

system design theme // Metallurgical and mining industry, No.2. – 2014. –Р. 89-93.

УДК 621.926:34.16

В.С. МОРКУН, д. т. н., проф. А.В. ПИКИЛЬНЯК, аспирант
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ 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.

Наведено опис методу, що дозволяє ефективно управляти складом газової фази пульпи в процесі флотації з використанням динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку.

Describes a method to effectively manage the composition of the gas phase of the pulp in the flotation process using the dynamic effects of high-energy ultrasound.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Для моделирования физических процессов, определяющих флотацию, необходимы точные данные о характеристиках газовой фазы, наиболее важными из которых являются концентрация и распределение газовых пузырьков по размерам. Эти параметры сильно зависят от различных эксплуатационных, технических и физико-химических факторов, воздействие которых следует учитывать при моделировании процесса флотации.

Анализ исследований и публикаций. Анализ процессов, протекающих во флотомашинах, позволяет выделить основные входные, выходные параметры, а также возмущающие воздействия [1].

Входными параметрами являются: плотность пульпы, расход реагентов, расход сжатого воздуха, уровень пульпы, степень аэрации пульпы. Возмущающими воздействиями являются: содержание металла в руде, флотируемость сырья, гранулометрический состав измельченного продукта обогащения. Выходными параметрами являются: содержание металла в концентрате, содержание металла в хвостах, производительность установки, выход концентрата, выход хвостов.

Эффективность процесса флотации напрямую связана с числом столкновений между частицами и пузырьками, которые зависят от соотношения их размеров. Размер пузырьков является одной из наиболее важных характеристик, влияющих на эффективность процесса пенной флота-

ции. Тем не менее, контроль и управление этим параметром являются очень сложными задачами.



Рис. 1. Модель флотации

Цель исследований. Задачей исследований является формирование функции распределения газовых пузырьков по размерам $f(x)$ при помощи воздействия высокоэнергетического ультразвука.

Изложение материала и результаты. Использование ультразвука в технологии флотации связано с рядом специфических явлений, сопровождающихся распространением 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.

Ультразвуковые колебания высокой интенсивности позволяют ускорить традиционные и реализовать новые процессы в жидких, твердых и газообразных средах. Эффективность таких процессов обусловлена возникновением нелинейных явлений при распространении высокоамплитудных колебаний, вызывающих кавитационные процессы, радиационное давление, микро- и макропотоки, приводящие к разрывам механических и химических связей, увеличению поверхностей и скорости взаимодействия, ускорению процессов массо- и теплопереноса.

Вследствие воздействия высокоэнергетического ультразвука происходит перераспределение газовых пузырьков по размерам. При постоянной скорости течения пульпы характеристики этого перераспределения определяются параметрами ультразвука, концентрацией и характеристиками газовой фазы пульпы [2].

Функция плотности распределения газовых пузырьков по размерам

представляет собой взвешенную сумму фиксированных компонентов распределения $\phi_j(x)$ и может быть представлена в следующем виде [3]

$$f(x, k) = \sum_{i=1}^M w_j(k) \cdot \phi_j(x), \quad (1)$$

Вес выбран таким образом, чтобы удовлетворять условиям

$$\sum_{i=1}^M w_j(k) = 1, \quad 0 \leq w_j(k) \leq 1, \quad \forall k \text{ и } j = 1, \dots, M, \quad (2)$$

Компоненты плотности распределения представлены функциями нормального распределения

$$\phi_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu_j)^2}{\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$

где μ_j – центры, σ – стандартное отклонение, фиксированное и одинаковое для всех компонентов.

Функцию плотности распределения можно выразить следующим выражением

$$f(x, k) = C(x)V(k) + \phi_M(x), \quad (4)$$

где $C(x) = [\phi_1(x) - \phi_M(x), \phi_2(x) - \phi_M(x), \dots, \phi_{M-1}(x) - \phi_M(x)]$;

$$V(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_{M-1}(k)]^T.$$

В этом случае, только веса и вектор V несут в себе информацию о входном управляющем сигнале. Если принять вектор V линейным по отношению к входному управляющему сигналу u , то могут быть получены следующие уравнения пространства состояний системы:

$$\begin{aligned} V(k+1) &= FV(k) + Gu(k) \\ f(x, k) - \phi_M(x) &= C(x)V(k) \end{aligned} \quad (5)$$

где V – состояние;

u – вход системы; $f(x) - \phi_M(x)$ – выход системы.

