

Кавитационное Распыление Вязких Жидкостей

Владимир Н. Хмелев, Андрей В. Шалунов, Елена С. Смердина

Аннотация — В статье рассматривается механизм реализации кавитационного ультразвукового (УЗ) распыления вязких жидкостей. Для объяснения физических явлений происходящих в распыляемой жидкости, предлагается модель, описывающая поэтапное преобразование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты, в энергию капиллярных волн затрачиваемую на увеличение свободной поверхности жидкости – образование капель, и позволяющая определять оптимальные режимы УЗ распыления. В заключительной части статьи приводятся результаты практических экспериментов, подтверждающие правильность предложенной модели.

I. ВВЕДЕНИЕ

Распыление жидкостей является одной из важнейших задач промышленности. Это подтверждается широким спектром технологических процессов, в которых используется распыление или реализация которых вообще не возможна без использования распыления жидкостей.

Примером таких технологических процессов является: в области электронной промышленности – полирование кремниевых пластин и нанесение фоточувствительных эмульсий при изготовлении полупроводниковых схем; в области химической технологии – мокрая очистка газов от различных дисперсных примесей, абсорбция газов, как для их очистки, так и для выделения ценных компонентов, сушка и гранулирование материалов и другие. Все перечисленные процессы являются базовыми в своих отраслях промышленности, поэтому эффективная реализация процесса распыления в этих технологиях является очень важной задачей.

Процесс распыления может осуществляться при помощи различных способов, наиболее распространенными (традиционно используемые на практике) из которых являются гидравлический, пневматический, механический, электростатический и комбинированный способы распыления. Однако эти способы имеют ряд существенных недостатков, таких как низкий коэффициент переноса распыляемого материала на изделие, использование дополнительных потоков воздуха, высокая неоднородность получаемого аэрозоля, невозможность распыления высоковязких жидкостей без использования дополнительного

распыляющего агента, высокая энергоемкость. Указанные недостатки способов распыления вызывают снижение эффективности технологических процессов, в которых они используются [1].

В связи с этим перспективным направлением совершенствования технологических процессов совершенствование существующих, или применение новых, перспективных способов распыления жидкостей. К таким способам относится распыление за счет использования энергии механических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности – ультразвуковое распыление.

Ультразвуковое распыление имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными способами распыления, а именно:

- низкая энергоемкость;
- высокая производительность;
- возможность мелкодисперсного распыления;
- возможность монодисперсного распыления;
- возможность распыления высоковязких жидкостей.

Однако, УЗ способ распыления жидкостей на сегодняшний день не получил достаточно широкого распространения в связи с неизученностью процессов, происходящих в слое распыляемой жидкости, отсутствия теоретической базы, позволяющей определять оптимальные параметры УЗ воздействия, при которых достигается максимальная эффективность процесса УЗ распыления с учетом требований, предъявляемых к параметрам формируемого аэрозоля со стороны технологического процесса. Кроме этого, накопленный опыт практического применения УЗ распыления показывает, что наибольшие трудности возникают при диспергировании вязких жидкостей. Это объясняется существованием множества факторов, как со стороны распыляемой жидкости, так и со стороны УЗ оборудования, влияющих на эффективность процесса распыления вязких жидкостей. Все выше перечисленное является основными причинами недостаточной эффективности и распространения УЗ способа распыления.

Таким образом, изучение степени влияния свойств жидкости и параметров УЗ воздействия на физические эффекты, происходящие в распыляемой жидкости, на интенсивность УЗ распыления, а также создание

теоретической базы, позволяющей осуществлять выбор оптимальных режимов работы УЗ распылительного устройства, является актуальной задачей в области промышленных и УЗ технологий.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЗ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

На сегодняшний день наиболее распространенной теорией, описывающей механизм акустического распыления жидкостей, является теория кавитационно-волнового распыления жидкостей. Согласно этой теории, впервые выдвинутой Богуславским [2] и Экнадиосянцем [3] и в последствии развитой Новицким [4], распыление осуществляется путем отрыва капелек жидкости с гребней стоячих капиллярных волн, параметрически возбуждаемых на поверхности раздела сред жидкость-воздух вследствие возмущения поверхности жидкости при захлопывании кавитационных пузырьков.

