

*Л.М.КАРИМОВА**, *Р.М.КАРИМОВ*, *Е.Т.КАЙРАЛАПОВ*

ТОО «Иновация», г. Караганда, *lutsia.08@mail.ru

ДОПОЛНЕНИЕ И ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗАБАЛАНСОВОЙ МЕДНОСУЛЬФИДНОЙ РУДЫ

В статье приведена проверка вероятностной модели измельчения по данным переработки монофракции забалансовой медносульфидной руды в лабораторной шаровой мельнице при водопадном режиме работы. Показано, что адекватность вероятностной модели улучшается при использовании коэффициента адаптации константы скорости измельчения на основе обработки данных для самой крупной фракции. В лабораторных условиях проведено уточнение модели мокрого измельчения по учету объемной доли воды в смеси с измельчаемыми и мелющими телами. Разработан алгоритм расчета фракции в процессе измельчения с вводом исходных данных на основе характеристик руды и мелющих шаров, а также параметров и режима работы мельницы. Данная проверка применительно к вероятностной модели измельчения проведена впервые и в целом свидетельствует о строгости использованной модели.

Ключевые слова: шаровая мельница, забалансовая руда, измельчение, медносульфидная руда, математическое моделирование

Введение. В работах [1-4] на основе подобия процесса измельчения в водопадном режиме работы шаровых барабанных мельниц и химических процессов для последовательных реакций разработана вероятностная теория процесса, подчиненная единому наиболее общему выражению скорости процесса через частотный (Z), стериический ($P_{ст}$), активационный (P_a) и концентрационный ($P_{конц}$) факторы:

$$V = ZP_{ст}P_aP_{конц}. \quad (1)$$

Адаптация этих факторов к условиям работы мельниц была выражена соответственно как

$$Z = \frac{2\omega}{1 + 2\omega\sqrt{2D/g}}, \quad (2)$$

$$P_{ст} = 4d_j(d_{ш} - d_j)/d_{ш}^2, \quad (3)$$

$$P_a = \exp\left(-\frac{E_a}{RT + \frac{3MmgD}{\pi d_j^3 \gamma_3}}\right), \quad (4)$$

$$P_{\text{конц}} = P_{\text{ш}} P_3 P_j = \frac{G_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{ш}}(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}} + G_3/\gamma_3)} \cdot \frac{G_3}{\gamma_3(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}} + G_3/\gamma_3)} \cdot P_j =$$

$$= \frac{G_{\text{ш}} G_3 P_j}{(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}} + G_3/\gamma_3)^2 \gamma_{\text{ш}} \gamma_3}, \quad (5)$$

где ω – частота вращения мельницы, с^{-1} ; D – внутренний диаметр мельницы, м; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; d_j – средний размер зерен фракции с индексом j в порядке уменьшения размера, м; $d_{\text{ш}}$ – диаметр мелющего шара, м; E_a – энергия активации измельчения, Дж/моль; M – молекулярная масса самой твердой составляющей зерна (обычно, кварца), $\text{кг}/\text{моль}$; m – масса мелющего шара, кг; γ_3 – плотность руды (зернового материала), $\text{кг}/\text{м}^3$; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура (обычно принимаемая равной 298 К); G_3 – масса руды в мельнице (зерен), кг; $G_{\text{ш}}$ – масса шаров в мельнице, кг; $\gamma_{\text{ш}}$ – плотность шаров, $\text{кг}/\text{м}^3$; P_j – долевое содержание фракции со средним размером зерна d_j .

