



УДК 539  
ББК 22

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ СВЕРХВЫСОКОЙ ДИСПЕРСНОСТИ В КАВИТИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

*Д.И. Дьяченко, М.А. Хмель, В.В. Акатьев*

В работе приведен расчет оптимальных режимов ультразвукового диспергирования для достижения полного разрушения частиц дисперсной фазы. Для оценки возможности эффективного кавитационного воздействия на вещество определен критерий эрозионной активности единичной полости. Дана теоретическая оценка возможности повышения эрозионной активности полости. Исследовано влияние свойств дисперсионной среды на динамику кавитационной полости.

**Ключевые слова:** кавитация, эрозионная активность, единичная полость, порошки сверхтонкой дисперсности, ультразвук.

### Введение

Применение ультразвука для диспергирования материалов обусловлено необходимостью получения порошков сверхтонкой дисперсности с требуемой размерной однородностью при сохранении чистоты и гомогенности состава за непродолжительное время по сравнению с другими механохимическими методами измельчения: планетарными, шаровыми и вибрационными мельницами.

В работах Б.А. Аграната показано, что основная роль в разрушении и диспергировании твердых тел принадлежит акустической кавитации: образование разрывов жидкости там, где происходит местное понижение давления. Доказано, что пульсации образующихся кавитационных полостей способны создавать в микрообъемах при определенных условиях чрезвычайно высокие давления и температуры, способствуя разрушению частиц порошка. Важно отметить, что существенным фактором, оказывающим влияние на интенсивность измельчения, является наличие пор, углублений и микротрещин на поверхности час-

тиц, которые под действием интенсивных микропотоков, образующихся при пульсациях кавитационных пузырьков, заполняются жидкостью, а возникающие при схлопывании этих пузырьков ударные волны способствуют раскалыванию частиц [1; 2].

В ряде работ описан и теоретически обоснован механизм образования кавитации в жидкости. Показана возможность разделения формирующихся в акустическом поле полостей на три группы в зависимости от размеров: к первой относятся полости, начальный размер которых меньше критического. Они пульсируют, мало изменяя свои первоначальные размеры в течение многих периодов колебаний. Ко второй относятся пульсирующие полости, у которых начальные размеры больше резонансного. Значительно увеличиваясь в объеме при расширении, эти полости не успевают захлопнуться в фазе сжатия и пульсируют около некоторого среднего максимального радиуса. К третьей группе относятся кавитационные полости, которые существенно увеличиваются в размерах в фазе расширения и в то же время успевают захлопнуться в фазе сжатия. В течение всей фазы сжатия давление, создаваемое внешним источником колебаний, практически не влияет на динамику полости [4].

При пульсациях полостей первой и второй групп локальные давления в окрестностях полости соизмеримы по порядку величины с переменным давлением, создаваемым источником ультразвуковых колебаний. Пульсации захлопывающихся полостей третьей группы сопровождаются пиковым ростом давления вблизи захлопывающейся полости на много порядков превышающим амплитудные значения давления, создаваемого внешним источником колебаний.

Из всех образующихся в акустическом поле кавитационных полостей только полости, относящиеся к третьей группе, могут обеспечить получение высокой локальной плотности энергии в микрообъемах жидкости.

На основе анализа и статистической обработки данных, полученных при численном решении уравнений динамики кавитационной полости, Б.А. Агранатом предложен безразмерный критерий эрозионной активности:

$$\mathcal{K} = \frac{R_{\max}^3}{R_{\min}^3 \Delta t_{\min} f}, \mathcal{K} \gg 1 \quad (1)$$

где  $t_{\min}$  – продолжительность фазы захлопывания;

$R_{\min}$  – некоторый средний минимальный радиус кавитационной полости;

$R_{\max}$  – некоторый средний максимальный радиус кавитационной полости;

$f$  – частота.

Данный критерий служит для оценки способности звукового поля к разрушению твердых тел, находящихся в сфере воздействия ударной волны [1; 5].

Таким образом, возникла необходимость в непосредственной оценке значений критерия эрозионной активности, отвечающего полностью разрушенной структуре порошка, а также в качественной оценке влияния свойств жидкости и параметров звукового поля на величину  $\mathcal{K}$ .