Исходя из этого, для разработки теоретической основы применения кавитационного способа возбуждения капиллярных волн предлагается рассмотреть модель, состоящую из УЗ преобразователя, слоя жидкости конечной толщины h , разлитой на поверхности преобразователя, кавитационных пузырьков возникающих в этом слое жидкости и капиллярных волн (рис. 1).



Рис. 1 Механизм образования капель аэрозоля

Рассмотрение и анализ модели можно разделить на следующие основные этапы:

- 1) установление зависимости амплитуды звукового давления 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 [5] были получены зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя.

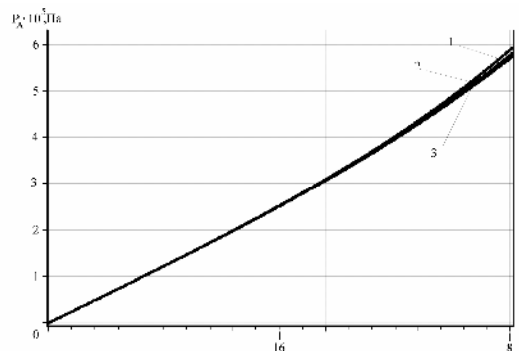
$$P_A = u_0 r w \left| \frac{\sin gh}{g \cos gh} \right| \quad (1)$$

где P_A – амплитуда звукового давления;
 u_0 – амплитуда колебательной скорости на поверхности УЗ преобразователя;
 ρ – плотность жидкости;
 ω – циклическая частота;
 h – толщина слоя жидкости;
 γ – постоянная распространения волны, равная

$$g = k + ib = \frac{w}{c} + i \left(\frac{2hw^2}{3rc^3} \right) \quad (2)$$

где c – скорость звука жидкости;
 η – вязкость жидкости.

На рисунке 2 представлены кривые, полученные на основании этой зависимости. Параметром кривых является вязкость жидкости. Амплитуда УЗ колебаний равна 4 мкм.



(1) $\eta=0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с; (2) 10η Па·с; (3) 30η Па·с

Рис. 2 Зависимость амплитуды звукового давления от толщины слоя жидкости

Из полученных графиков следует, что зависимость амплитуды звукового давления от толщины слоя жидкости имеет практически линейный характер, а также при малых толщинах слоя распыляемой жидкости величина амплитуды звукового давления практически не зависит от вязкости жидкости.

На основании полученной зависимости амплитуды звукового давления от толщины слоя жидкости, 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 [6] и полученной зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя, рисунок 2.

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

где R – радиус кавитационной полости;
 σ – поверхностное натяжение жидкости;
 c_0 – скорость звука в жидкости;

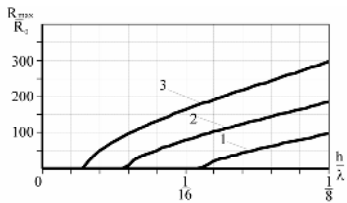
$$P(R) = P_{r_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1} + P_{II} - \frac{2S}{R};$$

$$U = \frac{dR}{dt};$$

$$P_K = P_0 - P_{II} - u_0 r w \left| \frac{\sin gh}{g \cos gh} \right| \sin(\omega t) + \frac{4hU}{R} + \frac{2S}{R} - \left(P_0 + \frac{2S}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1};$$

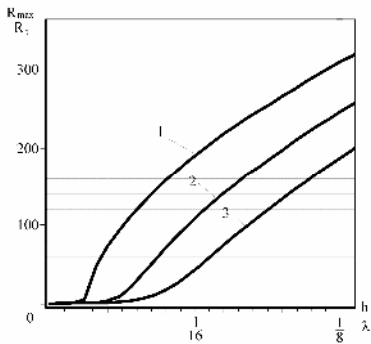
где P_{r_0} – давление газа в пузырьке,
 P_0 – атмосферное давление;
 P_{II} – давление пара, определяемое температурой жидкости;
 R_0 – показатель политропы, определяющий состояние газа в полости.

