

УДК 622.7.092

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ИЗМЕЛЬЧЁННОЙ РУДЫ ПО КРУПНОСТИ В ПОТОКЕ ПУЛЬПЫ

Моркун В.С., Моркун Н.В.

ULTRASONIC CONTROL OF THE DISTRIBUTION OF PARTICLES OF CRUSHED ORE BY SIZE IN PULP FLOW

Morkun V.S., Morkun N.V.

В статье приведен метод определения гранулометрического состава частиц твёрдой фазы пульпы, основанный на использовании радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для предварительного их пространственного разделения по крупности и плотности. Предлагаемый метод измерений не требует предварительной дегазации пульпы, поскольку под действием радиационного давления ультразвука газовые пузырьки удаляются из зоны измерений.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пульпа, крупность частиц.

1. Введение. Для эффективного управления технологическими процессами обогатительных фабрик необходимы три вида контролируемых параметров, характеризующих соответственно качество и количество перерабатываемых рудных материалов, а также производственные ситуации, состояние технологического оборудования [7,8].

2. Анализ последних исследований и публикаций.

Известные методы ультразвукового контроля параметров пульпы позволяют определить две ее основные характеристики - плотность и гранулометрический состав [1,2,9,10].

В работе [9] показано, что перспективным направлением определения параметров твердой фазы пульпы является использование параметров процесса распространения ультразвуковых волн различных типов в контролируемой среде.

3. Материалы и результаты исследования.

Пульпа представляет собой случайно неоднородную гетерогенную среду, содержащую в воде твердые частицы различного размера с распределением, описываемым функцией $F(r)$, где r - радиус частиц. Содержание частиц в пульпе может быть задано либо через концентрацию

$$n = N \cdot V^{-1}, \quad (1)$$

либо через их объемную долю W . Амплитуда ультразвуковой волны частоты ν , прошедшей в среде расстояние Z , описывается зависимостью

$$A_\nu(Z) = A_0 \exp\left\{-ZN/V^0 \int_0^{r_m} dr F(r) \sigma(\nu, r)\right\}, \quad (2)$$

где N - число частиц в эффективном контролируемом объеме пульпы V ; A_0 - амплитуда объемной волны, прошедшей то же расстояние в чистой воде; r_m - максимальный размер твердых частиц.

В этом выражении $\sigma(\nu, r)$ - сечение ослабления ультразвука частоты ν на твердой частице сферической формы радиуса r и плотности ρ_T [1,2]

$$\sigma(\nu, r) = \sigma_\nu + 1/(\sigma_s^{-1} + \sigma_d^{-1}), \quad (3)$$

$$\frac{4\pi r^3}{3} \left(\frac{\omega}{c}\right) \left(\frac{\rho_T}{\rho_0} - 1\right)^2 \frac{S}{S^2 + \left(\frac{\rho_T}{\rho_0} + \tau\right)^2};$$

где $\sigma_\nu =$

$\omega = 2\pi\nu$, c - скорость ультразвука в среде;

$$S = \frac{9}{4Br} \left(1 + \frac{1}{Br}\right);$$

ρ_0 - плотность жидкости;

$$B = \left(\frac{\pi\nu}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}; \tau = \frac{1}{2} + \frac{9}{4Br}; \mu = \eta/\rho_0;$$

η - коэффициент вязкости жидкости;

$$\sigma_s = \frac{4\pi r^3}{3} \frac{1}{6} \left(\frac{\omega}{c}\right)^4 r^3; \sigma_d = \frac{4\pi r^3}{3} \left(\frac{\omega}{c}\right)^{\frac{1}{3}} / 4\pi r.$$

В выражении (3) величины σ_v и σ_d определяют вязкоинерционные и дифракционные потери, а σ_s - потери, обусловленные рассеянием ультразвука.

Как видно из выражения (2), если сформировать сигнал

$$A = \frac{1}{Z} \ln(I_o/I_v) = \frac{N}{V} \int_0^{r_m} drF(r)\sigma(v,r), \quad (4)$$

то он содержит информацию о концентрации частиц твердой фазы и распределении их по размерам.