Эталонная функция плотности распределения задаётся выражением аналогичным (4)

$$g(x) = C(x)V_g + \phi_M(x), \quad (6)$$

где V_g – вектор целевых весов.

Если система статична, то задача формулируется, как задача оптимизации, в которой целью является минимизация разницы между эталонной и измеренной функциями распределения.

Для вычисления несоответствий между функциями плотности распределения, используем целевую функцию [4]

$$\min_u J = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [f(x,u) - g(x)]^2 dx, \quad (7)$$

Подставляя (4) и (6) в (7) получим следующее выражение

$$\min_u J = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [V(u) - V_g]^T C(x)^T C(x) [V(u) - V_g] dx = \frac{1}{2} [V(u) - V_g]^T \sum [V(u) - V_g], \quad (8)$$

где $\sum = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x)^T C(x) dx$.

Задача сводится к минимизации несоответствия между эталонной и реальной функцией распределения. Для поиска оптимального решения использован градиентный метод

$$u^{i+1} = u^i - [V(u) - V_g]^T \sum \left. \frac{\partial V(u)}{\partial u} \right|_{u=u^i}, \quad (9)$$

Результирующая весовая матрица Σ включает в себя также условие

$$\sum_{ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} [\phi_i(x) - \phi_M(x)] [\phi_j(x) - \phi_M(x)] dx.$$

Для решения поставленной задачи предлагается формировать управляющее воздействие на основе динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука с использованием технологии фазированных решеток, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными одноэлементными преобразователями.

Главная особенность технологии ультразвуковых фазированных решеток – управляемые компьютером амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе. Возбуждение пьезоэлементов осуществляется таким образом, чтобы управлять параметрами ультразвукового луча, например, углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна [5].

Акустическое давление $p(x,y,z)$ вычисляется путем моделирования группы пьезоэлементов и суммирования воздействий каждого элемента в каждой точке поля (x, y, z) , используя уравнение Релея - Зоммерфельда и может быть представлено в следующем виде [6]

$$p_i(x, y, z) = \sqrt{\frac{2W\rho}{cA}} \left(\frac{fS}{d} \right) e^{\left\{ \left(\phi - \frac{2\pi d}{\lambda} \right) i - d\alpha \right\}}, \quad (10)$$

где W - полная акустическая выходная мощность группы пьезоэлементов, ρ - плотность среды, c - скорость звука в среде, A – активная аппертура

преобразователя, f - частота, S – область, формируемая источником, d - расстояние от источника до точки (x, y, z) , φ - фаза колебаний, λ - длина волны, и α – коэффициент затухания в среде.

Активная апертура (общая длина решетки) рассчитывается по следующей формуле [5]

$$A = n \cdot e + g \cdot (n - 1), \quad (11)$$

где A – активная апертура; g – зазор между ближайшими элементами; e – ширина одного элемента (как правило $e < \lambda/2$); n – количество элементов.

Полезное давление всех пьезоэлементов, может быть получено суммированием воздействий каждого отдельного источника и представлено в следующем виде

$$P_{net}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n p_i(x, y, z), \quad (12)$$

В результате затухания полезная мощность в точке (x, y, z) определяется выражением [7]

$$q(x, y, z) = \frac{\alpha P_{net}^2(x, y, z)}{\rho c}, \quad (13)$$

Фаза каждого пьезоэлемента вычисляется по следующей формуле

$$\phi_i = \frac{360^\circ}{\lambda} (d_i - d_0) - 360^\circ n, \quad (14)$$

где ϕ_i - фаза пьезоэлемента i в градусах, d_i - расстояние от центра пьезоэлемента i до фокуса, d_0 - глубина фокуса, n - целое число, $0 \leq \phi_i \leq 360^\circ$.