### 1. Расчет оптимальных режимов ультразвукового диспергирования

Нами была исследована возможность достижения максимальных значений величины критерия эрозионной активности. Параметры, входящие в (1), могут быть рассчитаны по формулам, предложенным Ф.А. Брониным:

$$R_{\max} = \frac{0,4 \zeta}{f} \sqrt[3]{1 - \frac{P_0}{P_A} \frac{\varphi}{i} \frac{P_A}{\rho}}^{\frac{1}{2}};$$

$$R_{\min} = \frac{1,2 P_{II} \sqrt[3]{1 - \frac{P_0}{P_A} \frac{\varphi}{i} (P_A)^{1/2}}}{\zeta \sqrt[3]{2,9 \frac{P_0}{P_A} - 3,4 \frac{P_0^2}{P_A^2} + 3 \frac{P_{II}}{P_A} + 0,6 \frac{\varphi}{\rho} f}};$$

$$t_{\min} = \frac{0,36 \zeta}{f} \sqrt[3]{1 - \frac{P_0}{P_A} \frac{\varphi}{i} \frac{P_A}{\rho}}^{\frac{1}{2}} \sqrt[3]{2,9 \frac{P_0}{P_A} - 3,4 \frac{P_0^2}{P_A^2} + 0,6 \frac{\varphi}{\rho} f}^{-1/2},$$

где  $P_{II}$  – давление насыщенного пара жидкости;  
 $P_A$  – среднее звуковое давление, действующее на пузырек в фазе сжатия;  
 $P_0$  – гидростатическое давление;  
 $i$  – плотность жидкости.

С учетом вышеприведенных формул:

$$\mathcal{K} = \frac{8,14 (P_A - P_0)^5 (0,2 P_A + P_0)^7}{P_A^3 P_{II}^3}. \quad (2)$$

Как следует из выражения (2), величина  $\mathcal{K}$  для данной жидкости определяется значениями гидростатического и звукового давления. Анализ первой производной  $d\mathcal{K}/dP_0$  показывает, что возможными экстремальными точками являются  $P_A = P_0$  и  $P_A = 2P_0$ . Но при  $P_A = P_0$  функция обращается в нуль, так как при этих условиях процесс кавитации подавляется статическим давлением. Подставляя значения  $P_A = 2P_0$  во вторую производную  $d^2\mathcal{K}/dP_0^2$ , получаем  $d^2\mathcal{K}/dP_0^2 < 0$ , что указывает на наличие максимума функции при  $P_A = 2P_0$ . Итак, величина  $\mathcal{K}$  принимает максимальное значение при соотношении:

$$\frac{P_0}{P_A} = 0,5. \quad (3)$$

Для оценки эрозионной активности введем понятие параметра газосодержания:

$$\delta = \frac{P_{II}}{P_A + P_0}, \delta \ll 1.$$

С учетом (3):

$$\delta = \frac{2 P_{II}}{3 P_A}. \quad (4)$$

Чем меньше  $\delta$ , тем выше эрозионная активность единичной полости. Из (4) видно, что если свойства жидкости определяются требованиями технологии, то единственным

средством уменьшения величины  $\dot{\epsilon}$  является увеличение значения  $P_A$ .

Следует также отметить, что газовые пузырьки всегда перемещаются в пучности давления, а следовательно, вблизи максимумов давления будет повышенная концентрация ядер кавитации, что и создает условия для образования кавитационной области с повышенной эрозионной активностью.

## 2. Исследование влияния различных параметров на эрозионную активность кавитационной области

Экспериментально установлено, что критерий эрозионной активности зависит не только от начального размера «зародыша» кавитации, но и от параметров дисперсионной среды: поверхностного натяжения –  $\hat{\sigma}$ , плотности –  $\hat{\rho}$ , упругости пара –  $P_{II}$ .

Зависимость  $\mathcal{K} = \dot{\omega}(\hat{\sigma})$  представлена на рисунке 1. Некоторое повышение  $\mathcal{K}$  можно объяснить тем, что увеличение  $\hat{\sigma}$  способствует уменьшению  $R_{max}$  [см. формулу (1)].

Незначительное повышение эрозионной активности с ростом поверхностного натяжения делает нецелесообразным применение жидкостей с высоким значением  $\hat{\sigma}$ , так как уменьшение  $\hat{\sigma}$  способствует затеканию жидкости в поры и измельчению порошка.

Изменение плотности в пределах, характерных для реальных жидкостей, почти не влияет на величину  $\mathcal{K}$ , хотя в жидкостях с большой плотностью эрозионная активность не-

сколько уменьшается, что связано с увеличением присоединенной массы жидкости.