Интеграл в выражении (4) можно представить в виде

$$\int_0^{r_m} drF(r)\sigma(v,r) = \int_0^{r_1} drF(r)\sigma(v,r) + \int_{r_1}^{r_2} drF(r)\sigma(v,r) + \dots + \int_{r_{m-1}}^{r_m} drF(r)\sigma(v,r), \quad (5)$$

где r_i - границы интервалов размеров частиц

$$\Delta r_i = r_i - r_{i-1}. \quad (6)$$

Если величина интервала Δr_i невелика, то любой из интегралов правой части выражения (5) можно представить в виде

$$\int_{r_{i-1}}^{r_i} drF(r)\sigma(v,r) \approx F(r_i)\Delta r_i\sigma(v,r_i). \quad (7)$$

Таким образом, выражение (4) можно представить в следующем виде

$$A = \frac{N}{V} \sum_{i=1}^m f(r_i) \Delta r_i \sigma(v,r_i), \quad (8)$$

где $\alpha(v,r_i) \equiv \sigma(v,r_i)$; c_i - концентрация частиц, размеры которых принадлежат интервалу Δr_i .

Если такие сигналы сформировать на различных частотах v_j ($1 \leq j \leq m$), то будем иметь систему алгебраических уравнений

$$A_j = \sum_{i=1}^m c_i \alpha_{ji}, \quad (9)$$

где $\alpha_{ji} \equiv \alpha(v_j, r_i) = \Delta r_i \sigma(v_j, r_i)$.

Коэффициенты α_{ji} определяются сечениями ослабления $\sigma(v_j, r_i)$. Выбор частот v_j осуществляется через длину волны ультразвука λ_j и размер частиц r_1 и r_m , причем максимальная длина волны должна

соответствовать радиусу r_m , а минимальная равна r_1 . Описанный метод нашел отражение в работе [4].

Недостатки этого метода определения концентрации частиц по размерам очевидны. Во-первых, точность определения концентрации c_i зависит от числа уравнений системы (9) и, в значительной мере, от погрешности измерения сигнала A_j . Для достаточного описания распределения частиц по размерам необходимо, чтобы $m \geq 10$. В области низких частот ($v < 1$ МГц) погрешность измерения A_j может быть связана с влиянием газовых пузырьков пульпы. Чтобы повысить точность измерения сигналов A_j на низких частотах, требуется предварительная дегазация пульпы. Во-вторых, требование выполнения условия $m \geq 10$ практически связано с реализацией большого количества ультразвуковых измерительных каналов.

Этих недостатков лишён метод определения гранулометрического состава частиц твёрдой фазы пульпы, основанный на использовании радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для предварительного их пространственного разделения по крупности и плотности [5,6,7,8,9].

Характер изменения концентрации частиц и распределения их по размерам в поле высокоэнергетического ультразвука зависит от плотности самих частиц, частоты и интенсивности воздействующего излучения [2,3,4,9]. Оценим влияние радиационного давления ультразвука на изменение концентрации частиц радиуса r . Пусть в положительном направлении оси x течет пульпа со скоростью V . Обозначим через $n_r(Z,t)$ концентрацию частиц радиуса r на глубине Z в момент времени t . С учётом вышеизложенного можно записать

$$\frac{\partial n_r(Z,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z,t)n_r(Z,t)] \quad (10)$$

В этом уравнении $V_r(Z,t)$ - скорость смещения частицы радиуса r с координатой Z в ультразвуковом поле. Скорость направлена вдоль оси z , т.е. перпендикулярна потоку пульпы.

Полагая, что интенсивность ультразвуковой волны I изменяется по экспоненциальному закону (первоначальное значение I_0), коэффициент её затухания α зависит от частоты звука v_0 и с учётом анализа, выполненного в работе [2], концентрация частиц $n_r(Z,t)$ определяется по формуле

$$n_r(Z,t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z} - 1 - \alpha \beta t) \quad (11)$$

где $n_r(Z,0) = n_0$, $n_r(0,t) = 0$ - начальные и граничные условия;

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ 1, & X \geq 0; \end{cases}$$

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0(a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2);$$

$$B_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c_{\square}^2};$$

$$B_2 = 2 \frac{\rho_{\square} - \rho}{2\rho_{\square} + \rho};$$

$\rho_{\square}, c_{\square}$ - плотность частицы и скорость ультразвука в материале частицы; ρ, c - плотность исследуемой среды и скорость ультразвука в ней.

Смещение частиц твердой фазы рудной суспензии приводит к их перераспределению по размеру и концентрации в зоне воздействия высокоэнергетических ультразвуковых колебаний (Рис. 1) [7,8,9].

При увеличении интенсивности высокоэнергетического ультразвука от нуля до определенного значения и постоянной скорости потока пульпы в зону измерений могут быть смещены все или только интересующие классы крупности измельченного материала.

В низкочастотной области ($\nu \leq 10^5$ Гц) ослабление ультразвука обусловлено, в основном, вязкоинерционными потерями, поэтому $\sigma \approx \sigma_{\nu}$.

