

# Распыление жидкостей ультразвуком

Владимир Н. Хмелев, Андрей В. Шалунов, Роман В. Барсуков, Сергей Н. Цыганок, Алексей Н. Сливин, Евгений В. Чипурин.

Бийский технологический институт

Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

**Аннотация**—В работе рассмотрены проблемы связанные с распылением вязких жидкостей ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. Предложены пути повышения интенсивности ультразвукового распыления путем, выработки критерия управления процессом кавитации возникающей на поверхности излучателя. Приведены описание проведенных испытаний, подтверждающих достоверность выбранного критерия определения максимальной эффективности процесса ультразвукового распыления.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое распыление жидкостей является одним из перспективных направлений промышленного применения ультразвука. Основным преимуществом ультразвукового (УЗ) распыления жидкостей, по сравнению с традиционными способами [1], является низкая энергоемкость и высокая производительность процесса.

УЗ распыление жидкости позволяет получить тонкие малодисперсные аэрозоли, что находит применение в медицине, в топливной, радиоэлектронной и металлообрабатывающей промышленности. Одной из важнейших задач распыления в этих областях является распыление вязких жидкостей и жидкостей содержащих мелкодисперсные механические включения (например распыление смазочно-охлаждающей жидкости при резании металла, распыление фоторезистива при изготовлении интегральных схем). Однако в настоящее время практически отсутствуют устройства, позволяющие реализовать ультразвуковое распыление вязких жидкостей. Это связано в первую очередь со сложностью поддержания непрерывного, монодисперсного процесса УЗ распыления в вязких средах.

Следовательно, существует объективная необходимость в создании УЗ оборудования способного осуществлять распыление вязких жидкостей с заданными дисперсностью аэрозоля и производительностью процесса.

Для создания подобного оборудования необходимо решить ряд частных задач:

- теоретически исследовать механизмы УЗ распыления применительно к вязким жидкостям;
- выявить условия и режимы УЗ воздействия для реализации оптимального механизма распыления;

- на основе проведенных исследований сформулировать требования к аппаратуре для УЗ распыления вязких жидкостей.

- осуществить разработку экспериментального оборудования и провести исследования, подтверждающие теоретические предположения.

## II. МЕХАНИЗМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Различают распыление жидкостей высокочастотными (1...3 МГц) и низкочастотными (22...200 кГц) ультразвуковыми колебаниями. Для промышленного применения наиболее приемлемым является второй способ, т.к. он обладает большей производительностью, а размеры капель формируемого аэрозоля в большинстве случаев удовлетворяют заданным условиям. В частности, распыление жидкостей с высокой вязкостью возможно исключительно низкочастотными ультразвуковыми колебаниями из-за аномально высокого затухания высокочастотных колебаний в таких материалах. Поэтому далее будет рассматриваться распыление только низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. Наиболее эффективно организовать этот процесс, осуществляя распыление в слое жидкости [1].

При акустическом распылении, как и при любом другом виде силового (мощность ультразвукового излучения свыше 1...10 Вт/см<sup>2</sup>) ультразвукового воздействия где присутствует непосредственный контакт ультразвуковой колебательной системы и озвучиваемой среды, для определения критерия эффективности и максимальной производительности процесса, необходимо рассматривать систему: озвучиваемая среда - колебательная система - генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты.

Для осуществления анализа приведенной системы необходимо, в каждом из ее элементов выделить параметры, оказывающие наибольшее влияние на рассматриваемый процесс акустического распыления. Затем нужно проанализировать взаимное влияние этих параметров.

В первую очередь следует рассмотреть изменения, происходящие в озвучиваемой среде, так как ее параметры оказывают максимальное влияние на остальные элементы системы среда - колебательная система - генератор, и в целом определяют ход протекания процесса ультразвукового распыления.

При ультразвуковом распылении жидкости в слое, распыляемая жидкость характеризуется несколькими параметрами, оказывающими основное влияние [1] на

кинетику и интенсивность процесса. Этими параметрами являются: вязкость, поверхностное натяжение жидкости и толщина слоя распыляемой жидкости. Первый параметр определяет кинетику (а именно, преобладающий механизм каплеобразования), второй энергетику, а толщина слоя - интенсивность процесса.