Методика расчета. В результате уравнение для скорости процесса измельчения имеет вид с учетом функционального изменения только долевого содержания фракции P_j

$$-\frac{dP_j}{d\tau} = \frac{8d_j(d_{\text{ш}} - d_j)\omega G_{\text{ш}} G_3 P_j}{d_{\text{ш}}^2(1 + 2\omega\sqrt{2D/g})(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}} + G_3/\gamma_3)^2 \gamma_{\text{ш}} \gamma_3} \exp\left(-\frac{E_a}{RT + \frac{3MmgD}{\pi d_j^3 \gamma_3}}\right), \quad (6)$$

в котором в константу скорости измельчения для каждой фракции входят все постоянные параметры, кроме P_j

$$k_j = \frac{8d_j(d_{\text{ш}} - d_j)\omega G_{\text{ш}} G_3}{d_{\text{ш}}^2(1 + 2\omega\sqrt{2D/g})(G_{\text{ш}}/\gamma_{\text{ш}} + G_3/\gamma_3)^2 \gamma_{\text{ш}} \gamma_3} \exp\left(-\frac{E_a}{RT + \frac{3MmgD}{\pi d_j^3 \gamma_3}}\right). \quad (7)$$

В свою очередь, эта константа вводится в интегральную модель измельчения, учитывающую не только убыль содержания каждой фракции, но и прирост его (кроме первого) за счет образования осколков от предыдущей фракции в строгом соответствии с кинетикой последовательных химических и физических превращений [1-4]:

$$P_n = \sum_{j=1}^{n-1} P_{0j} \prod_{j=1}^{n-1} k_j \sum_{j=1}^n \frac{e^{-k_j \tau}}{\prod_{\substack{j,i=1 \\ i \neq j}}^n (k_i - k_j)} + P_{0n} e^{-k_n \tau}, \quad (8)$$

где n – номер рассчитываемой фракции, j – номера предыдущих фракций и соответствующих стадий разрушения зерен, P_{0j} – исходное долевое содержание фракций, τ – продолжительность измельчения, с.

Эта формула была применена на модельных примерах для анализа всех осо -

бенностей измельчения, ранее не имевших строгого теоретического обоснования. Вместе с тем, судя по выражению концентрационного фактора (5), данная модель применима только к описанию сухого измельчения, так как учитывается объемы только шаровой загрузки ($G_{ш}/\gamma_{ш}$) и рудного материала (G_3/γ_3), вместе дающие по долевному распределению единицу

$$\frac{G_{ш}/\gamma_{ш}}{G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3} + \frac{G_3/\gamma_3}{G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3} = 1. \quad (9)$$

Между тем в настоящее время большинство процессов измельчения в барабанных мельницах реализуются в условиях мокрого измельчения, т.е. в присутствии воды, причем в весьма заметных количествах. О влиянии разбавляющего действия для выражения долей шаров и зерен лишь упомянуто в работе [4], но не доведено до формального выражения, хотя это должно отражаться и на абсолютном долевым содержании фракций в смеси шаров, руды и воды, а также взаимодействия этих фракций с мелющими телами.

Это влияние можно формализовать по подобию учета объема растворителей в химических фракциях, тем самым сохраняя общий подход к отображению химических и механических процессов превращения вещества, использованный в [1-4]. Для этого достаточно выразить общий объем системы через сумму ее составляющих

$$V_{\Sigma} = V_{ш} + V_3 + V_6, \quad (10)$$

или в развернутом виде

$$V_{\Sigma} = G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3 + G_6/\gamma_6,$$

где индекс «6» относится к воде.

В соответствии с этим объемные доли шаров и зерен выразятся несколько иначе:

$$P_{ш} = \frac{G_{ш}}{\gamma_{ш}(G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3 + G_6/\gamma_6)}, \quad (11)$$

$$P_3 = \frac{G_3}{\gamma_3(G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3 + G_6/\gamma_6)}, \quad (12)$$

как и константа скорости измельчения

$$k_j = \frac{8d_j(d_{ш} - d_j)\omega G_{ш}G_3}{d_{ш}^2(1 + 2\omega\sqrt{2D/g})(G_{ш}/\gamma_{ш} + G_3/\gamma_3 + G_6/\gamma_6)^2\gamma_{ш}\gamma_3} \exp\left(-\frac{E_a}{RT + \frac{3MmgD}{\pi d_j^3\gamma_3}}\right). \quad (13)$$

Интегральная формула (8) при этом остается без изменений. Вполне очевидно, что уточненная формула константы представляется более общей, так как она сводится к (7) при $G_6=0$, т.е. для сухого измельчения.

