

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф.,  
 А.В. ПИКИЛЬНЯК, аспирант, Н.С. ПОДГОРОДЕЦКИЙ, канд. техн. наук  
 ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПО РАЗМЕРАМ В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ

Приведено описание метода, позволяющего эффективно управлять составом газовой фазы пульпы в процессе флотации с использованием динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука.

**Ключевые слова:** кавитация, ультразвук, флотация, пульпа, газовая фаза, управление

**Проблема и ее связь с практическими задачами.** Эффективность процесса флотации напрямую связана с числом столкновений между частицами и газовыми пузырьками, которое зависит от соотношения их размеров. Размер газовых пузырьков является одной из наиболее важных характеристик, влияющих на эффективность процесса пенной флотации. Тем не менее, контроль и управление этим параметром является весьма сложной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Использование ультразвука в технологии флотации связано с рядом специфических явлений, возникающих при распространении ультразвуковых колебаний в жидких средах. Среди этих явлений особое место занимает кавитация. Она выражается в появлении в жидкости газовых пузырьков (полостей), в которых происходят ионизация молекул и атомов, повышение давления (до нескольких тысяч атмосфер) и температуры (на сотни градусов). Установлено, что газовые (кавитационные) пузырьки легче образуются на границе жидкого с твердым, энергично воздействуя на поверхность последнего.

Для того, чтобы обеспечить оптимальные условия процесса флотации, необходимо, чтобы распределение газовых пузырьков и частиц руды по крупности были близки. Поскольку распределение газовых пузырьков по размерам является важным фактором в исследованиях кавитации, в особенности ее возникновения, очень важно иметь возможность охарактеризовать исследуемую жидкость и ее свойства в отношении не только общего содержания воздуха, но также с точки зрения фактического распределения газовых пузырьков по размерам.

**Цель исследований.** Задачей исследований является формирование управления распределением газовых пузырьков по размерам при помощи воздействия высокоэнергетического ультразвука на исследуемую среду.

**Изложение материала и результаты.** Для формирования необходимых характеристик газовых пузырьков в пульпе предлагается использовать динамические эффекты высокоэнергетического ультразвука [1].

Наличие в жидкости газовых пузырьков приводит к поглощению и рассеянию ультразвуковой энергии. Поглощение и рассеяние на газовых пузырьках носит резонансный характер [2,3].

Основными причинами этого являются:

нагрев пузырька и отвод тепла в жидкость при периодических изменениях объема пузырька, которые он испытывает под действием ультразвуковой волны;

рассеяние части энергии, обусловленное тем, что колеблющийся пузырек является сферическим излучателем ультразвука;

потери энергии за счет образования потоков жидкости вокруг колеблющегося пузырька.

Полное сечение ослабления ультразвука на газовых пузырьках определяется следующим выражением [1,2]

$$\sigma_{ps} = 4\pi R^2 \left/ \left( \frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right)^2 + \alpha \right. , \quad (1)$$

где  $R$  - радиус пузырька;  $\omega_0$  - резонансная частота пузырька с радиусом  $R$ ;  $\alpha$  - постоянная затухания.

Для случая газовых пузырьков в воде значение резонансной частоты можно оценить по формуле, Гц·см

$$\omega_0 R = 0,328 \cdot 10^3 . \quad (2)$$

Приведенные аналитические выражения позволили синтезировать метод ультразвукового контроля характеристик газовых пузырьков в жидкой среде.

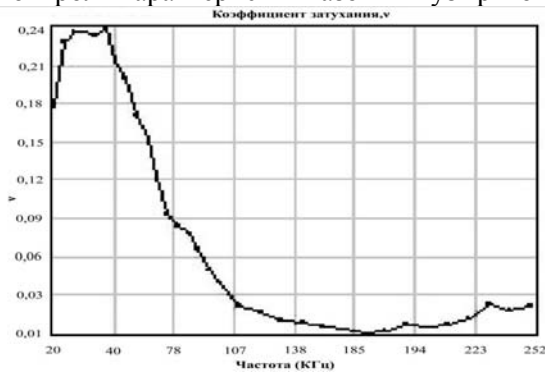


Рис. 1. Затухание ультразвука на пузырьках

Когда ультразвук с частотой  $\omega$  распространяется через среду с пузырьками, они колеблются и повторно излучают энергию в среду тем самым делая ее дисперсной. Каждый пузырек ведет себя как генератор с резонансной частотой  $\omega_0$  и логарифмическим декрементом затухания  $b$ , которые зависят от величины  $\omega$  и радиуса пузырька  $R$ . Отношение полной скорости ультразвука  $c_m$  в пульпе к скорости ультразвука в жидкости  $c_l$  определяется следующим образом [4]

$$\frac{c_l^2}{c_m^2} = 1 + 4\pi c_l^2 \int_{R_{l0}}^{R_{h1}} \frac{RN(R)}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib(R)\omega} dR, \quad (3)$$

