}$
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,803 \cdot 10^{-3}$	$2,508 \cdot 10^{-3}$	$2,833 \cdot 10^{-3}$	$7,144 \cdot 10^{-3}$
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$9,338 \cdot 10^{-4}$	$1,382 \cdot 10^{-3}$	$2,508 \cdot 10^{-3}$	$4,824 \cdot 10^{-3}$
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	$4,708 \cdot 10^{-4}$	$7,036 \cdot 10^{-4}$	$1,382 \cdot 10^{-3}$	$2,556 \cdot 10^{-3}$
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	$2,361 \cdot 10^{-4}$	$3,536 \cdot 10^{-4}$	$7,036 \cdot 10^{-4}$	$1,293 \cdot 10^{-3}$
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	$1,182 \cdot 10^{-4}$	$1,772 \cdot 10^{-4}$	$3,536 \cdot 10^{-4}$	$6,490 \cdot 10^{-4}$
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	$5,914 \cdot 10^{-5}$	$8,869 \cdot 10^{-5}$	$1,772 \cdot 10^{-4}$	$3,250 \cdot 10^{-4}$
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	$2,958 \cdot 10^{-5}$	$4,436 \cdot 10^{-5}$	$8,869 \cdot 10^{-5}$	$1,626 \cdot 10^{-4}$
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	$1,479 \cdot 10^{-5}$	$2,219 \cdot 10^{-5}$	$4,436 \cdot 10^{-5}$	$8,134 \cdot 10^{-5}$
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	$7,397 \cdot 10^{-6}$	$1,110 \cdot 10^{-5}$	$2,219 \cdot 10^{-5}$	$4,069 \cdot 10^{-5}$
13	$2,441 \cdot 10^{-6}$	$3,699 \cdot 10^{-6}$	$5,548 \cdot 10^{-6}$	$1,110 \cdot 10^{-5}$	$2,035 \cdot 10^{-5}$
14	$1,221 \cdot 10^{-6}$	$1,849 \cdot 10^{-6}$	$2,774 \cdot 10^{-6}$	$5,548 \cdot 10^{-6}$	$1,017 \cdot 10^{-5}$



Раздельное использование шаров диаметром, м: 1 - 0,06; 2 - 0,04; 3 - 0,02
общей массой по 20000 кг и совместное воздействие: 4 - в составе общей массы 60000 кг

Рисунок 3 – Зависимость константы скорости измельчения от кратности разрушения (размера) зерна j при раздельном и совместном использовании шаров

Из этих данных следует, что парциальные константы скорости измельчения в общем повторяют форму и соотношение констант скоростей для полной загрузки мельницы каждым сортом шаров, представленных на рисунке 1, но с соответствующим смещением вниз при уменьшении скоростей примерно в 1,8 раза. Но суммарная константа, напротив, сохраняя форму при изменении размера

зерна, становится больше по абсолютной величине в сравнении с любой из констант для полной загрузки каждым видом шаров по всему диапазону крупности зерен. Это можно проиллюстрировать отношением величины суммарной константы скорости к наибольшей для любого из шаров при полной раздельной их загрузке по данным таблиц 5 и 1:

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{k_{j\Sigma}(5)}{k_{j,\max}(1)}$	1,51	0,98	1,30	1,41	1,08	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03

Более сильная разрушаемость крупных зерен ($j = 1 \div 4$), вызываемая наиболее удачным сочетанием стерического, активационного и концентрационного факторов при параллельном взаимодействии крупных и мелких шаров со всеми зернами, должна приводить к увеличению выхода тонких классов, которое усиливается ввиду повышенной скорости их измельчения смесью шаров. Это выявляется