Формулы (13) и (8) были запрограммированы на языке Delphi 7 с вводом исход

ных данных на основе характеристик руды и мелющих шаров, а также параметров и режима работы мельницы. Блок – схема расчетов по выходу фракций с использованием математической модели (8) представлена на рисунке 1.

Для проверки уточненной модели измельчения опыты проводили в лабораторной шаровой мельнице 62МЛ на забалансовой медно-сульфидной руде Акчи-Спасского карьера (Центральный Казахстан). Для проверки принципиальной применимости вероятностной модели (8) использовали узкую фракцию $-0,5+0,2$ мм со средним размером $d_1 = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м, общей массой $G_3 = 0,200$ кг, плотностью $\gamma_3 = 2650$ кг/м³. Стальные шары размером $d_{ш} = 0,0221$ м, массой $m = 0,0476$ кг, плотностью $\gamma_{ш} = 7874$ кг/м³ и общей массой $G_{ш} = 1,470$ кг загружали в мельницу вместе с водой массой $G_в = 0,350$ кг и плотностью $\gamma_в = 1000$ кг/м³. Внутренний диаметр мельницы составил $D = 0,1455$ м, угловая скорость вращения ω для поддержания водопадного режима задавалась равной $1,87$ с⁻¹.

Руда более чем на половину состоит из кварцита, поэтому за ее вещественную характеристику приняли кварц с $M_{SiO_2} = 0,0601$ кг/моль, а в качестве энергетического барьера активации – его теплоту плавления с учетом полиморфных превращений $E_a = 9170$ Дж/моль в соответствии с рекомендациями авторов теории [1-4] и на основе представлений о разрушении кристаллов [5, 6].

При фракционном анализе продуктов измельчения использовали стандартный набор сит, в данном случае начиная с первой фракции $-0,5+0,2$ мм ($d_1 = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м), далее вторая фракция $-0,2+0,1$ мм ($d_2 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ м), третья $-0,1+0,071$ мм ($d_3 = 8,55 \cdot 10^{-5}$ м), а четвертая – последняя, размером $-0,071+0$ мм. В отношении представления последней фракции средним размером для сопоставления с результатами расчета по модели (8) существуют определенные проблемы, так как по новой модели тонкие классы учитываются более детально в полном соответствии с действительным фракционным составом нижнего класса, измельчение которого подчинено общим закономерностям последовательного разрушения зерен примерно на 8 осколков, т.е. с уменьшением размера в среднем в два раза, вплоть до сколь угодно малого размера [5]

$$d_{j+1} = d_j / 2. \quad (14)$$

Поскольку расчет по вероятностной модели (8) продолжается до тех пор, пока выход самой тонкой фракции не устремится к нулю с заданной точностью (например, 0,001), тем самым обеспечивая строгое равенство единице суммы всех фракций для данного момента времени, то для сопоставления с выходом нижней ситовой фракции следует просуммировать все расчетные значения P_j , начиная с P_{j+1} , где j относится к среднему размеру предпоследней ситовой фракции, в данном случае к $d_3 = 8,55 \cdot 10^{-5}$ м.

Таким образом, набор фракций и констант скоростей формируется по трем ситовым и остальным расчетным, находимым по формуле (14). Можно отметить, что три ситовые размера фракции также примерно подчиняются этой формуле, хотя и выбираются по стандартам из практических соображений.