На рисунке 3 представлены полученные зависимости относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя жидкости при различных амплитудах УЗ воздействия (3,а); для жидкостей с разной вязкостью (3,б) и с разным поверхностным натяжением (3,в) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.

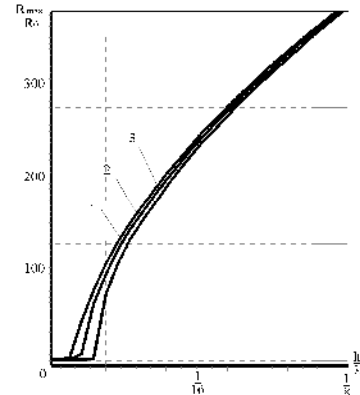


(1) 4 мкм; (2) 2 мкм; (3) 20 мкм.

а) при различных амплитудах УЗ воздействия



(1) $\eta=0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с; (2) 50η Па·с; (3) 100η Па·с
 б) для различной вязкости



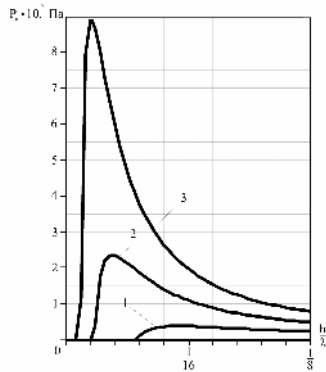
(1) $0,1 \cdot 10^{-3}$ Н/м; (2) $0,72 \cdot 10^{-3}$ Н/м; (3) $1,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м
 в) для различного поверхностного натяжения

Рис. 3 Зависимость относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя

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 рисунках 3,б и 3,в соответственно, показывает, что с ростом вязкости и поверхностного натяжения жидкости для возникновения кавитации требуется более толстый слой жидкости.

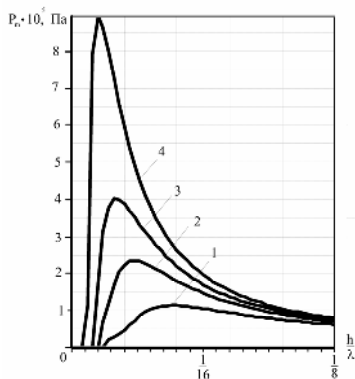
Таким образом, на основании проведенных расчетов были получены зависимости максимального значения радиуса кавитационного пузырька от параметров, существенным образом влияющих на кавитационный процесс.

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. 4,а для воды), для жидкостей с разной вязкостью (рис. 4,б) и с разным поверхностным натяжением (рис. 4,в) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.



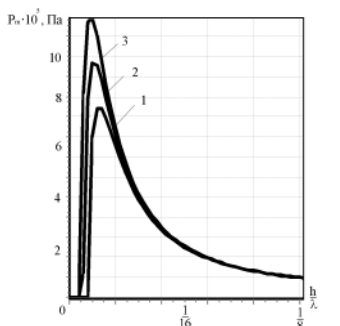
(1) 4 мкм; (2) 12 мкм; (3) 20 мкм

а) при различных амплитудах УЗ воздействия



(1) 200η Па·с; (2) 100η Па·с; (3) 50η Па·с; (4) η=0,82 · 10⁻³ Па·с

б) для различной вязкости



(1) 1,5 · 10⁻³ Н/м; (2) 0,72 · 10⁻³ Н/м; (3) 0,1 · 10⁻³ Н/м

в) для различного поверхностного натяжения

Рис. 4 Зависимость давления ударной волны на поверхности жидкости от толщины слоя жидкости