Анализ зависимости  $\mathcal{K}$  от  $P_{II}$  показывает, что с ростом  $P_{II}$  эрозионная активность единичной полости быстро падает. Существенное влияние  $P_{II}$  на величину  $\mathcal{K}$  можно объяснить тем, что  $P_{II}$  сохраняется постоянным в течение всего периода расширения пузырька. При достижении  $R_{max}$  давление насыщенных паров полностью определяет величину сил, противодействующих захлопыванию пузырьков.

Перейдем к анализу влияния параметров акустического поля на величину критерия эрозионной активности.

Для исследования влияния звукового давления –  $P_A$ , частоты –  $\omega$ , и амплитуды –  $A$  на динамику полости мы сохраняли постоянными следующие свойства жидкости:  $\hat{\rho} = 1 \text{ г/см}^3$ ;  $P_{II} = 2,2 \times 10^{-4}$ .

На частоте 20 кГц пузырек вырождается в пульсирующий при  $P_A = 2 \times 10^7 \text{ дин/см}^2$ . Уровень звукового давления, создаваемого вблизи излучателя, можно приблизительно оценить по формуле для плоской бегущей волны:

$$P_A = \hat{\rho} \eta c A,$$

где  $\eta = 2 \hat{\sigma} / \omega$ ;

$c$  – скорость распространения волны;

$A$  – амплитуда смещения.

Для воды при амплитуде смещения  $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ,  $P_A = 10^7 \text{ дин/см}^2$ . Следовательно, пузырек, имеющий  $R_0 = 3,2 \times 10^{-4} \text{ см}$  успевает захлопнуться, но если увеличить давление в

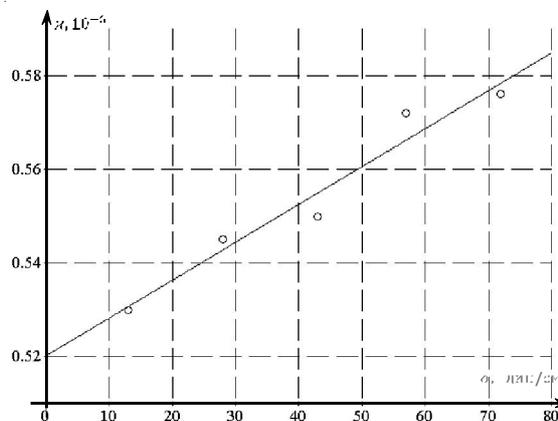


Рис. 1. Зависимость  $\mathcal{K}$  от поверхностного натяжения  $\hat{\sigma}$

2 раза, то пузырек не захлопывается, а пульсирует. С ростом  $P_A$  уменьшается величина критического радиуса, следовательно, в кавитационной полости образуется как все большее количество крупных пульсирующих пузырьков, так и все большее количество «зародышей» начинает участвовать в кавитационном процессе.

Изменение частоты ультразвукового поля не влияет на качественную оценку величины эрозионной активности, так как увеличение величины  $\mathcal{H}$  в  $10^6$  раз влечет за собой уменьшение во столько же раз значения параметра газосодержания в начальный период фазы захлопывания. При амплитуде звукового давления  $P_A = 10^7$  дин/см<sup>2</sup> кавитационный пузырек вырождается в пульсирующий при повышении частоты до  $10^6$  Гц и при понижении частоты до  $10^3$  Гц. В интервале частот  $2 \cdot 10^3 \dots 10^5$  Гц значение критерия примерно постоянно.

Интервал частот 18 ... 44 кГц является оптимальным для использования в ультразвуковых установках, так как с уменьшением частоты в область слышимых звуков значительно повышается уровень шума, усложняется звукоизоляция установок, растет расход дорогих материалов на единицу акустической мощности. Увеличение частоты более 44 кГц тоже нецелесообразно, так как возрастают электромагнитные, магнитомеханические потери в преобразователях и снижается их КПД.