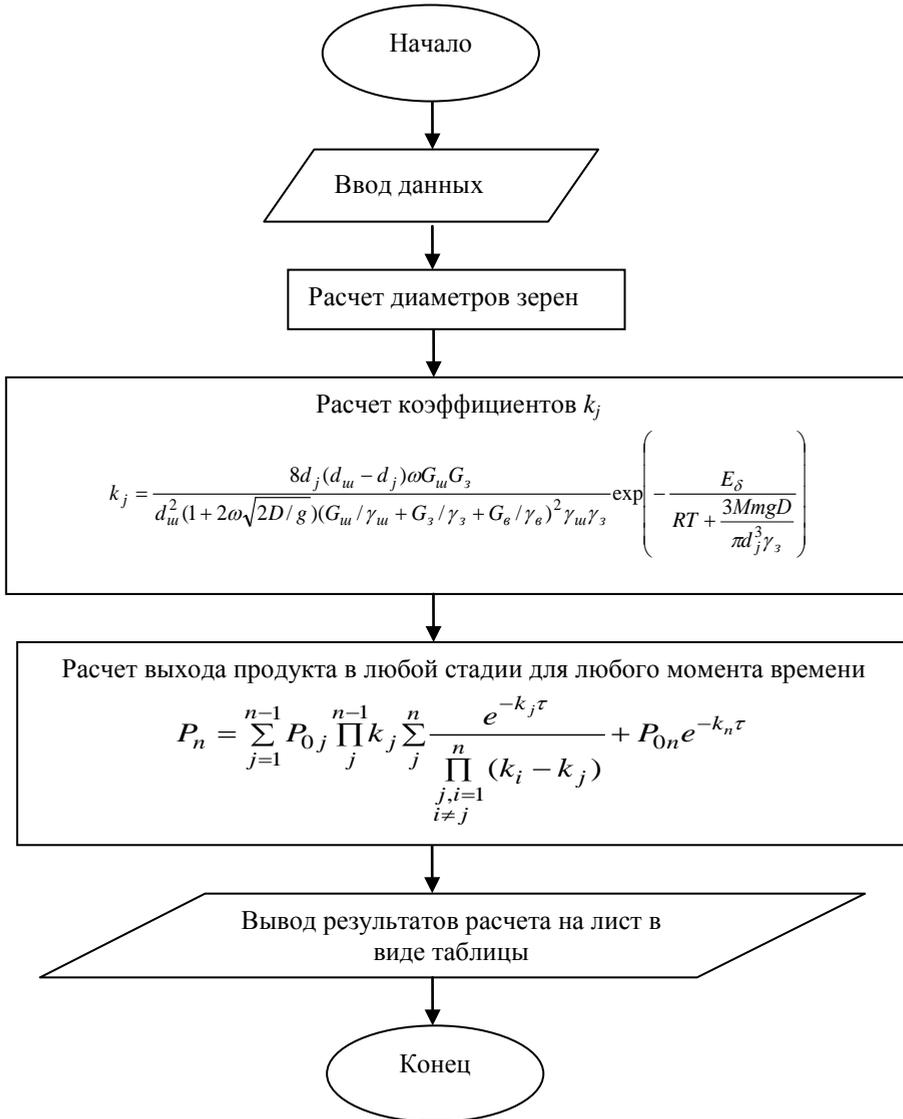


Рисунок 1 – Блок схема расчетов выхода продукта по уравнениям (13), (8)

Результаты и их обсуждение. С вводом вышеприведенных характеристик мельницы и материалов в константу скорости (13) она приняла расчетный вид

$$k_j = 701,52d_j(0,0221 - d_j) \exp\left(-\frac{9170}{2436,1 + 1,471 \cdot 10^{-6} / d_j^3}\right). \quad (15)$$

Опыты проводили в течение 60, 300 и 900 с (все размерные величины в вероятностной модели даются в системе СИ). Результаты в сопоставлении с расчетными значениями приведены в таблице 1.

Таблица 1- Зависимость опытного и расчетного выхода фракций ($P_{j,\varepsilon}$ и $P_{j,p}$) от продолжительности (τ) измельчения забалансовой медносulfидной руды*