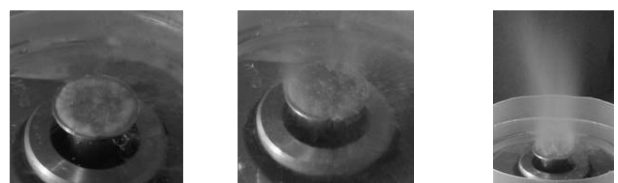
Из графика на рисунке 4,а видно, что кривые имеют максимум, отличный для каждой амплитуды колебаний поверхности УЗ преобразователя. Этот максимум соответствует той толщине слоя, при которой давление во фронте ударной волны на поверхности жидкости будет максимальным, то есть именно при такой толщине слоя будет достигнут максимум производительности УЗ кавитационного распыления. По максимуму кривых, представленных на рисунках 4,б и 4,в можно также определить оптимальную толщину слоя жидкости, при

которой производительность УЗ распыления в слое будет максимальной при заданной амплитуде колебаний излучающей поверхности преобразователя. Это означает, что для обеспечения максимальной производительности УЗ распыления при заданной амплитуде колебаний необходимо поддерживать определенную толщину слоя жидкости, рассчитываемую на основании значений вязкости и поверхностного натяжения для каждой конкретной жидкости. Эта толщина слоя будет оптимальной для рассматриваемой жидкости.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Для практического определения оптимальной толщины слоя и подтверждения теоретических расчетов был проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве экспериментальной жидкости использовалось оливковое масло ($\eta=85 \cdot 10^{-3}$ Па·с).

На рисунке 5,а представлено фото УЗ излучателя при толщине слоя масла на его поверхности 1,6 мм. На краях преобразователя отчетливо видно белое кавитационное облако. Фото на рисунке 5,б соответствуют толщине слоя 1,8 мм. В местах наиболее развитой кавитации (на краях рабочего инструмента УЗ колебательной системы) видны фонтаны аэрозоля. Этот факт еще раз подтверждает кавитационный механизм распыления вязких жидкостей. Фото на рисунке 5,в соответствует толщине слоя масла 2,2 мм. Наблюдается резкое увеличение высоты факела распыления, то есть производительности процесса, при этом видно, что вся поверхность рабочего инструмента покрыта кавитационными пузырьками.



а) толщина слоя 1,6 мм б) толщина слоя 1,8 мм в) толщина слоя 2,2 мм

Рис. 5 Иллюстрация кавитационного механизма распыления

Таким образом, в результате проведенного эксперимента установлено, что образование кавитации является неотъемлемым фактором и движущей силой УЗ распыления вязких жидкостей.

Дальнейшее экспериментальное исследование было направлено на определение максимальной эффективности УЗ распыления. Эффективность оценивалась по высоте факела распыления. При этом принималось, что наибольшей высоте факела

распыления соответствует максимальная эффективность.

На рисунке 6 приведена серия фотографий, полученных в ходе проведения эксперимента для оливкового масла. Результаты экспериментов, показанные на представленных фотографиях, подтверждают экстремальную зависимость эффективности распыления от толщины слоя жидкости.