На рис. 2 показано поле акустического давления 9-и элементного преобразователя в фокальной плоскости x - z при $y=0,05$ м, полученное при моделировании программно-техническими средствами пакета ТАС (Transducer Array Calculation) [8].

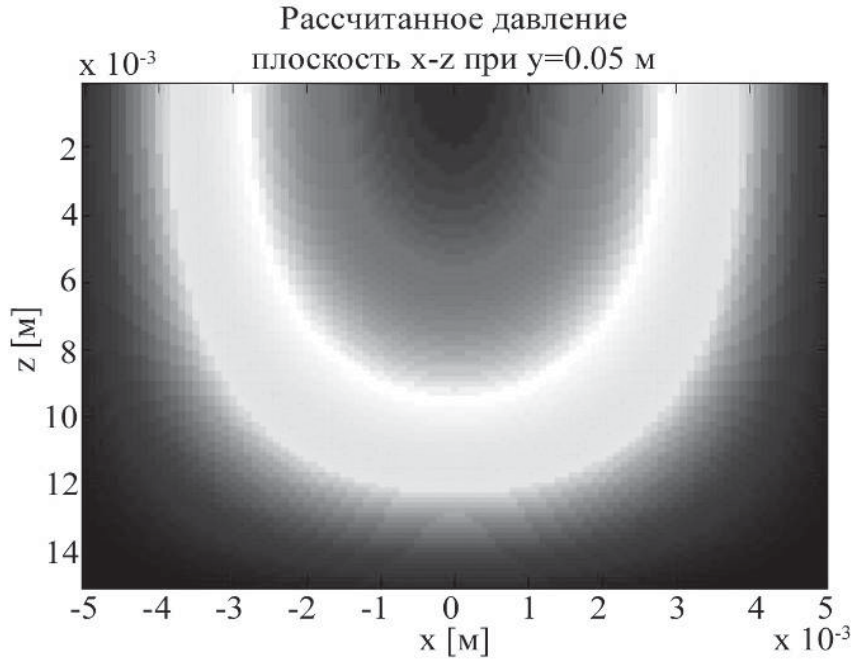


Рис. 2. Поле акустического давления в фокальной плоскости x-z

Размер газового пузырька определяется отношением между частотой ультразвуковых волн и радиусом пузырька в акустическом поле. Зависимость размера от резонансной частоты для низкого уровня акустического возбуждения выражается следующим уравнением [9]

$$f_0^{lin} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\varphi}{\rho_0 R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho_0 R_0^3}}, \quad (15)$$

где φ - показатель политропы, R_0 - начальный радиус пузырька.

Реакция пузырька на акустическую волну была смоделирована путем решения уравнения динамики пузырька Гилмора - Акуличева, которое может быть представлено в следующем виде [9]

$$R \left(1 - \frac{U}{C} \right) \frac{dU}{dt} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{U}{3C} \right) U^2 = \left(1 - \frac{U}{C} \right) H + \frac{U}{C} \left(1 - \frac{U}{C} \right) R \frac{dH}{dR}, \quad (16)$$

где R - радиус пузырька, U - скорость стенки пузырька.

В этом выражении

$$C = \left[C_0^2 + (m-1)H \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$$H = \int_{P_\infty}^{P(R)} \frac{dP}{\rho}, \quad (18)$$

где C - скорость звука на стенке пузырька, рассчитанная из бесконечно малой скорости звука в жидкости C_0 , m - константа, H - энтальпия жидкости.

Энтальпия связана с давлением в жидкости P_∞ вдали от пузырька и давлением $P(R)$ на стенке пузырька. Это давление определяется выражением

$$P_{\infty} = P_0 - P_{\text{акуст}}, \quad (19)$$

$$P(R) = P_g - \frac{2\sigma}{R} - \left(\frac{4\mu}{R}\right)U, \quad (20)$$

где P_0 – внешнее давление в жидкости; $P_{\text{акуст}}$ – акустическое давление; P_g – давление газа внутри пузырька; σ – поверхностное натяжение стенки пузырька; μ – коэффициент вязкости.