| j | $d_j, \text{м}$ | $k_j, \text{с}^{-1}$ | P_{oj} | $\tau = 60 \text{ с}$ | | $\tau = 300 \text{ с}$ | | $\tau = 900 \text{ с}$ | |
|---|---------------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | | | | $P_{j,\varepsilon}$ | $P_{j,p}$ | $P_{j,\varepsilon}$ | $P_{j,p}$ | $P_{j,\varepsilon}$ | $P_{j,p}$ |
| 1 | $3,500 \cdot 10^{-4}$ | $4,158 \cdot 10^{-3}$ | 1 | 0,652 | 0,780 | 0,238 | 0,288 | 0,008 | 0,024 |
| 2 | $1,500 \cdot 10^{-4}$ | $2,262 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0,199 | 0,206 | 0,407 | 0,483 | 0,262 | 0,235 |
| 3 | $8,550 \cdot 10^{-5}$ | $1,315 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0,012 | 0,015 | 0,041 | 0,198 | 0,110 | 0,427 |
| 4 | $4,275 \cdot 10^{-5}$ | $6,612 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,030 | - | 0,267 |
| 5 | $2,138 \cdot 10^{-5}$ | $3,311 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,001 | - | 0,045 |
| 6 | $1,069 \cdot 10^{-5}$ | $1,656 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,000 | - | 0,003 |
| 7 | $5,344 \cdot 10^{-6}$ | $8,283 \cdot 10^{-5}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,000 | - | 0,000 |
| | Выход фракции $-7,1 \cdot 10^{-5}$ | | | 0,137 | 0,000 | 0,314 | 0,032 | 0,620 | 0,314 |
| | Σ | | | 1 | 1,000 | 1,001 | 1,000 | 1,000 | 1,001 |

* Указаны начальное содержание фракций (P_{oj}), средние размеры зерен (d_j) и константы скорости измельчения (k_j)

В целом по экспериментальному массиву данных коэффициент корреляции составил $R=0,530$ при его значимости $t_R=2,30 > 2$, что соответствует адекватности использованной модели с 95% уровнем ее достоверности. Наибольшее расхождение отмечаются для самой тонкой фракции, которая в опытных данных представлена суммарно классом $-0,071 \text{ мм}$.

Следует отметить, что подобные расхождения могут быть вызваны целым рядом причин, обусловленных неточной оценкой входящих в константу скорости (13) величин, среди которых могут иметь значение такие как приблизительная оценка энергии активации и молекулярной массы руды через характеристики для чистого кварца; недостаточно строгое выражение высоты падения шаров через половину внутреннего диаметра мельницы, особенно для мельниц малого лабораторного размера (140 мм); трудность учета действительной температуры внутри мельницы, которая может заметно отличаться от температуры окружающей среды, особенно в периодическом режиме работы лабораторной мельницы; представление размера фракции d_j через среднеарифметическую величину от размера верхнего и нижнего сита, особенно для самой нижней фракции ($-0,071 \text{ мм}$); несоответствие среднего межситового размера зерен d_j ступенчатости их фактического разрушения по закону (14). Помимо этого возможна неполная реализация водопадного режима при частичном совмещении с режимом перекачивания, сопровождаемого истиранием и повышенным выходом тонких фракций.

Тем не менее на фоне таких разнообразных помех впервые подтверждена действительность вероятностной теории измельчения, представленной без каких-либо эмпирических поправок, в наиболее «чистом» виде, без регулярного завышения или занижения расчетных величин относительно всего экспериментального массива. Особенно важно то, что эта адекватность достигнута за счет учета в константе скорости (13) содержания воды в смеси шаров и рудных зерен, так как без этого учета по-

лучается совершенно неадекватная картина процесса, вызванная существенным завышением константы скорости (таблица 2).

Таблица 2 -Зависимость опытного и расчетного выхода фракций ($P_{j,\text{э}}$ и $P_{j,\text{р}}$) от продолжительности (τ) измельчения забалансовой медносульфидной руды без учета содержания воды

