

05.11.06

**В.Н. Хмелев д.т.н., А.В. Шалунов д.т.н., Р.С. Доровских,
В.А. Нестеров к.т.н., Р.Н. Голых к.т.н.**

Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, shalunov@bti.secna.ru

СПОСОБ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В статье рассмотрен способ кавитационного ультразвукового (УЗ) распыления вязких жидкостей. Для объяснения физических явлений происходящих в распыляемой жидкости, предлагается модель. Она описывает поэтапное преобразование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты в энергию капиллярных волн, затрачиваемую на увеличение свободной поверхности жидкости, т.е. образование капель.

Ключевые слова: *ультразвук, распыление, вязкие жидкости, физическая модель, кавитация, оптимальные режимы.*

При наложении механических колебаний УЗ частоты на тонкую пленку жидкости на ее поверхности возникает сеть капиллярных волн, с гребней которых может происходить отрыв капель жидкости. Этот процесс называется УЗ распылением. Среди множества теоретически возможных механизмов УЗ распыления жидкости [1–3] наиболее исследованным и экспериментально подтвержденным является кавитационно-волновой, согласно которому капиллярные волны образуются на поверхности пленки жидкости за счет захлопывания кавитационных пузырьков (рис. 1).

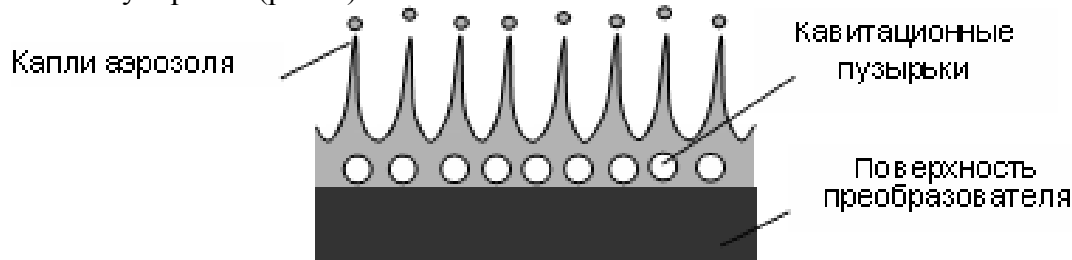


Рис. 1 – Механизм образования капель аэрозоля

С энергетической точки зрения очевидно, что энергия УЗ колебаний, создаваемых излучающей (колеблющейся) поверхностью, претерпевает ряд преобразований. Первоначально энергия первичного воздействия (ультразвуковых колебаний) концентрируется в энергию высокой плотности в виде периодических высокоамплитудных ударных волн взрывающихся кавитационных пузырьков. Затем энергия ударных волн, распространяясь по толщине слоя жидкости, достигает свободной поверхности «жидкость-газ», переходя в поверхностную энергию капиллярных волн и в увеличение свободной поверхности жидкости из-за отрыва капель от гребней капиллярных волн

Поэтому предлагаемая для дальнейшего исследования модель включает в себя рассмотрение всех стадий преобразования энергии в слое распыляемой жидкости, а именно:

- 1) определение амплитуды звукового давления в зависимости от толщины слоя распыляемой жидкости с учетом вязкости жидкости;
- 2) установление зависимости радиуса кавитационного пузырька от амплитуды звукового давления, а, следовательно, и от толщины слоя жидкости; определение максимального значения радиуса пузырька;
- 3) определение амплитуды давления во фронте ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационного пузырька максимально возможного радиуса.

В рамках первого этапа на основании уравнения продольных колебаний тела ограниченной формы [4] были получены зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя (1):

$$P_A = v_0 \rho \omega \left| \frac{\sin \gamma h}{\gamma \cos \gamma h} \right| \tag{1}$$

где P_A – амплитуда звукового давления, Па; v_0 – амплитуда колебательной скорости на поверхности УЗ преобразователя, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ω – циклическая частота, с⁻¹; h – толщина слоя жидкости, м; γ – постоянная распространения волны, равная

$$\gamma = k + i\beta = \frac{\omega}{c} + i \left(\frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^3} \right) \tag{2}$$

где c – скорость звука жидкости, м/с; η – вязкость жидкости.

На основании полученного выражения (1), в рамках второго этапа рассмотрения и анализа модели был проведен расчет параметров кавитации, возникающей в жидкости на излучающей поверхности УЗ преобразователя под действием этого давления. Расчеты проводились на основании уравнения Херринга-Флинна [5] и полученной зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя.

$$R \left(1 - 2 \frac{U}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4U}{3c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \cdot P_K + \frac{RU}{\rho c_0} \left(1 - \frac{U}{c_0} \right) \frac{dP(R)}{dt} = 0, \tag{3}$$

где R – радиус кавитационной полости, м; σ – поверхностное натяжение жидкости, Дж/м²; c_0 – скорость звука в жидкости, м/с.

