

УДК 621.926

В.С. МОРКУН (д-р техн. наук, проф.)**А.В. ПИКИЛЬНЯК (аспірант)**

Криворожский национальный университет, Кривой Рог

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА ДИНАМИКУ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ПОТОКЕ ПУЛЬПЫ

Приведены результаты исследования динамики газового пузырька в процессе флотации под воздействием высокоэнергетического ультразвука. На базе результатов моделирования получены зависимости параметров функции распределения газовых пузырьков по размерам от частоты и амплитуды приложенного ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: ультразвук, флотация, пульпа, газовая фаза, динамика пузырька.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Для управления физическими процессами, определяющими флотацию необходимы точные данные о параметрах газовой фазы. Размер пузырька газа определяет площадь поверхности, на которой взаимодействуют твердые частицы и пузырьки, и которая вносит существенный вклад в гидродинамику системы и общую производительность процесса флотации. Размер пузырька газа зависит от различных эксплуатационных, технических и химических факторов, влияние которых следует учитывать при проектировании или моделировании процесса флотации.

Анализ исследований и публикаций. Динамика газового пузырька в жидкости может быть различной – чисто сферические пульсации, возникновение колебаний поверхности пузырька, трансляционное движение, взаимодействие и дробление пузырьков на более мелкие, возникновение микропотоков и т.д.

Ускорить традиционные и реализовать новые процессы в жидких, твердых и газообразных средах возможно путем использования ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. При распространении высокоамплитудных колебаний возникают нелинейные явления, вызывающие кавитационные процессы, радиационное давление, микро- и макропотоки, которые приводят к разрывам химических и механических связей, увеличению поверхностей и скорости взаимодействия, а также ускорению процессов массо- и теплопереноса, что приводит к повышению эффективности процессов.

Из-за экстремального характера кавитационного воздействия в жидких средах необходимо не только формировать определенное значение амплитуды и частоты колебаний для инициирования соответствующих процессов, но и поддерживать их оптимальные значения при изменении параметров среды (плотность, вязкость) и воздействии дестабилизирующих факторов (изменение температуры среды и материала пьезопреобразователя, демпфирующее действие среды и т.п.).

При распространении звука в жидкости, содержащей газ в нерастворенном виде, пузырьки с размерами близкими к резонансному для данной частоты звука, вызывают значительное затухание звуковой энергии вследствие нагрева пузырька и отвода тепла к жидкости при периодических изменениях объема пузырька, которые он испытывает под действием звуковой волны, а также рассеяния части звуковой энергии, обусловленного тем, что колеблющийся пузырек является сферическим излучателем звука, потери энергии за счет образования потоков жидкости вокруг колеблющегося пузырька [1, 2].

Можно предсказать поведение одного газового пузырька при условии, что известны радиус, частота возбуждения, задающее давление и концентрация раст-

воренного газа. Под воздействием акустического поля зародыш пузырька может расти либо за счет коалесценции либо ректификационной диффузии и по достижении неустойчивого размера, схлопываться, формируя при этом более мелкие пузырьки, что сопровождается излучением света, а пузырьки, которые становятся больше резонансного размера покидают систему под действием выталкивающей силы (рис. 1.) [3].