| j | $d_j, \text{м}$ | $k_j, \text{с}^{-1}$ | P_{0j} | $\tau = 60 \text{ с}$ | | $\tau = 300 \text{ с}$ | | $\tau = 900 \text{ с}$ | |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| | | | | $P_{j,\text{э}}$ | $P_{j,\text{р}}$ | $P_{j,\text{э}}$ | $P_{j,\text{р}}$ | $P_{j,\text{э}}$ | $P_{j,\text{р}}$ |
| 1 | $3,500 \cdot 10^{-4}$ | $2,263 \cdot 10^{-2}$ | 1 | 0,652 | 0,257 | 0,238 | 0,001 | 0,008 | 0,000 |
| 2 | $1,500 \cdot 10^{-4}$ | $1,231 \cdot 10^{-2}$ | 0 | 0,199 | 0,484 | 0,407 | 0,052 | 0,262 | 0,000 |
| 3 | $8,550 \cdot 10^{-5}$ | $7,160 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0,012 | 0,220 | 0,041 | 0,280 | 0,110 | 0,006 |
| 4 | $4,275 \cdot 10^{-5}$ | $3,599 \cdot 10^{-3}$ | 0 | - | 0,037 | - | 0,434 | - | 0,121 |
| 5 | $2,138 \cdot 10^{-5}$ | $1,802 \cdot 10^{-3}$ | 0 | - | 0,002 | - | 0,200 | - | 0,415 |
| 6 | $1,069 \cdot 10^{-5}$ | $9,001 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,032 | - | 0,353 |
| 7 | $5,344 \cdot 10^{-6}$ | $4,509 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,002 | - | 0,096 |
| 8 | $2,671 \cdot 10^{-6}$ | $2,255 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,000 | - | 0,009 |
| Выход фракции $-7,1 \cdot 10^{-5}$ | | | | 0,137 | 0,039 | 0,314 | 0,668 | 0,62 | 0,994 |
| Σ | | | 1 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,001 | 1,000 | 1,000 |

При расчете P_j с учетом содержания воды очевидно, что комплексное влияние этих помех отражается на константе скорости измельчения (13), содержащей неточно заданные переменные. Следовательно, влияние этих помех можно учесть в виде единого поправочного коэффициента, если возможно определить опытное значение k_j для какой-либо из фракций. Наиболее просто это можно сделать для первой, самой крупной фракции, ее выход выражается:

$$P_1 = P_{01} e^{-k_1 \tau} \quad (16)$$

Освобождая k_1 , получим

$$k_1 = \frac{\ln(P_{01} / P_1)}{\tau} \quad (17)$$

В эту формулу нужно подставлять экспериментальные значения $P_{01,\text{э}}$, $P_{1,\text{э}}$ и $\tau_{\text{э}}$ для каждой продолжительности, находя

$$k_{1,\text{э}} = \frac{\ln(P_{01,\text{э}} / P_{1,\text{э}})}{\tau_{\text{э}}} \quad (18)$$

с последующим их усреднением

$$\bar{k}_{1,\text{э}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{1,\text{э}i} \quad (19)$$

и определением адаптационного коэффициента

$$k_a = \bar{k}_{1,3} / k_1, \quad (20)$$

где k_1 – теоретическое значение константы скорости, вычисленное по формуле (13) для первой фракции.

Результаты расчета опытного значения константы скорости приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Определение опытной константы скорости по выходу первой фракции

| | | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\tau, \text{с}$ | 60 | 300 | 900 |
| $P_{1,3}$ | 0,652 | 0,238 | 0,008 |
| $k_{1,3}$ | $7,128 \cdot 10^{-3}$ | $4,785 \cdot 10^{-3}$ | $5,365 \cdot 10^{-3}$ |

Полученные значения $k_{1,3}$ не обнаруживают регулярного повышения или понижения, составляя в среднем величину $\bar{k}_{1,3} = (5,759 \cdot 10^{-3} \pm 1,220 \cdot 10^{-3}) \text{ с}^{-1}$ с соблюдением однородности множества по критерию Налимова [7, 8]

$$r_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\left| \bar{x} - x_{\frac{\max}{\min}} \right|}{S(x) \sqrt{(n-1)/n}} \leq r_{cr}, \quad (21)$$

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (22)$$

где: $x_{\frac{\max}{\min}}$ – минимаксная величина множества; \bar{x} – среднее значение; $S_{(x)}$ – среднеквадратическая ошибка; n – объем множества.

Нормативные (критические) значения критерия Налимова r_{cr} с точностью до 5% аппроксимированы уравнением [9]

$$r_{cr} = 1,483 f^{0,187}, \quad (23)$$

где $f = n - 2$ – число степеней свободы критерия Налимова.