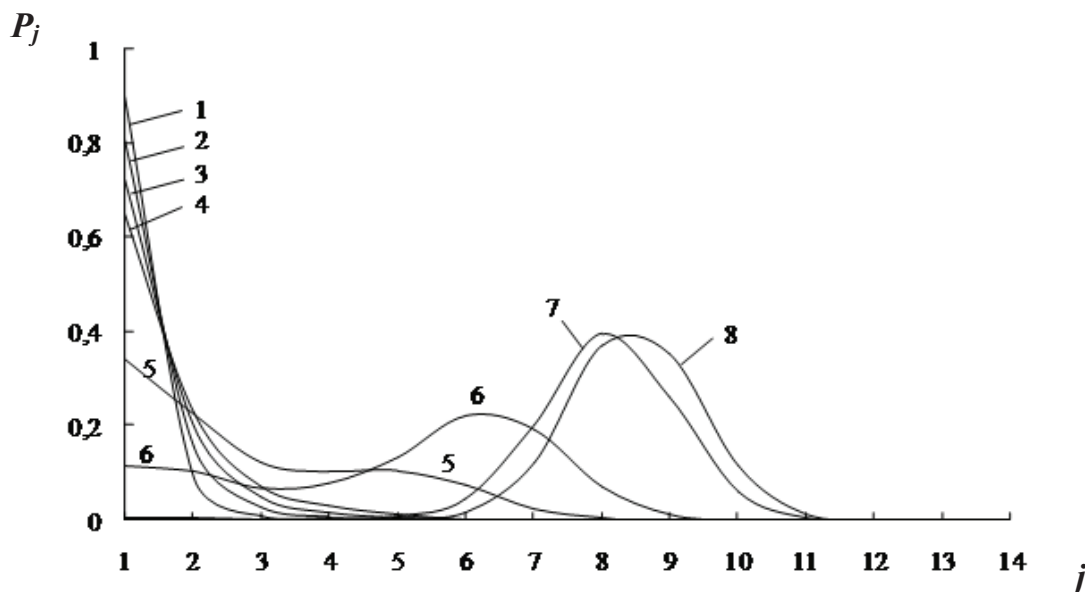
при расчете фракционного состава по интегральной формуле

$$P_n = \sum_{j=1}^{n-1} P_{0j} \prod_j^{n-1} k_j \sum_j^n \frac{e^{-k_j \tau}}{\prod_{\substack{j,i=1 \\ i \neq j}}^n (k_i - k_j)} + P_{0n} e^{-k_n \tau} \quad (4)$$

с использованием суммарной константы скорости (таблица 6 и рисунок 4).

Таблица 6 – Зависимость выхода фракций P_j от размера зерен d_j и продолжительности измельчения τ для смеси шаров

j	$d_j, \text{м}$	P_j при τ								
		0	60	120	180	240	600	1200	3000	3600
1	0,010	1	0,898	0,807	0,724	0,651	0,342	0,117	0,005	0,002
2	0,005	0	0,091	0,156	0,199	0,227	0,224	0,103	0,005	0,002
3	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0	0,009	0,029	0,051	0,072	0,122	0,069	0,003	0,001
4	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0	0,001	0,007	0,018	0,032	0,104	0,078	0,004	0,001
5	$6,25 \cdot 10^{-4}$	0	0	0,002	0,006	0,014	0,105	0,134	0,010	0,003
6	$3,125 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0,001	0,003	0,074	0,222	0,044	0,017
7	$1,562 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0,025	0,194	0,204	0,122
8	$7,812 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0,004	0,071	0,396	0,370
9	$3,906 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,011	0,262	0,353
10	$1,953 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	0,001	0,062	0,114
11	$9,766 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0,014
12	$4,883 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
13	$2,441 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	$1,221 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	–	1	0,999	1,001	0,999	0,999	1,000	1,000	1,001	1,000



Время измельчения (τ) с: 1 – 60, 2 – 120, 3 – 180, 4 – 240, 5 – 600, 6 – 1200, 7 – 3000, 8 – 3600

Рисунок 4 – Зависимость выхода фракций P_j от размера зерен j и продолжительности измельчения для смеси шаров

Здесь наблюдаются новые особенности, характерные только для измельчения смесью шаров.