В работе [2] показано, что при ультразвуковом низкочастотном распылении жидкости в слое реализуются различные механизмы образования капель аэрозоля:

1. воздействие ударных волн, образующихся в результате захлопывания кавитационных полостей у поверхности раздела: жидкость – газ;
2. отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности полусферических выступов, образованных парогазовыми пузырьками, пульсирующими у поверхности жидкости;
3. отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды на поверхности жидкости при отсутствии парогазовых кавитационных пузырьков.

Каждый из перечисленных механизмов каплеобразования вносит различный «вклад» в общее количество создаваемого аэрозоля. Размер этого «вклада» зависит от вязкости жидкости. Так, при распылении жидкости, обладающей сравнительно большой вязкостью (свыше 20 спс), наиболее эффективное распыление осуществляется при преобладании второго из механизмов. В случае менее вязких жидкостей доминирующим является третий механизм. Первый из рассмотренных механизмов приводит к образованию крупных капель-брызг, диаметр которых на порядки больше диаметра капель, образующихся из капиллярных волн. Этот механизм является мешающим фактором при УЗ распылении, и должен исключаться.

Преобладание того или иного механизма каплеобразования определяется мощностью подводимой акустической энергии при неизменной поверхности распыления. В зависимости от мощности УЗ излучения указанные механизмы капле образования располагаются как показано на рисунке 1.

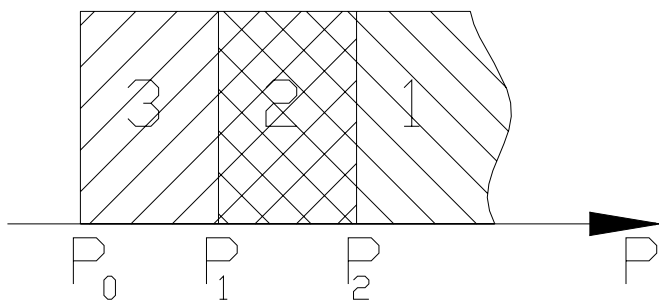


Рис. 1. Зависимость механизма каплеобразования от мощности ультразвукового излучения

Из рисунка видно, что для эффективного распыления вязких жидкостей мощность подводимой акустической

энергии необходимо поддерживать в следующих границах:

$$P_1 \leq P \leq P_2$$

Численные значения мощностей излучения соответствующие границам диапазона 2 зависят от вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

Поверхностное натяжение жидкости определяет то количество акустической энергии, которое необходимо израсходовать на увеличение общей свободной поверхности распыляемого вещества. Следовательно, для распыления жидкостей с высоким поверхностным натяжением при той же вязкости необходимо затратить большее количество акустической энергии, т.е. значения мощностей излучения соответствующие границам диапазона 2 являются сложной функцией 2-х переменных и теоретически вычислить их значение не представляется возможным. Следовательно, необходимо разработать какой либо практический подход для их экспериментального определения. Для этого необходимо рассмотреть взаимосвязь: озвучиваемая среда – УЗ колебательная система.

Анализ работ [2,3] показывает, что с ростом амплитуды ультразвуковых колебаний рабочего окончания колебательной системы линейно возрастает и интенсивность акустического распыления, рисунок 2

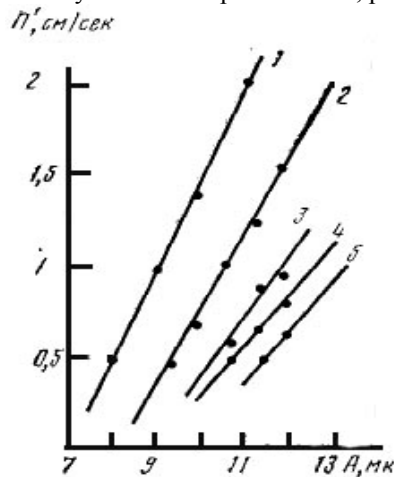


Рис. 2 Зависимость скорости распыления смесей глицерин вода от амплитуды колебаний