Тогда сформированный на частоте $\nu_1 \leq 10^5$ Гц сигнал

$$S_1 = \ln \left(\frac{A_{01}}{A_{\nu_1}} \right) = \frac{Z_1 W}{N} \frac{\int_0^{r_m} F(r) \sigma_{\nu}(v_1, r) dr}{\int_0^{r_m} F(r) \sigma_{\nu}(v_1, r) dr} = \frac{Z_1 W}{N} \quad (12)$$

будет пропорционален концентрации твердой фазы пульпы, так как он зависит от объемной доли W твердой фазы [10]. В этом выражении

$$N = \int_0^{r_m} F(r) \frac{4}{3} \pi r^3 (dr). \quad (13)$$

Следовательно, по величине сигнала S_1 можно судить о плотности пульпы или содержании в ней твердой фазы.

В соответствии с вышеизложенным будем контролировать в зоне измерений в каждый текущий момент времени величину S_1 . Тогда при известном законе изменения интенсивности высокоэнергетического ультразвука получим функцию распределения по крупности частиц измельченного материала в потоке пульпы. Предлагаемый метод измерений не требует предварительной дегазации пульпы, поскольку под действием радиационного давления ультразвука газовые пузырьки удаляются из зоны измерений.

4. Выводы. Таким образом, измерение интенсивности высокочастотных ультразвуковых колебаний, прошедших через контролируемый объем пульпы, в процессе воздействия на неё высокоэнергетического ультразвука известной интенсивности позволяет оценить гранулометрический состав её твердой фазы.

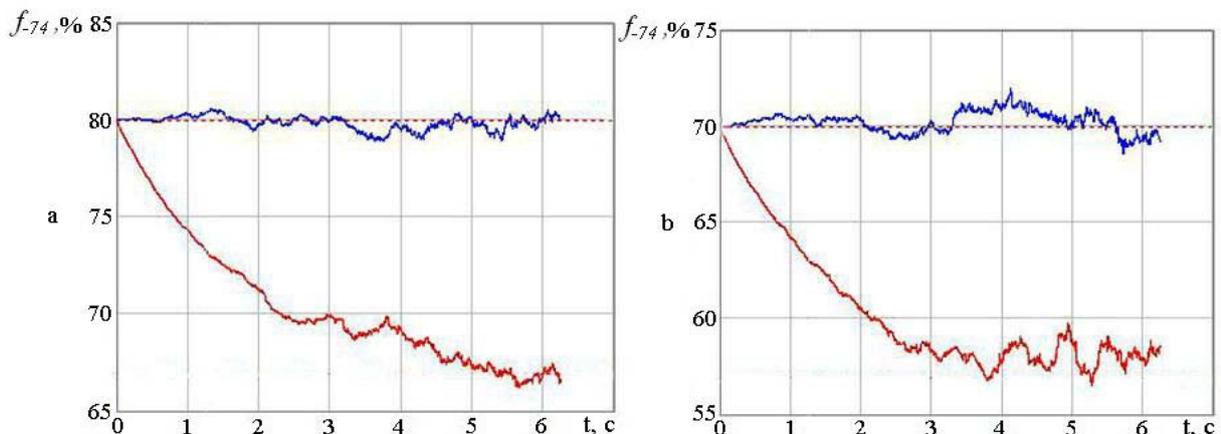


Рис. 1. Изменение крупности частиц в контролируемом объеме пульпы под воздействием радиационного давления высокоэнергетического ультразвука (плотность пульпы - 1250 г/л, первоначальное содержание класса -74 мкм - 80% (а) и 70% (б)).