Во-первых, положение логарифмически нормального максимума, в отличие от раздельного применения шаров разного размера, смещаясь по времени в сторону мелких фракций, сопровождается прохождением через наибольшее абсолютное значение максимума, 0,396, которое больше любого текущего значения максимума при раздельном использовании тех же шаров. Сам по себе этот факт указывает на синергетическое, взаимно усиливающее действие смеси шаров.

Во-вторых, этот глобальный максимум формируется раньше в сравнении с раздельным применением шаров, в интервале продолжительностей 3000-3100 с, а не в самом конце изучаемого интервала (3600 с), что является также весьма благоприятным фактором.

Что касается первого максимума, который проявляется при раздельном воздействии шаров размером 0,04 и 0,02 м, то в смеси с шарами диаметром 0,06 м этот максимум в области крупных фракций ($j = 2$) сглаживается, принимая форму площадки, к тому же оставаясь на низких значениях P_j ($< 0,013$). При этом «седловина» зависимости $P_j = f(d_j)$ остается в области $j = 3 \div 4$, т.е. на границе песковой и тонкой фракций, на основании чего необходимость разделения этих фракций остается теоретически оправданной.

Следует отметить, что в рассматриваемых модельных условиях измельчения достаточно крупной монофракции кварцевой руды (0,01 м) все процессы во времени для выхода тонких целевых фракций оказываются сдвинутыми в область больших продолжительностей процесса. При использовании более мелкой фракции, а тем более сразу содержащей средние и тонкие классы, временные интервалы должны существенно сократиться.

Выводы. Анализ вероятностной модели измельчения по влиянию размера мелющих шаров и их смеси выявил ряд особенностей, ранее известных только по практическим данным.

При использовании мелких шаров фракционный состав продукта характеризуется появлением двух аналитических максимумов в области крупных и мелких фракций, что является теоретической основой разделения этих фракций при работе мельницы в замкнутом цикле с классификатором.

Скорость процесса при использовании смеси шаров оказывается более высокой, чем при использовании монофракций шаров той же общей массы, что указывает на синергетический эффект совместного их воздействия.

Абсолютная величина максимума выхода фракций для смеси шаров выше, чем при их раздельном использовании, со смещением в область более тонких фракций, чем объясняется предпочтительность использования подобных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Малышев В.П., Турдукожаева (Макашева) А.М., Кайкенов Д.А. Развитие теории измельчения руд на основе молекулярной теории соударений и формальной кинетики последовательных реакций // Обогащение руд. – 2012. – № 4. – С. 29-35.
- 2 Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Кайкенов Д.А. Отображение процесса мокрого измельчения в шаровых мельницах вероятностной моделью // Обогащение руд. – 2013. – № 1. – С. 27-30.
- 3 Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Кайкенов Д.А. Учет циркуляции песков в вероятностной модели измельчения руд // Обогащение руд. – 2012. – № 6. – С. 29-33.
- 4 Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Учебник для вузов. В 3 т. – М.: МГУ, 2004. – Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. – 510 с.
- 5 Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауэра. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.
- 6 Гудима Н.В., Шейн Я.П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
- 7 Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Каримов Р.М. Адаптация вероятностной модели измельчения применительно к переработке речного песка в шаровой мельнице // Современное состояние естественных и технических наук: Матер. X Междунар. научно.-практ. конф. – Москва, 2013. – С. 43-47.
- 8 Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Захарьян С.В. О возможности адаптации вероятностной модели измельчения к реальным условиям // Наука и современность: вызовы XXI века: Матер. Междунар. научно.-практ. конф. – Киев, 2014. – С. 57-60.
- 9 Каримова Л.М., Каримов Р.М., Кайралапов Е.Т. Дополнение и опытная проверка вероятностной модели измельчения руд применительно к мокрому измельчению в шаровых мельницах // Комплексное

использование минерального сырья. – 2013. – № 1. – С. 18-28.