- 1 – 1 спс
- 2 – 2 спс
- 3 – 3 спс
- 4 – 4 спс
- 5 – 5 спс

Однако, как было сказано выше, при превышении амплитудой УЗ колебаний некоторого порогового значения, происходит разбрызгивание жидкости, и дальнейшее увеличение амплитуды УЗ колебаний является бессмысленным. Следовательно, существует объективная необходимость в определении этого порогового значения для достижения максимальной эффективности распыления. Как было сказано ранее, разбрызгивание жидкости связано с возникновением кавитации на границе раздела: жидкость – газ. Поэтому ранее считалось, что критерием эффективного УЗ

распыления является амплитуда колебаний, обеспечивающая интенсивность УЗ колебаний близких, но недостаточных для возникновения в среде кавитации.

Проведенные авторами исследования показали, что амплитуду УЗ колебаний при распылении вязких жидкостей можно увеличить, используя несколько другой критерий эффективности УЗ распыления. Известно, что при излучении УЗ колебаний в жидкие среды интенсивность первичной звуковой волны затухает по следующему закону [4]:

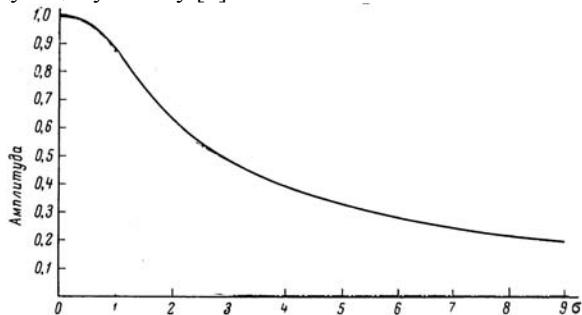


Рис. 3 Зависимость изменения амплитуды волны от расстояния

При такой зависимости, интенсивности УЗ колебаний от расстояния до излучающей поверхности концентратора, кавитационные пузырьки, первоначально, образуются на поверхности концентратора, причем, при равномерном распределении интенсивности УЗ колебаний по поверхности излучателя, поверхность будет равномерно покрыта слоем кавитационных пузырьков. При увеличении амплитуды УЗ колебаний количество пузырьков на поверхности УЗ излучателя будет увеличиваться до тех пор, пока поверхность не будет равномерно покрыта плотным слоем кавитационных пузырьков. При дальнейшем увеличении амплитуды УЗ колебаний кавитационное облако будет разрастаться и может достигнуть поверхности жидкости, что является недопустимым.

Следовательно, амплитуду УЗ колебаний необходимо ограничивать на уровне, при котором только поверхность преобразователя покрыта слоем кавитационных пузырьков. Как правило, толщина такого слоя много меньше толщины слоя озвучиваемой жидкости. При этом интенсивность первичной УЗ волны уменьшится и зависимость приобретет вид [4], показанный на рисунке 4