Литература

1. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль параметров случайно неоднородных гетерогенных сред / Моркун В.С., Потапов В.Н. - Горн. журн. Изв. вузов, 1992. - № 8. - С. 126-128.
2. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: / В.С. Моркун. - Дисс. ... докт. техн. наук: 0.5.13.07. - Кривой Рог, 1999. - 401 с.
3. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Механика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.: ГИТТЛ, 1954. - 796 с.
4. Пат. 3438798 А1 Германия, МКИ G 01 N 15/02. Verfahren und Vorrichtung zum Messen der Feststoffkonzentration und der Korngobenverteilung in einer Suspension mittels Ultraschall/Löffler F.(Германия) - № 58730; Заявл. 23.10.84; Оpubл. 24.04.86.- 14 с.
5. Агранат Б.А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука. - М.: Машиностроение, 1969. - 47 с.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Изд-во иностран. лит., 1957. - 726 с.
7. Моркун В.С. Энергоэффективное автоматизированное управление процессом обогащения руды с распознаванием ее технологических разновидностей / В.С. Моркун, В. В. Тронь, С. А. Гончаров, Н. С. Подгородецкий. - Кривой Рог, 2014. - 326 с.
8. Моркун В.С. Оптимальное управление процессом обогащения железной руды / В. С. Моркун, Н. В. Моркун, В. В. Тронь. - LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2015. - 310 с.
9. Моркун В.С., Потапов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства. - Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. - 283 с.
10. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик твердой фазы пульпы / Моркун В.С., Потапов В.Н. - Обогащение руд, 1992. - №2. - С. 41-45.
6. Bergman L. Ultrazvuk i ego primenenie v nauke i tehnike. - M.: Izd-vo inostran. lit., 1957. - 726 s.
7. Morkun V.S. Energoeffektivnoe avtomatizirovannoe upravlenie protsessom obogascheniya rudyi s raspoznavaniem ee tehnologicheskikh raznovidnostey / V.S. Morkun, V. V. Tron, S. A. Goncharov, N.S. Podgorodetskiy. - Krivoy Rog, 2014. - 326 s.
8. Morkun V.S. Optimalnoe upravlenie protsessom obogascheniya zheleznoy rudyi / V.S. Morkun, N.V. Morkun, V. V. Tron. - LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2015. - 310 s.
9. Morkun V.S., Potapov V.N., Morkun N.V., Podgorodetskiy N.S. Ultrazvukovoy kontrol harakteristik izmelchennyih materialov v ASU TP obogatitel'nogo proizvodstva. - Krivoy Rog: Izd. tsentr KTU, 2007. - 283 s.
10. Morkun V.S. Ultrazvukovoy kontrol harakteristik tverдой fazyi pulpyi / Morkun V.S., Potapov V.N. - Obogaschenie rud, 1992. - #2. - S. 41-45.

Моркун В.С., Моркун Н.В. Ультразвуковой контроль распределения частиц измельченной руды по крупности в потоке пульпы

В статье приведен метод определения гранулометрического состава частиц твердой фазы пульпы, основанный на использовании радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для предварительного их пространственного разделения по крупности и плотности. Предлагаемый метод измерений не требует предварительной дегазации пульпы, поскольку под действием радиационного давления ультразвука газовые пузырьки удаляются из зоны измерений.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пульпа, крупность частиц.

Morkun V.S., Morkun N.V. Ultrasonic control of the distribution of particles of crushed ore by size in pulp flow

The article gives a method for determining the particle size distribution of the solid phase of the pulp, based on the use of high-energy radiation pressure of ultrasound prior to their spatial separation by size and density. The proposed method of measurement does not require prior degassing of the pulp, because under the influence of ultrasound radiation pressure gas bubbles are removed from the measurement area.

Keywords: ultrasonic testing, pulp, particle size.

Моркун Владимир Станиславович – д.т.н., профессор, проректор по науке, ГВУЗ «Криворожский национальный университет» (г. Кривой Рог).

Моркун Наталья Владимировна – к.т.н., доцент, доцент кафедры экономической кибернетики и управления проектами, ГВУЗ «Криворожский национальный университет» (г. Кривой Рог).

Рецензент: Поркуян О.В. - д.т.н., профессор

Статья подана 16.11.2015

References

1. Morkun V.S. Ultrazvukovoy kontrol parametrov sluchayno neodnorodnyih geterogennyih sred / Morkun V.S., Potapov V.N. - Gorn. zhurn. Izv. vuzov, 1992. - # 8. - S. 126-128.
2. Morkun V.S. Ultrazvukovoy kontrol harakteristik izmelchennyih materialov i adaptivnoe upravlenie protsessami izmelcheniya-klassifikatsii rud na ego baze: / V.S. Morkun. - Diss. ... dokt. tehn. nauk: 0.5.13.07. - Krivoy Rog, 1999. - 401 s.
3. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. Mehanika sploshnyih sred / L.D. Landau, E.M. Lifshits. - M.: GITTL, 1954. - 796 s.
4. Pat. 3438798 A1 Germaniya, MKI G 01 N 15/02. Verfahren und Vorrichtung zum Messen der Feststoffkonzentration und der Korngobenverteilung in einer Suspension mittels Ultraschall / Löffler F. (Germaniya) - # 58730; Zayavl. 23.10.84; Opubl. 24.04.86.- 14 s.
5. Agranat B.A. Fizicheskie osnovyi tehnologicheskikh protsessov, protekayuschih v zhidkoy faze s vozdeystviem ultrazvuka. - M.: Mashinostroenie, 1969. - 47 s.