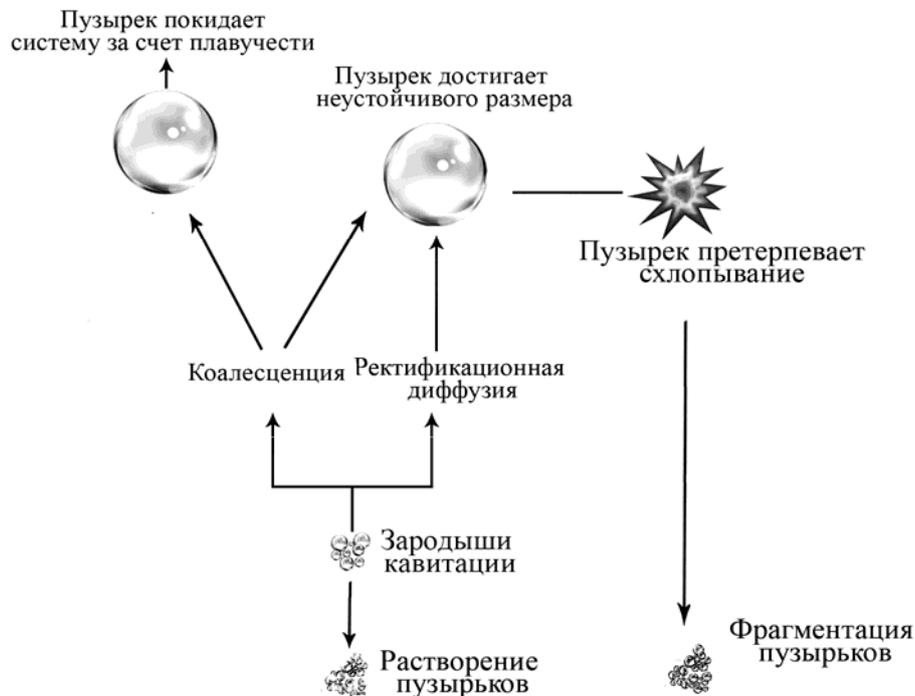


Рис. 1. Поведение газовых пузырьков в жидкости под действием ультразвукового поля

В многопузырьковой системе, динамика пузырьков является более сложной вследствие многочисленных траекторий, по которым пузырьки могут входить или выходить из системы, а также расти или схлопываться. В связи с тем, что в таких системах трудно теоретически предсказать и экспериментально управлять точным поведением пузырька в акустическом поле, необходимо рассмотреть простейший случай для одиночного пузырька, который колеблется в жидкости под действием акустического поля.

Постановка задач исследования. Задачей является исследование изменения динамики газового пузырька в процессе флотации при воздействии высокоэнергетического ультразвука заданной частотой и амплитудой на поток пульпы.

Изложение материала и результаты. Для моделирования основного движения пузырька в акустическом поле, обычно используется уравнение Рэлея-Плессета.

Уравнение динамики пузырька может быть представлено следующим выражением [4]:

$$\frac{P_L - P_\infty}{\rho} = R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2, \quad (1)$$

где R – радиус пузырька, \dot{R} – скорость стенки, P_∞ – давление в жидкости при бесконечности, P_L – давление в жидкости на стенке пузырька, ρ – плотность жидкости.

Расширим это фундаментальное уравнение, включив в него эффекты поверхностного натяжения и давление Лапласа [5, 6]. С учетом этого, при $R = R_0$, и давлении газа в пузырьке $P_0 + 2\sigma/R_0$ уравнение может быть выражено в следующем виде:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - P_\infty \right], \quad (2)$$

где P_0 статическое давление в жидкости, σ - поверхностное натяжение.

С учетом вязкости жидкости μ для граничных условий, уравнение примет вид

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} + P_\infty \right], \quad (3)$$

где μ - вязкость жидкости.

При воздействии ультразвука на газовые пузырьки, давление P изменяется по следующему закону

$$P = P_0 - P_A \sin \omega t, \quad (4)$$

где P_0 - постоянное давление, ω - угловая частота, P_A - амплитуда задающего давления.

Добавив (4) в зависимость (2), получим основное уравнение динамики одиночного газового пузырька под действием колебаний ультразвуковой волны, которое может быть представлено в следующем виде

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - (P_0 - P_A \sin \omega t) \right], \quad (5)$$

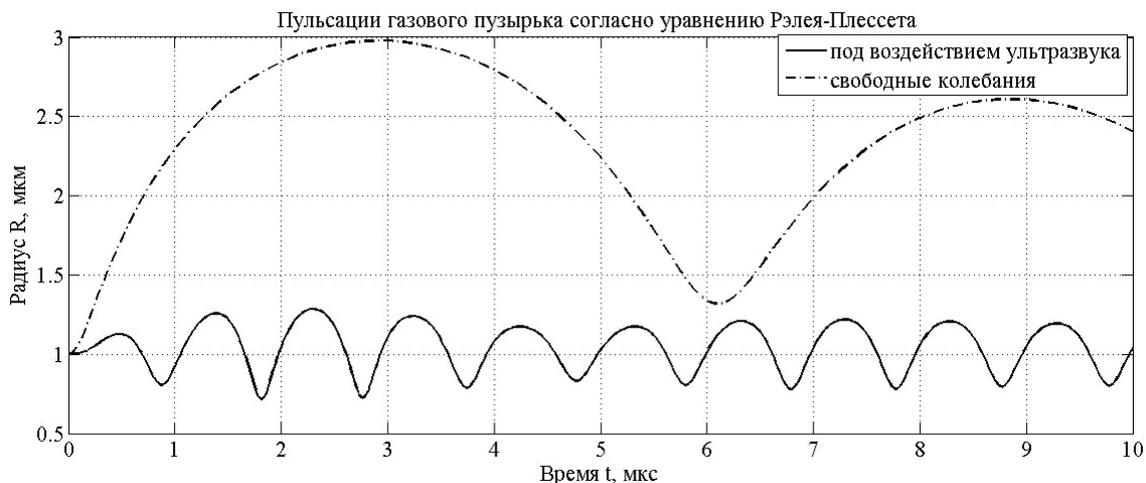


Рис. 2. Пульсации газового пузырька с начальным радиусом 2.5 мкм в воде согласно уравнению Рэлея-Плессета (пунктирная линия - свободные колебания, сплошная - под действием ультразвуковой волны с частотой 1 МГц и амплитудой давления 25 кПа).