REFERENCES

- 1 Malyshev V.P., Turdukozhaeva (Makasheva) A.M., Kajkenov D.A. *Obogashchenie rud*, **2012**, 4, 29-35 (in Russ.).
- 2 Malyshev V.P., Turdukozhaeva A.M., Kajkenov D.A. *Obogashchenie rud*, **2013**, 1, 27-30 (in Russ.).
- 3 Malyshev V.P., Turdukozhaeva A.M., Kajkenov D.A. *Obogashchenie rud*, **2012**, 6, 29-33 (in Russ.).
- 4 Abramov A.A. *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh. Uchebnik dlya vuzov. M: MGU*, **2004**, 2, 510 (in Russ.).
- 5 Pod red. H. Blyumenauehra. *Ispytanie materi-*

alov. Spravochnik. Per. s nem. M.: Metallurgiya, **1979**, 448 (in Russ.).

6 Gudima N.V., Shejn Ya.P. *Kratkij spravochnik*, M.: Metallurgiya, **1975**, 536 (in Russ.).

7 Karimova L.M., Kajralapov E.T., Karimov R.M. *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk. Mater. X mezhdun. nauchno.-prakt. konf.*, Moscow, **2013**, 43-47 (in Russ.).

8 Karimova L.M., Kajralapov E.T., Zahar'jan S.V. *Nauka i sovremennost': vyzovy XXI veka. Mater. Mezhdunar. nauchno.-prakt. konf.*, Kiev, **2014**, 57-60 (in Russ.).

9 Karimova L.M., Karimov R.M., Kajralapov E.T. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*, **2013**, 1, 18-28 (in Russ.).

Түйіндеме

Авторлар дамытып отырған материалдарды ұсақтаудың ықтималдық үлгісінде ұсататын шарлардың өлшемі мен олардың қоспасының кенді ұсақтауға тигізетін әсеріне талдау жасалған. Сонымен бірге бұрынырақта тек практикалық мәліметтерде таныс болған кейбір ерекшеліктерге түсініктемелер берілген. Ұсақ шарларды қолдану барысында өнімнің фракциялық құрамы ірі және ұсақ фракциялар облысында екі аналитикалық максимумдардың пайда болуымен ерекшеленеді, ол диірменнің топтастырғышпен тұйық циклда жұмыс істеуінде осы фракциялардың бөлінуінің теориялық негізі болып табылады. Шарлар қоспасын қолдануда үрдістің жылдамдығы жалпы салмағы, дәл сондай шарлардың монофракциясын қолданумен салыстырғанда, анағұрлым жоғары болып келеді. Бұл олардың бірге әсер етуіндегі синергетикалық эффектті көрсетеді. Логарифмдік максимумның келбеті, түрлі өлшемдегі шарларды бөлек беруге қарағанда ұсақ фракциялардың бағанына уақыт бойынша жылжып, максимумның жоғарырақ абсолюттік мәні арқылы өтумен бірге жүреді, ол сондай шарларды бөлек қолданудағы максимумның кезкелген ағымдық мәніне қарағанда артығырақ. Ол максимум анықтау интервалының ең соңында емес (3600 с), шарларды бөлек бергенге қарағанда бұрынырақ түзіледі, ал ол да аса қолайлы фактор болып табылады.

Түйінді сөздер: ұсақтау, ықтималдық үлгісі, кинетика, шарлы диірмен, кварц кені

Summary

Influence of grinding balls sizes and their mixtures on ore grinding is analyzed in the modern probabilistic model of materials grinding. Some features previously known only for practical data are explained by application of this model. At using small balls the fractional composition of the product is characterized by the appearance of two analytical peaks in the area of large and fine fractions, which is the theoretical basis for the separation of these fractions at mill working in closed circuit with a classifier. The process speed at using the mixture of the balls is higher than at using the balls monofractions with same total weight. It indicates a synergistic effect of their combined impact. Logarithmically normal maximum position, in contrast to the separate use of balls of different sizes, timely shifting towards fine fractions, followed by passage through the largest absolute value of maximum, which is greater than any current value of peak at the separate use of the same balls. This maximum is formed earlier in comparison with the separate use of the balls, rather than in the end of the study interval (3600 s), which is also very favorable factor.

Keywords: grinding, probabilistic model, kinetics, ball mill, quartz ore

Поступила 02.04.2014.