где  $N(R)$  - распределение газовых пузырьков по размерам;  $c_l^2$  - скорость ультразвука в чистой воде;  $c_m^2$  - скорость ультразвука в пульпе.

$$\frac{c_l^2}{c_m^2} = 1 + 4\pi c_l^2 \int_{R_{l0}}^{R_{h1}} \frac{RN(R)}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib(R)\omega} dR, \quad (3)$$

где  $N(R)$  - распределение газовых пузырьков по размерам;  $c_l^2$  - скорость ультразвука в чистой воде;  $c_m^2$  - скорость ультразвука в пульпе.

Заменяя в (3)  $\omega_0$  и  $\alpha$  получим [5]

$$(c_l / c_m) = u - iv, \quad (4)$$

$$\int_R^R k_1(R, \varpi) N(R) dR = u^2 - v^2 - 1 \quad k_1 = \frac{(\varpi_0^2 - \varpi^2)R}{(\varpi_0^2 - \varpi^2)^2 + 4b^2\varpi^2}, \quad (5)$$

$$\int_R^R k_2(R, \varpi) N(R) dR = uv \quad k_2 = \frac{\alpha\varpi a}{(\varpi_0^2 - \varpi^2)^2 + 4b^2\varpi^2}$$

Величины  $u$  и  $v$  могут быть получены путем измерения фазовой скорости  $c_m$  и затухания  $A$  волны в среде с пузырьками. Затухание  $A$  в дБ на единицу длины определяется выражением

$$A = 20 \log_{10} e \left( \frac{\varpi v}{c_l} \right), \quad (6)$$

Коэффициент затухания ультразвука на газовых пузырьках может быть выражен следующей формулой

$$v(f) = - \frac{c_l \log \left[ \frac{p^2(f)}{p_{ref}^2(f)} \right]}{4\pi f d_{ER}}, \quad (7)$$

где  $d_{ER}$  - расстояние между излучателем и приемником ультразвука.

Периодически воздействуя высокоэнергетическими ультразвуковыми колебаниями на поток пульпы, в результате радиационного давления, которое при этом возникает, имеет место смещение пузырьков газовой фазы от траектории их нормального движения в потоке в направлении воздействия высокоэнергетических ультразвуковых колебаний. Смещение пузырьков газовой фазы приводит к их перераспределению по размеру и концентрации в зоне воздействия высокоэнергетических ультразвуковых колебаний [6].

Характер изменения концентрации газовых пузырьков и распределения их по размерам в поле высокоэнергетического ультразвука зависит от размера самих пузырьков, частоты и интенсивности воздействующего излучения [1].

В соответствии с изложенным необходимо контролировать в зоне измерений в каждый текущий момент времени размеры пузырьков газовой фазы пульпы и их концентрацию. Тогда при известном законе изменения интенсивности высокоэнергетического ультразвука можно получить функцию распределения газовых пузырьков по размерам в потоке пульпы.

Получив серии измерений скорости ультразвука и затухания в среде с пузырьками при наборе частот, охватывающих интересующий диапазон, решается обратная задача определения распределения газовых пузырьков по размерам, соответствующим полученным измерениям.

Экспериментальные исследования проводились при различных комбинациях расхода воздуха и воды.

Идентификация полученных зависимостей на этапе экспериментальных исследований выполнена при помощи программных средств MATLAB 7.0 [7,8]. Пакет Fuzzy Logic Toolbox, входящий в состав системы MATLAB, содержит набор GUI модулей, обеспечивающих проведение этапа структурной идентификации в диалоговом режиме. На этом этапе определяется количество входов и выходов модели, задаются количество термов и типы функций принадлежности, формируется база знаний. Пакет Fuzzy Logic Toolbox для моделей типа Сугэно обеспечивает автоматизацию этапа параметрической идентификации.

Настройку нечеткой модели типа Сугэно удобно проводить в диалоговом режиме с использованием GUI модуля anfisedit. Настройка выполняется с использованием технологии ANFIS (Adaptive Network based Fuzzy Inference System) - редакторе пакета Matlab 7.0. ANFIS - редактор автоматически синтезирует из экспериментальных данных нейро-нечёткую сеть, которую можно рассматривать как одну из разновидностей нечёткого логического вывода типа Такаги-Сугэно [6].

Настройка представляет собой итерационную процедуру нахождения параметров функций принадлежности, которые минимизируют расхождения между действительным и желаемым поведением модели.