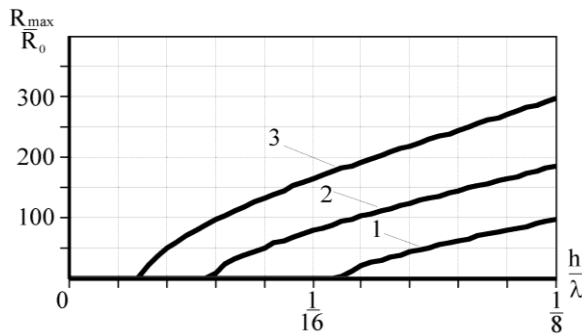
$$P(R) = P_{Г0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1} + P_{II} - \frac{2\sigma}{R}; \quad U = \frac{dR}{dt};$$

$$P_K = P_0 - P_{II} - v_0 \rho \omega \left| \frac{\sin \gamma h}{\gamma \cos \gamma h} \right| \sin(\omega t) + \frac{4\eta U}{R} + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1};$$

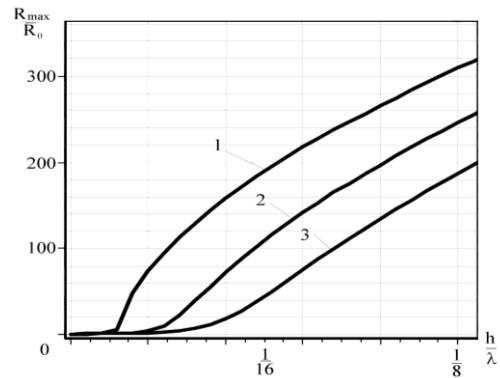
где $P_{Г0}$ – давление газа в пузырьке, Па, P_0 – атмосферное давление, Па; P_{II} – давление пара, определяемое температурой жидкости, Па; γ_1 – показатель политропы, определяющий состояние газа в полости.

На рис. 2 представлены полученные зависимости относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя воды при различных амплитудах УЗ воздействия (рис. 2,а) и для жидкостей с разной вязкостью (рис. 2,б) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.

Из первого графика видно, что при увеличении толщины слоя жидкости на поверхности преобразователя происходит увеличение радиуса кавитационного пузырька. Это обусловлено улучшением условий выхода УЗ энергии в слой распыляемой жидкости. Анализ графиков на рис. 2,б показывает, что с ростом вязкости для возникновения кавитации требуется более толстый слой жидкости.



1 – 4 мкм; 2 – 12 мкм; 3 – 20 мкм



1 – $\eta=0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с; 2 – $\eta = 50$ Па·с;
3 – $\eta = 100$ Па·с

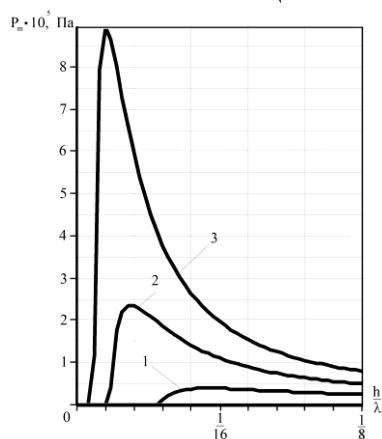
а) при различных амплитудах УЗ воздействия

б) для различной вязкости

Рис. 2 – Зависимость относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя

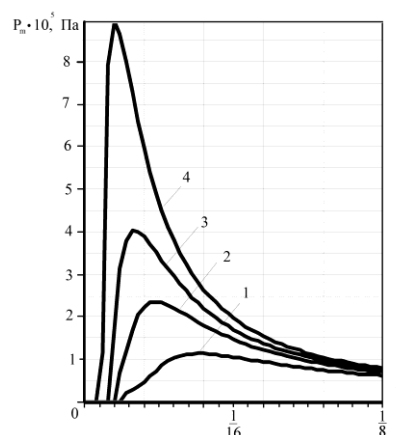
В рамках третьего этапа анализа модели на основе результатов исследования явления подводного взрыва, выполненного Коулом [7] на модели, представляющей взрыв как расширение сферы под действием заполняющего ее газа, были получены зависимости амплитуды давления во фронте ударной волны на поверхности жидкости от толщины слоя при различных амплитудах УЗ воздействия (рис. 3,а для воды) и для жидкостей с разной вязкостью (рис. 3,б) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.

Из графика на рис. 3,а видно, что кривые имеет максимум, отличный для каждой амплитуды колебаний поверхности УЗ преобразователя. Этот максимум соответствует той толщине слоя, при которой давление во фронте ударной волны на поверхности жидкости будет максимальным, то есть именно при такой толщине слоя будет достигнут максимум производительности УЗ кавитационного распыления.



1 – 4 мкм; 2 – 12 мкм; 3 – 20 мкм

а) при различных амплитудах УЗ воздействия



1 – $\eta = 200$ Па·с; 2 – $\eta = 100$ Па·с;
3 – $\eta = 50$ Па·с; 4 – $\eta = 0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с

б) для различной вязкости

Рис. 3 – Зависимость давления ударной волны на поверхности жидкости от толщины слоя жидкости

По максимуму кривых, представленных на рис. 3,б можно также определить оптимальную толщину слоя жидкости, при которой производительность УЗ распыления в слое будет максимальной при заданной амплитуде колебаний преобразователя. Это означает, что для обеспечения максимальной производительности УЗ распыления при заданной амплитуде колебаний необходимо поддерживать определенную толщину слоя жидкости, рассчитываемую на основании значения вязкости для каждой конкретной жидкости. Эта толщина слоя будет оптимальной для рассматриваемой жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ
№МД-4753.2016.8.

Список литературы

1. Lang R.J. Ultrasonic atomization of liquids // The Journal of the Acoustical Society of America. 1962. – V. 34. – P. 6-8.
2. Lugovskoy A., Physical analogue of the process of ultrasonic liquid nebulisation in a thin layer / A. Lugovskoy, A. Lyashok // Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», 2013. – P. 110-114.
3. Ворожцов Б.И. Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция / Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов, И.Р. Ахмадеев, Г.В. Сакович // ИФЖ, 2010. – Т. 83. – № 6. – С. 1084-1103.
4. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.