Соединяясь, маленькие газовые пузырьки, образуют пузырьки больших размеров, которые могут снова соединиться, либо разбиваться на более мелкие. Поверхность пузырька “бурлит”, покрываясь пленой более мелких. При изменении частоты и амплитуды акустического поля можно наблюдать трансформацию в поведении пузырька. Если левитирующий пузырек находился в определенном слое жидкости, то при увеличении частоты генератора он сразу всплывает на поверхность. Такое же поведение имеет место при уменьшении амплитуды звукового поля. Это связано с тем, что пузырек перестает удерживаться силой радиационного давления и всплывает под действием силы Архимеда [7].

Резонансная частота монополярных колебаний пузырька радиуса R_0 имеет вид [8]:

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho}}, \quad (6)$$

где γ – показатель адиабаты для газа в пузырьке, P_0 – внешнее давление, а параметр ε учитывает потери энергии при колебаниях пузырька [9].

Колебания пузырька наиболее значительны, когда равновесный радиус пузырька близок к резонансному радиусу, определяемого частотой акустического поля f по следующей формуле (формула Минаерта) [10].

$$fR_r = 3 \left[\frac{m}{s} \right], \quad (7)$$

При отсутствии акустического давления, пузырьки постепенно теряют газ, так как давление внутри пузырька выше, чем снаружи. Распад пузырьков можно описать следующим выражением [10].

$$\dot{R}_0 = \frac{C_0 D}{\rho_2} \left(\frac{C_\infty}{C_0} - 1 - \frac{2\sigma}{\rho_0 R_0} \right) \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{\sqrt{\pi D t}} \right), \quad (8)$$

где C_0 – концентрация насыщенного газа, D – коэффициент диффузии газа, C_∞ – концентрация газа в жидкости, вдали от пузырьков.

На рис. 3 показана зависимость резонансных размеров газовых пузырьков от амплитуды давления ультразвуковых колебаний для различных значений их частоты. При увеличении частоты, резонансный размер пузырька уменьшается. При увеличении давления, пузырек становится более зависимым от давления, чем от частоты. Это изменение происходит при амплитудах давления при которых начинается переходная кавитация [11].

Результаты моделирования 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.

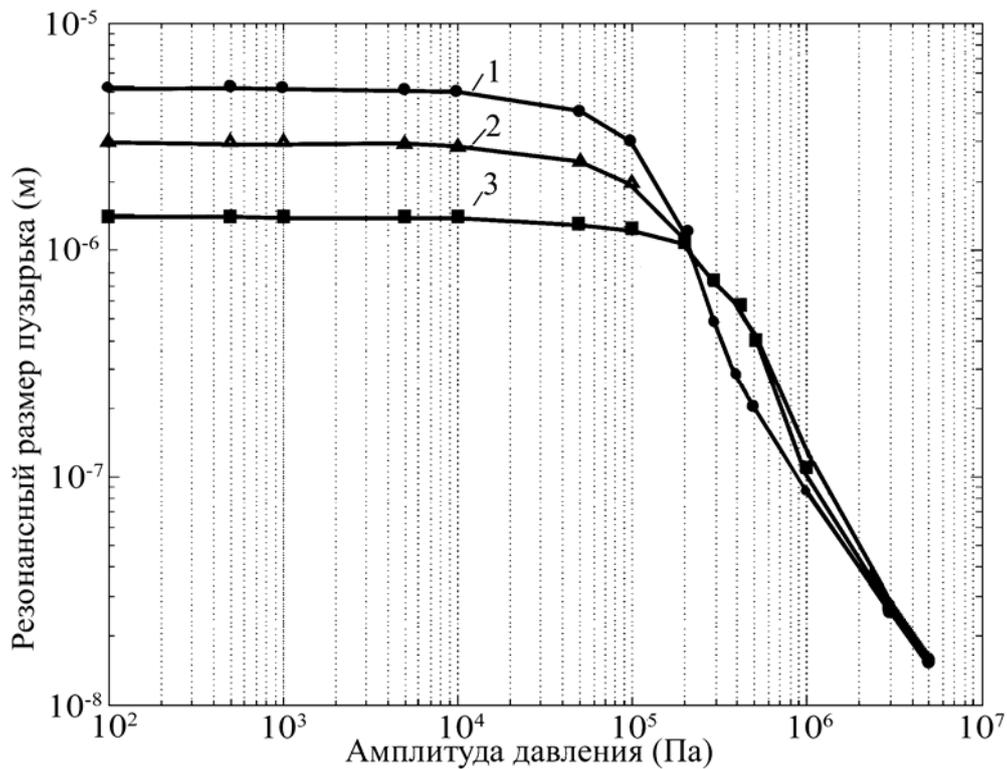


Рис. 3. Зависимость размера газового пузырька от частоты: 1 – 0,5 МГц; 2 – 1 МГц; 3 – 3 МГц