При амплитуде смещения 1 мкм и пороговом звуковом давлении в центре излучателя 0,6 ат. с резонансной частотой преобразователя 17,9 кГц (радиус стержневого излучателя – 50 мм) развитая кавитационная об-

ласть образуется только в центре излучателя. По мере увеличения амплитуды смещения давление становится выше порогового и на некотором расстоянии от центра излучателя. Образовавшиеся на периферийных участках кавитационные области являются своеобразным экраном, препятствующим распространению звуковых волн. При амплитуде смещения 3 мкм в центре излучателя разрывов не наблюдается, тогда как на периферии примерно симметрично относительно центра формируется несколько развитых областей кавитации. Сама область кавитации приобретает форму конуса, неравномерно заполненного кавитационными пузырьками в сечениях, параллельных плоскости излучения. Увеличение амплитуды смещения до 6 мкм приводит к тому, что разрывы возникают практически по всей поверхности излучателя.

При дальнейшем увеличении амплитуды смещения на границе излучатель – жидкость образуется прослойка из скопления крупных пульсирующих кавитационных полостей, которая резко ухудшает условия передачи акустической энергии в жидкость и снижает эрозионную активность кавитационной области.

### Заключение

С учетом данных, полученных в результате анализа ультразвукового воздействия с целью получения ультрадисперсных порошков, нами была проведена серия экспериментов по реализации максимально эффективного измельчения частиц алюминия в изопропанол.

После двухстадийного диспергирования общей продолжительностью 90 мин большая

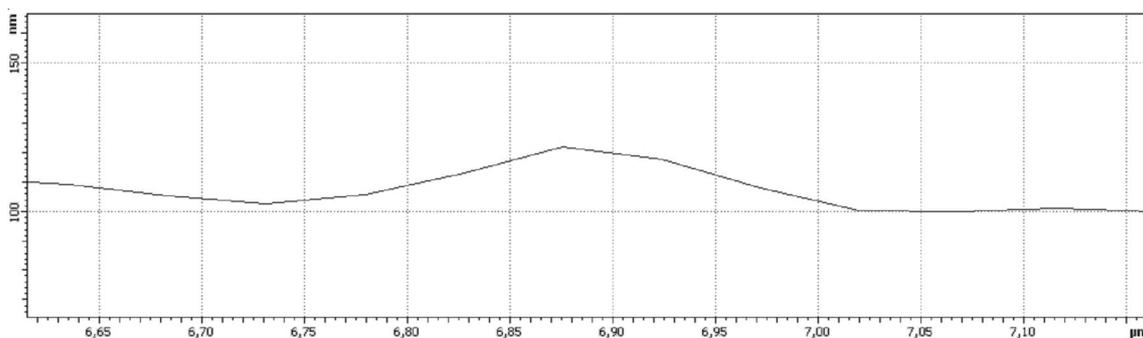


Рис. 2. Наиболее характерное изображение частицы алюминия после ультразвукового диспергирования продолжительностью 90 мин, полученное на атомно-силовом микроскопе Solver Pro

часть частиц порошка имела чешуйчатую форму с размерами от 250 до 550 нм в основании и от 20 до 50 нм в поперечнике (рис. 2). Сканирование частиц производилось на атомно-силовом микроскопе Solver Pro.

Было показано, что при выборе оптимальных параметров ультразвукового диспергирования, с целью увеличения значения эрозионной активности единичной полости можно добиться требуемой размерной однородности частиц дисперсной фазы. Таким образом, можно утверждать, что представляется весьма эффективным ультразвуковой способ получения порошков сверхтонкой дисперсности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агранат, Б. А. Основы физики и техники ультразвука : учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 352 с.
2. Рождественский, В. В. Кавитация / В. В. Рождественский. – Л. : Судостроение, 1977. – 248 с.
3. Сергеев, Г. Б. Нанохимия / Г. Б. Сергеев. – М. : Изд-во МГУ, 2003. – 288 с.
4. Шутилов, В. А. Основы физики ультразвука / В. А. Шутилов. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
5. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учебное пособие / О. Л. Хасанов [и др.]. – Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2008. – 149 с.

THE POSSIBILITY OF OBTAINING POWDER SULTRA-HIGH DISPERSITY IN CAVITATING MEDIA

*D.I. Dyachenko, M.A. Khmel, V.V. Akatyev*

This paper gives a calculation of the optimal regimes of ultrasonic dispersion to achieve the complete destruction of the dispersed phase. To assess the possibility of effective cavitation exposure of defined criteria of erosion of unit activity of the cavity. Given the theoretical evaluation of the possibility of increasing the activity of the erosion cavity. The influence of the properties of the dispersion medium on the dynamics of the cavity.

**Key words:** *cavitation, erosion activity, the unit cavity, dispersion of the hyperfine powders, ultrasonic.*