Изменяющееся во времени давление зависит от плотности жидкости ρ и может быть получено из уравнения

$$P = \alpha(\rho / \rho_0)^m - \beta, \quad (21)$$

где ρ_0 равновесная плотность жидкости, α и β – константы.

На рис. 3 показана зависимость размеров газовых пузырьков от амплитуды давления ультразвуковых колебаний для различных значений их частоты.

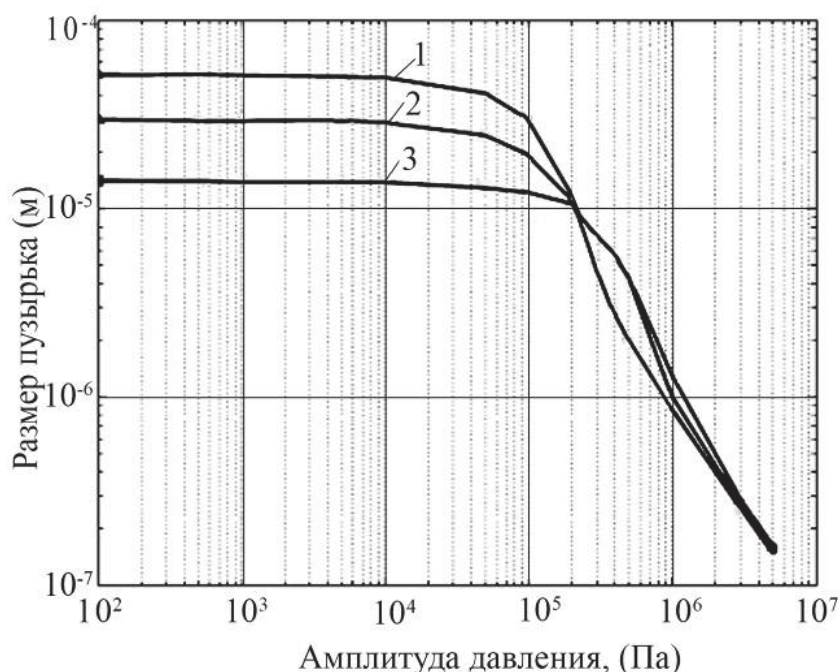


Рис. 3. Зависимость размера газового пузырька от частоты:
1 - 0,7 МГц; 2 - 1,5 МГц; 3 - 2,5 МГц.

Результаты моделирования процесса воздействия динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука на газовую фазу пульпы позволили получить зависимости параметров функции распределения газовых пузырьков по размерам от частоты и амплитуды приложенного ультразвукового воздействия.

При постоянной частоте ультразвука 0,7 МГц и формируемом давлении 10^2 - 10^4 Па размер газового пузырька остается неизменным ($5 \cdot 10^{-5}$ м), при давлении 10^4 - $2 \cdot 10^5$ Па происходит постепенное уменьшение размера пузырька ($5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-5} м), при давлении $2 \cdot 10^5$ - $5 \cdot 10^6$ Па пузырек уменьшается в размерах (10^{-5} - $1,5 \cdot 10^{-7}$ м), а при изменении частоты ультразвука (0,7 -

2,5 МГц) и давлении 10^2 Па размер газового пузырька уменьшается с $5 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-5}$ м.

Рассмотрим формирование распределения газовых пузырьков по размерам при помощи технологии фазированных решёток. При использовании такого подхода, газовые пузырьки подвергаются воздействию сразу нескольких элементов фазированной решетки, которые имеют различные характеристики. Численно это воздействие может быть выражено путём взвешенной суммы индивидуальных распределений пузырьков по размерам, создаваемых каждым элементом решетки.

$$f(x) = \sum_{j=1}^N a_j \cdot f_j(x), \quad (22)$$

при

$$\sum_{j=1}^N a_j = 1, \quad 0 \leq a_j \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (23)$$

где N - число элементов решетки, a_j – весовые коэффициенты, которые можно рассматривать как априорные вероятности выборки пузырьков, формируемых j -элементом решетки.