Выводы и направления дальнейших исследований

Исследованы процессы изменения размеров газового пузырька в пульпе под воздействием динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука. Результатом исследований стало описание нелинейных колебаний пузырька и сравнение полученных зависимостей изменения его размера с течением времени в обычных для него условиях и под воздействием ультразвуковой волны с заданной частотой и амплитудой.

Полученные зависимости показывают, что под воздействием ультразвуковых колебаний с заданными амплитудой и частотой можно более эффективно управлять динамикой газового пузырька. Это позволит получить необходимое распределение пузырьков по размерам, интенсифицировать массообменные процессы и в целом повысить эффективность флотации.

Список использованной литературы

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Изд-во иностран. лит., 1957. – 726 с.
2. Агранат Б.А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука / Б.А. Агранат. – М.: Машиностроение, 1969. – 47 с.
3. Leong T. The fundamentals of power ultrasound – a review / T. Leong, M. Ashokkumar, S. Kentish. – Acoustics Australia. – August (2011). – Vol. 39. – No. 2. – P. 63.
4. Besant W.H. Hydrostatics and Hydrodynamics / W.H. Besant. – Deighton Bell, Cambridge (1859).
5. Noltingk B.E. Cavitation produced by ultrasonics / B.E. Noltingk, E.A. Neppiras. – Proc. Phys. Soc. Sec. B 63(9): 674 (1950).
6. Neppiras E.A. Cavitation Produced by Ultrasonics: Theoretical Conditions for the Onset of Cavitation / E.A. Neppiras, B.E. Noltingk. – Proc. Phys. Soc. Sec. B 64(12): 1032 (1951).

7. Токмаков П.Е. Движение пузырьков в акустическом резонаторе с потоком жидкости / П.Е.Токмаков, И.Н.Диденкулов, Н.В.Прончатов-Рубцов // Труды Научной конференции по радиофизике / ННГУ. - 2003.
8. Динамика газовых пузырьков в сильном акустическом поле / [И.Н. Диденкулов, Н.В. Прончатов - Рубцов, Д.А. Селивановский, и др.] // Труды Научной конференции по радиофизике / ННГУ. - 2001.
9. Токмаков П.Е. Влияние потока на поведение газового пузырька в акустическом резонаторе / П.Е. Токмаков, И.Н. Диденкулов, Н.В. Прончатов-Рубцов // Труды Научной конференции по радиофизике / ННГУ. - 2004.
10. Leighton T.G. The Acoustic Bubble / T.G. Leighton. – Academic Press, 1997. – P. 613.
11. Carvell K. J. Dependence of bubble size and peak rarefractional pressure on maximum bubble response during therapeutic ultrasound histotripsy / K. J. Carvell // Graduate Theses and Dissertations. Iowa. – 2009. – P. 44.

Надійшла до редакції 20.12.2013

В.С. Моркун, А.В. Пікільняк

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ВИСОКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ НА ДИНАМІКУ ГАЗОВИХ БУЛЬБАШОК В ПОТОЦІ ПУЛЬПИ

Приведено результати дослідження динаміки газової бульбашки в процесі флотації під впливом високоенергетичного ультразвуку. На базі результатів моделювання одержані залежності параметрів функції розподілення газових бульбашок за розмірами від частоти та амплітуди прикладеної ультразвукової дії.

Ключові слова: ультразвук, флотація, пульпа, газова фаза, динаміка бульбашки.

V. Morkun, A. Pikilnyak

INVESTIGATION OF HIGH INTENSITY ULTRASONIC OSCILLATIONS INFLUENCE ON GAS BUBBLES DYNAMICS IN THE PULP FLOW

Results of gas bubble dynamics investigation in the flotation process under high-energy ultrasound action are presented. Parameter dependences of gas bubbles sizes distribution function on frequency and amplitude of the attached ultrasonic influence are obtained on the basis of simulation results.

Keywords: ultrasound, flotation, pulp, gas phase, bubbles dynamics.