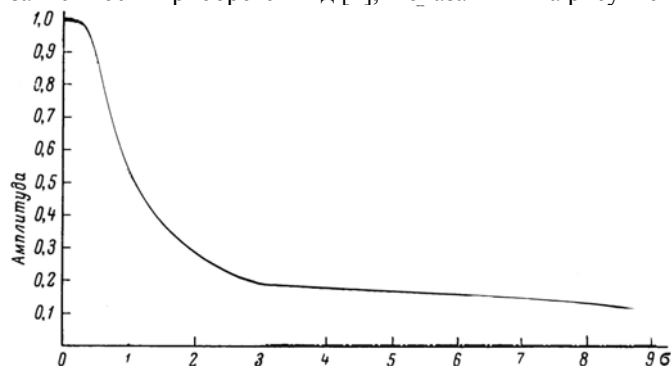


Рис. 4 Зависимость изменения амплитуды волны от расстояния при наличии кавитации

Уменьшение интенсивности первичной УЗ волны, многократно компенсируется возникновением под поверхностных ударных волн, энергия которых на порядки превосходит энергию первичной УЗ волны [4], образующихся при захлопывании кавитационных пузырьков. При достижении ударной волной границы раздела жидкость – газ на поверхности жидкости образуется остроконечное вспучивание, напоминающее по форме капиллярную волну [2], но значительно большей амплитуды, от краев которого происходит отрыв капелек. Кроме этого при захлопывании кавитационных пузырьков происходит их дробление на несколько мелких, часть из которых всплывает к поверхности жидкости и продолжает пульсировать с частотой УЗ колебаний превращаясь в резонансные пузырьки необходимые для второго механизма распыления. Следовательно, в этом случае мы работаем на границе второго участка показанного на рисунке 1. Как показали проведенные эксперименты, в этом случае интенсивность распыления увеличивается как минимум в два раза.

Следовательно, амплитуду при которой происходит образование на поверхности излучателя тонкого слоя кавитационных пузырьков, следует считать обеспечивающей максимальную эффективность ультразвукового распыления. Как известно из теории кавитации [4] эта амплитуда зависит от поверхностного натяжения и вязкости жидкости и будет различной для разных жидкостей. Практически определять эту амплитуду можно, при помощи известного эффекта уменьшения волнового сопротивления жидкости при возникновении в ней кавитации[5]. При этом в качестве датчика осуществляющего измерение волнового сопротивления жидкости выступает сама колебательная система [6]. Измерение волнового сопротивления осуществлялось по способу описанному в [5]. Характер изменения волнового сопротивления жидкости при развитии в ней кавитации будет иметь вид показанный на рисунке 5:

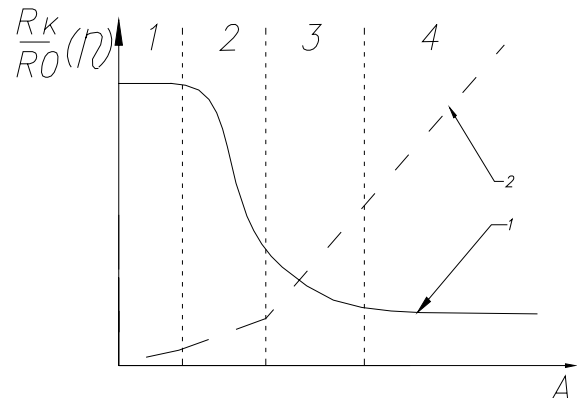


Рис.5 – Зависимость степени развитости кавитации (1) и интенсивности ультразвукового распыления (2) от амплитуды колебаний

На этом рисунке представлены 4 зоны:

1-нет кавитации

2-зарождение кавитационной области

3-распространение кавитационной области по всей поверхности излучателя

4-распространение кавитационной области по всему объему распыляемой жидкости (разбрызгивание жидкости).

Данные зависимости приведены без учета масштабных коэффициентов по оси ординат, однако позволяют судить о том, что максимум интенсивности ультразвукового распыления совпадает с зоной где кавитационная область покрывает всю излучающую поверхность УЗ преобразователя.

### III. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для подтверждения правильности выбранного критерия определения максимальной интенсивности УЗ распыления при возникновении кавитации был разработан специализированный ультразвуковой аппарат, предназначенный для распыления жидкостей с вязкостью более 15 спз. В состав аппарата входит ультразвуковая колебательная система и электронный блок генератора УЗ колебаний. Разработанная колебательная система представлена на рисунке 6.

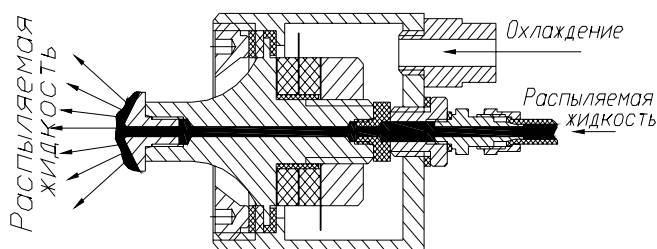


Рис. 6 Ультразвуковая колебательная система для распыления жидкостей

Подача распыляемой жидкости осуществляется через внутренний канал, что позволяет предварительно уменьшить вязкость жидкости, под воздействием УЗ колебаний внутри канала.