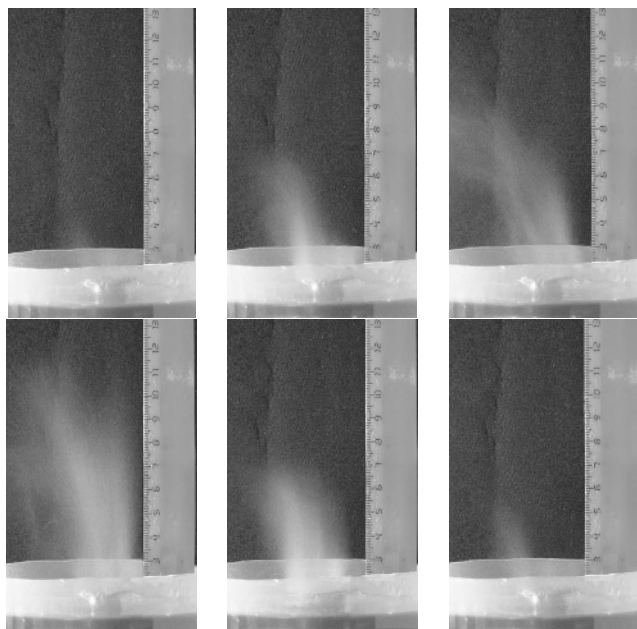
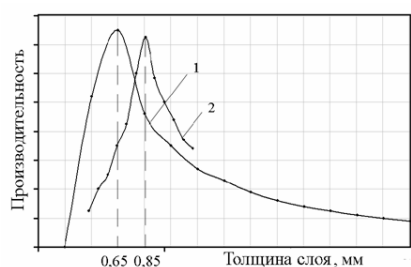
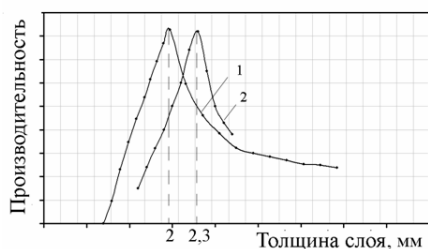


Рис. 6 Иллюстрация зависимости высоты факела аэрозоля от толщины слоя жидкости в процессе распыления



(1) – теоретическая; (2) – экспериментальная (вода)



(1) – теоретическая; (2) – экспериментальная (оливковое масло)

Рис. 7 Зависимость производительности распыления от толщины слоя жидкости

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено сравнение оптимальных толщин слоя жидкости найденных расчетным путем и полученных

экспериментально. Полученные графики представлены на рисунке 7.

Анализ графиков показывает, что кривые, построенные на основании теоретических исследований и кривые, построенные по экспериментальным данным, довольно хорошо совпадают. Однако, значение оптимальной толщины слоя, рассчитанной теоретически, оказывается меньше практической. Это отличие можно объяснить тем, что:

- 1) при теоретических расчетах в рассмотрение принимался кавитационный пузырек одного наиболее часто встречающегося начального радиуса. Однако, на практике, начальный радиус кавитационной полости варьируется в некоторых пределах;
- 2) при расчетах не учитывалось взаимодействие пузырьков между собой в жидкости;
- 3) при построении модели принималось, что каждый кавитационный пузырек при захлопывании, образует ударную волну, которая в свою очередь вызывает образование на поверхности жидкости капиллярной волны. Однако, в действительности, при захлопывании пузырька направление фронта ударной волны может быть направлено не к поверхности жидкости. По-видимому, большей степени именно этим фактом объясняется расхождение результатов полученных теоретическим и экспериментальным путями.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, не смотря на имеющиеся расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами, которые объясняются допущениями, принятыми при теоретических расчетах, предложенная в данной статье модель распыления вязких жидкостей позволяет с приемлемой точностью описывать процессы, происходящие в жидкости при распылении, и определять оптимальные параметры УЗ распыления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961.
- [2] Богуславский Ю. Я., Экнадиоянс О. К. О физическом механизме распыления жидкости акустическими колебаниями. – Акуст. Ж., 15 вып.1, 17, 1969.
- [3] Экнадиоянс О. К. О распыление жидкости низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. – Акуст. ж., 12, вып. 1, 127, 1970
- [4] Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). – М.: Химия, 1983. – 192 с., ил.
- [5] Ультразвуковая технология / Под ред. Б. А. Аграната, - М., Металлургия, 1974.
- [6] Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л. Д. Розенберга - М., Наука, 1968.
- [7] Коул. Р. Подводные взрывы. ИЛ, 1950.