$f_j(x)$ является функцией распределения пузырьков по размерам, формируемых j -элементом решетки, при условии, что остальные элементы не задействованы.

На рис. 4 показана структура системы автоматического управления распределением газовых пузырьков по размерам с обратной связью на базе ультразвуковых фазированных решеток. Формирователь управляющего воздействия задаёт необходимую амплитуду и частоту ультразвуковых колебаний. Вычислительное устройство определяет параметры управляющего воздействия, которые соответствуют заданному (эталонному) распределению газовых пузырьков по размерам.

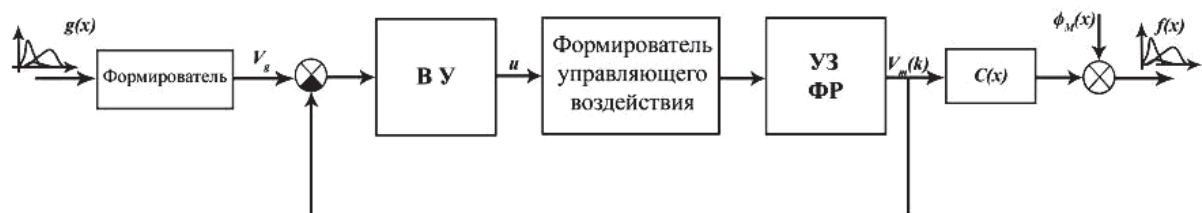


Рис. 4. Структура системы автоматического управления распределением газовых пузырьков по размерам

Выводы: Результаты проведенных экспериментальных исследований предлагаемого метода управления параметрами газовой фазы пульпы на базе технологии ультразвуковых фазированных решёток свидетельствуют о том, что такой подход позволяет повысить качество получаемого концентрата и энергоэффективность всего технологического процесса обогащения минерального сырья.

Список литературы.

1. Подоляк М.В. Автоматизация процесса флотации золотосодержащих сульфидных руд.//Молодёжь и наука. Красноярск. 2012.

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. Maldonado M. A. Advances in estimation and control for flotation columns. Du programme de doctorat en génie électrique pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (PhD) .Québec. 2010. p. 135.

4. Titterington, D., Smith A., Makow U. Statistical analysis of finite mixture distributions. John Wiley and Sons, Ind Edition. UK. 1985. p. 7.

5. Olympus NDT. Introduction to phased array ultrasonic technology applications. R/D tech guideline. Canada, April 2007, p. 9.

6. Goodman J . W., Introduction to Fourier Optics, New York, 1968, p. 5.

7. Seip, R., VanBaren, P., Cain, C. A., and Ebbini, E. S., Noninvasive Real-Time Multipoint Temperature Control for Ultrasound Phased Array Treatments, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 43(6), 1996, p. 1063-1073.

8. Kohout B., Transducer Array Calculation (TAC) GUI., <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35657-transducer-array-calculation-tac-gui>.

9. Church C.C. Prediction of rectified diffusion during nonlinear bubble pulsations at biomedical frequencies. J. Acoust. Soc. Am. 83, 1988, p. 2210-2217.

УДК 669

В. В. КАРМАЗИН докт. техн. наук, проф., П.А. СЫСА, аспирант
МГИ МИСИС

РАСШИРЕНИЕ ОБЪЕМОВ СЫРЬЯ БЕЗДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ ЗА СЧЕТ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Авторы предлагают получить высококачественные концентраты для бездоменной металлургии на основе нового процесса высокоградиентной сепарации в переменных магнитных полях с низкой напряженностью и оригинальных конструкций аппаратов, его реализующих.

Автори пропонують отримати високоякісні концентрати для бездоменної металургії на основі нового процесу високоградієнтним сепарації в змінних магнітних полях з низькою напруженістю і оригінальних конструкцій апаратів, його реалізують.