Колебательная система снабжена сменными рабочими инструментами, предназначенными для формирования различных форм факела УЗ распыления. Сменные инструменты показаны на рисунке 7.



Рис. 7 Сменные рабочие инструмента

При помощи разработанного аппарата был проведен ряд экспериментов по распылению различных жидкостей, в частности: раствор глицерин-вода, сахарного сиропа, этиленгликоля и фотрорезиста применяемого при изготовлении интегральных схем. На следующих рисунках показано изменение плотности факела при распылении жидкости в режиме кавитации.

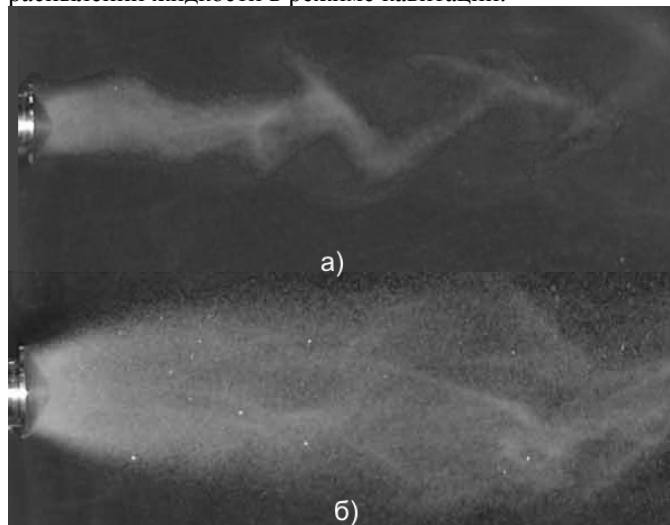


Рис. 8 Распыление xx% раствора глицерин вода  
а) без кавитации

б) с образованием кавитации на поверхности излучателя

Из рисунков видно, что при распылении в режиме кавитации факел получается более плотный и однородный, что доказывает справедливость представленный теоретических исследований.

Внешний вид разработанного аппарата представлен на рисунке 9, ниже приведены технические характеристики.



Рис.9 Аппарат для ультразвукового распыления жидкостей

Таблица 1.

Технические характеристики

Потребляемая мощность, Вт, не более	100
Вязкость распыляемой жидкости, сПз	15..50
Частота возбуждаемых механических колебаний, кГц	44
Средний размер распыляемых частиц, мкм	40..50
Производительность, мл/с	До 1

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ механизмов распыления, позволил установить что при ультразвуковом распылении определяющим является отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн на поверхности полусферических выступов, образованных парогазовыми пузырьками, пульсирующими у поверхности жидкости и остроконечных вспучиваний, образованных подповерхностными ударными волнами, полученными в результате захлопывания кавитационных пузырьков при условии возникновения на поверхности излучателя кавитационных пузырьков.

Исследование кавитационного распыления вязких жидкостей позволило установить оптимальные режимы ультразвукового воздействия и сформулировать требования к аппаратуре.

Разработанная экспериментальная установка и проведенные исследования подтвердили правильность теоретического исследования, что позволяет считать выбранный путь решения проблемы распыления вязких жидкостей перспективным и развивать его применение в различных технологических процессах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л. Д. Розенберга - М., Наука, 1968.

- [2] Ю. Я. Богуславский, О. К. Экнадиоянс. О физическом механизме распыления жидкости акустическими колебаниями. – Акуст. Ж., 15 вып.1, 17, 1969.
- [3] О. К. Экнадиоянс О распыление жидкости низкочастотными ультразвуковыми колебаниями. – Акуст. ж., 12, вып. 1, 127, 1970
- [4] Мощные ультразвуковые поля. / Под ред. Л. Д. Розенберга - М., Наука, 1968.
- [5] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tsyganok S.N., Levin S.V., Demidova T.A. "Automation of Advanced Cavitation Mode Obtaining Process in Liquid Mediums", Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: WorkshopProceedings. - Novosibirsk:NSTU, 2003. - p. 222-226
- [6] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В. Способ управления процессом ультразвуковой липосакции. Патент РФ №2247544