В рассматриваемой задаче $S_{(x)} = 1,220 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $x_{\frac{\max}{\min}} = 7,128 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $n = 3$, $f = 1$, $r_{cr} = 1,483$, $\bar{x} = \bar{k}_{1,3} = (5,759 \cdot 10^{-3} \pm 1,220 \cdot 10^{-3})$. При этом неравенство (21) выразится через фактическое значение критерия Налимова как

$$r_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\left| 5,759 \cdot 10^{-3} - 7,128 \cdot 10^{-3} \right|}{1,220 \cdot 10^{-3} \sqrt{2/3}} = 1,374 < 1,483, \quad (24)$$

т.е. неравенство удовлетворяется, критерий однородности соблюдается и величина $\bar{k}_{1,э}$ является представительной для рассматриваемого множества $k_{l,эi}$.

Это позволяет использовать опытное значение константы скорости измельчения для коррекции теоретической величины $k_j=4,158 \cdot 10^{-3}$ (таблица 1) с коэффициентом адаптации

$$k_a = 5,759 \cdot 10^{-3} / 4,158 \cdot 10^{-3} = 1,383 \quad (25)$$

точно также, как и остальных значений k_j в таблице 1.

Результаты расчета $P_{jс}$ учетом адаптированных значений k_j приведены в таблице 4.

Здесь корреляция опытных и расчетных данных явно улучшилась в сравнении с чисто теоретическим описанием множества при $R=0,673$ и $t_R=3,89 > 2$, причем выход фракции $-0,071$ мм при 900 с оказался вполне сопоставимым с расчетным значением.

Следует отметить, что предпринятая проверка вероятностной теории измельчения является далеко не полной ни по используемым материалам, ни по фракционному составу измельчаемого тела, ни по числу проверяемых точек, ни по размеру мельницы. Эта работа может быть продолжена на систематической основе. Пока же можно констатировать в целом удовлетворительное согласие теоретических и опытных данных для принципиально новой теории измельчения, открытой не только для проверки, но и для ее уточнения и развития.

Таблица 4 -Зависимость опытного и расчетного выхода фракций ($P_{j,э}$ и $P_{j,р}$) от продолжительности (τ) измельчения забалансовой медносульфидной руды с использованием адаптированных констант скоростей

| <i>j</i> | $d_{j,м}$ | $k_{j,с^{-1}}$ | P_{oj} | $\tau = 60 с$ | | $\tau = 300 с$ | | $\tau = 900 с$ | |
|----------|---------------------------------------|-----------------------|----------|---------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|
| | | | | $P_{j,э}$ | $P_{j,р}$ | $P_{j,э}$ | $P_{j,р}$ | $P_{j,э}$ | $P_{j,р}$ |
| 1 | $3,500 \cdot 10^{-4}$ | $5,757 \cdot 10^{-3}$ | 1 | 0,652 | 0,708 | 0,238 | 0,178 | 0,008 | 0,005 |
| 2 | $1,500 \cdot 10^{-4}$ | $3,132 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0,199 | 0,265 | 0,407 | 0,467 | 0,262 | 0,119 |
| 3 | $8,550 \cdot 10^{-5}$ | $1,821 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 0,012 | 0,026 | 0,041 | 0,286 | 0,110 | 0,376 |
| 4 | $4,275 \cdot 10^{-5}$ | $9,156 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,001 | - | 0,064 | - | 0,371 |
| 5 | $2,138 \cdot 10^{-5}$ | $4,584 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,005 | - | 0,116 |
| 6 | $1,069 \cdot 10^{-5}$ | $2,293 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,000 | - | 0,013 |
| 7 | $5,344 \cdot 10^{-6}$ | $1,147 \cdot 10^{-4}$ | 0 | - | 0,000 | - | 0,000 | - | 0,001 |
| | Выход фракции $-7,1 \cdot 10^{-5}$ | | | 0,137 | 0,001 | 0,314 | 0,069 | 0,620 | 0,501 |
| | Σ | | | 1 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,001 |

Выводы. В вероятностную модель измельчения внесено дополнение по учету объемной доли воды в смеси с измельчаемыми и мелющими телами.