В качестве настроечного используется метод обратного распространения ошибки или его комбинация с методом наименьших квадратов. Пакет Fuzzy Logic Toolbox позволяет автоматически синтезировать из данных нечеткую базу знаний для модели типа Сугэно. Для этого используются два алгоритма - решеточное разбиение (gridpartition) и субтрактивная кластеризация (subtractive clustering). На выходе первого алгоритма получается база знаний, содержащая всевозможные правила. В результате субтрактивной кластеризации генерируются правила, соответствующие областям наибольшей концентрации данных.

Эксперименты проведены с использованием ряда частот и средних значений для серии из 100 измерений параметров ультразвука. В этом случае программа определяет значения  $u$  и  $v$  для каждой серии, затем генерирует кривые по средним значениям  $u(f)$  и  $v(f)$  и выводит среднюю концентрацию пузырьков (рис. 2).

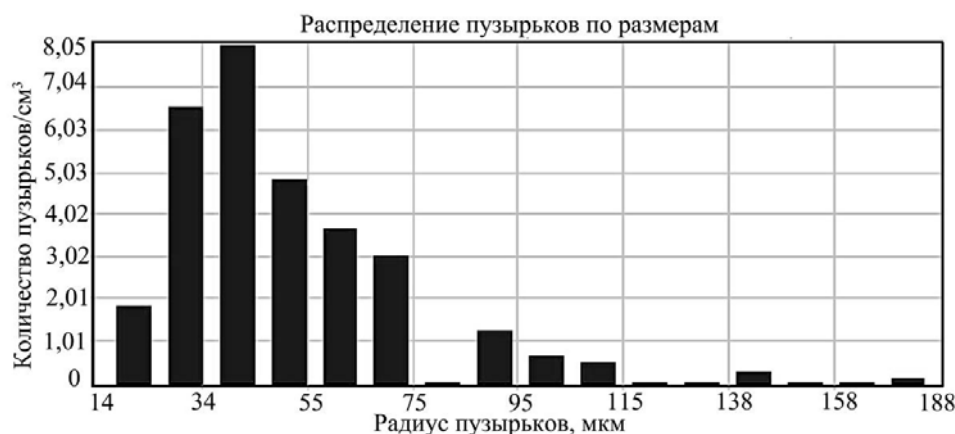


Рис. 2. Результаты экспериментального определения распределения газовых пузырьков по размерам

Полученные размеры и количество пузырьков считаются равномерно распределенными в объеме между двумя преобразователями. Эти измерения используются для того, чтобы определить распределение пузырьков по размерам в единице объема исследуемой среды.

**Вывод.** Рассмотрен метод, основанный на измерении параметров процесса распространения ультразвука через испытываемую среду при помощи которого определяется распределение газовых пузырьков по размерам. Короткие монохроматические импульсы ультразвука на разных частотах генерируются передающим пьезопреобразователем и после прохождения через среду принимаются приемным пьезопреобразователем. Полученные данные обрабатываются и

анализируются для получения частотно-зависимого затухания и фазовых скоростей ультразвуковых волн. Измерение характеристики высокочастотных ультразвуковых колебаний, прошедших через контролируемый объем пульпы, позволяют оценить функцию распределения газовых пузырьков по размерам.

Предлагаемый подход позволяет реализовать эффективное управление составом газовой фазы пульпы, а также повысить энергоэффективность всего технологического процесса флотации.

#### *Список литературы*

1. **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.
2. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике / **Л. Бергман**. - М.: Изд-во иностран. лит., 1957. - 726 с.
3. **Агранат Б.А.** Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука / **Агранат Б.А.**. - М.: Машиностроение, 1969. - 47 с.
4. **Chahine G. L., Kalumuck K. M., Cheng J-Y., Frederick G. S.** Validation of Bubble Distribution Measurements of the ABS Acoustic Bubble Spectrometer with High Speed Video Photography. CAV2001: sessionA7.004. 2001.- p.8.
5. **Prabhukumar S., Duraiswami R., Chahine G.L.**, Bubble size measurement using inverse acoustic scattering: Theory & Experiments, ASME Cavitation & Multiphase Flow Forum, 1996.
6. **Подгородецкий Н.С.** Энергоэффективное адаптивное управление замкнутым циклом измельчения руды на базе гибридной нечеткой модели: / **Н.С.Подгородецкий** - Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.07. - Кривой Рог, 2011. - 188 с.
7. Using the Control System Toolbox with Matlab 6: Computation. Visualization. Programming. The MathWorks, Inc., 2001.
8. **Coleman T.F., Y. Li.** An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds / *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, 1996. - p. 418-445.

Рукопись поступила в редакцию 03.04.13