Проверка уточненной модели в лабораторных условиях мокрого измельчения свидетельствует о необходимости данного уточнения и неприменимости в подобном случае модели сухого измельчения.

Прямая проверка теоретической модели измельчения по данным переработки монофракции медносульфидной руды в лабораторной шаровой мельнице при водопадном режиме работы показала, что опытные и расчетные данные находятся в удовлетворительном согласии.

Адекватность вероятностной модели улучшается при использовании коэффициента адаптации константы скорости измельчения на основе обработки данных для самой крупной фракции.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Малышев В.П. Разработка теории соударений для измельчения материалов // Комплексное использование минерального сырья. – 1992. - №12. – С.43-49.
- 2 Малышев В.П. Новый аспект в теории измельчения руд и управления этим процессом // Обогащение руд. – 1995. - №4-5(240-241). – С.4-14.
- 3 Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Кайкенов Д. Развитие теории измельчения руд на основе молекулярных подходов // Обогащение руд. – 2012. - №4. – С. 29-35.
- 4 Малышев В.П. Самоорганизация процесса измельчения руд в шаровых мельницах как результат подобию с кинетикой последовательных химических реакций // Автоматика-информатика. – 2012. - №3-4. – С. 15-31.
- 5 Ходаков Г.С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 308 с.
- 6 Малышев В.П., Абдрахманов Б.Т., Нурмагамбетова А.М. Плавкость и пластичность металлов. – М.: Научный мир, 2004. – 148 с.
- 7 Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. – М.: Металлургия, 1969. – 159 с.
- 8 Налимов В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 207 с.
- 9 Малышев В.П., Телешев К.Д., Нурмагамбетова А.М. Разрушаемость и сохранность конгломератов. – Алматы: НИЦ Ғылым, 2003. – 336 с.

Түйіндеме

Мақалада лабораториялық шарлы ұнтақтақтағышты мыс-сульфидті балансты кеннің монофракциясы өндірілген корсеткіштер бойынша теориялық ұнтақтау моделінің тексерілуі жүргізіледі. Ықтималдық моделінің дәлдігі ең ірі фракция үшін өңделген корсеткіштерді негізге алып ұнтақтау жылдамдығының константасының коэффициентін қолданғанда жақсарайды. Сонымен қатар лабораториялық жағдайдағы сулы ұнтақтау ұнтақаталынатын және ұнтақтаушы денелер араласқандағы судың аудандық алатын дәрежесін ескіре отырып модельдің анықтау қажеттілігі өседі. Кеннің және ұнтақтаушы шарлардың сипаттамасы негізінде бастапқы деректерді, сонымен қатар ұнтақтағыш параметрлерін және жұмыс істеу режимін енгізіп ұнтақтау процесі нездегі фракцияны есептеу алгоритмі әзірленген. Берілген тексеріс қолданбалы ықтималды ұнтақтау моделіне бірінші рет өткізімен және қолданылатын модельдің қатандығын толықтай айғақтайды.

Түйінді сөздер: шарлы ұнтақтақтағыш, баланстан тыс кен, ұнтақтау жылдамдығының константасы

Summary

The paper presents checking of theoretical model of grinding by data of processing off-balance copper sulfide ore mono-fraction in the laboratory ball mill at a waterfall mode. It is shown that the adequacy of the probabilistic model is improved by using adaptation coefficient of grinding

rate constant through the data processing for the largest fraction. It is established necessity to improve the model in the laboratory wet milling regime by taking into account the volume portion of water in the mixture with bodies which are grinded and grinding body. The algorithm for fractions calculation at the grinding process with the introduction of the original data based on characteristics of the ore and grinding balls, as well as the parameters and operation mode of the mill was developed. This checking applied to the probabilistic model of grinding was carried out first time and generally it indicates the severity of used model.

Keywords: ball mill, off-balance ore, grinding, copper sulfide ore, mathematical modeling

Поступила 29. 01. 2013.