

# Выявление Режимов Ультразвукового Воздействия для Распыления Жидкостей с Заданными Дисперсностью и Производительностью

[Владимир Н. Хмелев](#), *Senior Member*, IEEE, [Андрей В. Шалунов](#), Анна В. Шалунова, *Student Member*, IEEE, [Роман Н. Голых](#) *Student Member*, IEEE

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

**Аннотация** – В статье представлены результаты экспериментов по определению зависимостей среднего диаметра, среднеквадратичного отклонения формируемых капель и производительности распыления от режимов УЗ воздействия (амплитуда и частота) и свойств распыляемых жидкостей (вязкость и поверхностное натяжение). Полученные зависимости позволяют определить все исходные параметры, необходимые для проектирования УЗКС для распыления различных жидкостей.

**Ключевые слова** – ультразвук, аэрозоль, распыление.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Значительное число процессов химических технологий реализуется в двухфазных системах жидкость – газ. Это мокрая очистка газов от различных дисперсных примесей, абсорбция газовых примесей (как для их очистки, так и для выделения целевых компонентов), сушка и гранулирование материалов; нанесение различных покрытий и др.

Наиболее эффективным способом интенсификации таких процессов является увеличение поверхности контакта фаз между веществами, находящимися в жидкой и газообразной фазах, за счет увеличения свободной поверхности вещества, находящегося в жидкой фазе. Поскольку распыление представляет собой один из наиболее эффективных способов увеличения свободной поверхности жидкости, оно получило очень широкое распространение при реализации различных технологических процессов и его совершенствование является одной из важнейших задач науки и промышленности.

Широко используемые способы распыления: гидравлическое, механическое, пневматическое и электростатическое обладают большим количеством недостатков.

В этой связи перспективным направлением совершенствования различных технологических процессов является поиск, развитие и применение новых высокоэффективных способов распыления жидкостей. Наиболее перспективным из них является распыление за счет использования энергии механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты высокой интенсивности – ультразвуковое распыление. Несомненные достоинства (низкая энергоёмкость, возможность формирования

мелкодисперсных капель без применения дополнительных газовых носителей и т.п.) должны были обеспечить повсеместное распространение и применение ультразвукового распыления. Однако ультразвуковой способ пока не получил широкого промышленного распространения[1].

Обусловлено это сильной зависимостью дисперсных характеристик формируемых капель жидкости и производительности распыления от свойств жидкости и параметров УЗ воздействия[2]. Это приводит к необходимости подбора необходимой величины ультразвукового воздействия для каждой распыляемой жидкости в зависимости от ее свойств и требуемой производительности распыления. На сегодняшний день, подбор требуемой величины УЗ воздействия осуществляется вручную, как правило, основываясь на эмпирических знаниях оператора. Это вызывает не только ухудшение дисперсных характеристик образующихся капель жидкости в сравнении с оптимальным воздействием, но и невозможность точного воспроизведения результатов.

Несмотря на существенность обозначенной проблемы, к настоящему времени выполнено недостаточное количество теоретических исследований и практических работ, позволяющих ее решить.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения режимов (частоты и амплитуды УЗ колебаний) УЗ воздействия, обеспечивающих распыление жидкостей с заданными дисперсными характеристиками и производительностью был проведен ряд экспериментов, заключавшихся:

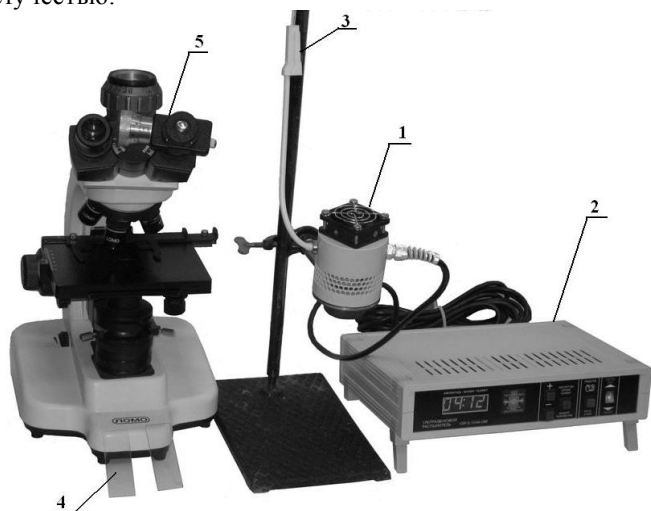
1) в определении зависимости среднего диаметра формируемых капель от амплитуды и частоты ультразвукового воздействия.

2) в определении зависимости среднего диаметра формируемых капель от вязкости и поверхностного натяжения распыляемой жидкости.

3) определения зависимости производительности распыления от частоты УЗ воздействия.

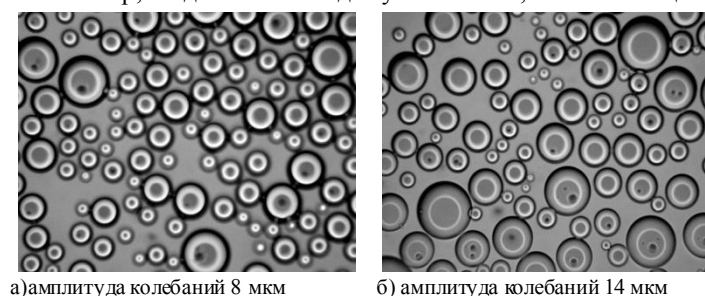
Для проведения этих экспериментов была разработана экспериментальная установка, показанная на Рис. 1.

Для измерения размеров частиц при проведении экспериментов предметное стекло 4 покрывалось слоем вязкой жидкости (иммерсионная среда), в которой капли распыляемой жидкости не растворяются достаточно для фотографирования время. При этом, иммерсионная среда должна соответствовать следующим требованиям: не вступать с частицами во взаимодействие, которое может привести к изменению формы, не обладать повышенной летучестью.



1 – ультразвуковой распылитель; 2 – генератор, 3 – дозатор, 4 – предметное стекло, 5 – микроскоп МИКМЕД-6.  
 Рис. 1. Экспериментальная установка для определения дисперсного состава формируемых капель жидкости

В качестве такой среды использовалось трансформаторное масло. После стабилизации работы распылителя, предметное стекло с иммерсионным слоем проносилось равномерно через факел распыленной жидкости, нормально к его оси на расстоянии 380 мм. Затем стекло устанавливалось на предметный столик микроскопа 5 и производилось микрофотографирование капель распыленной жидкости. Для микрофотографирования использовался микроскоп типа МИКМЕД-6 и цифровой фотоаппарат. Далее снимки передавались на персональный компьютер, где по каждому из них, с помощью



а) амплитуда колебаний 8 мкм

б) амплитуда колебаний 14 мкм

компьютерной программы распознавания графических объектов, определялись средние диаметры капель.

На Рис. 2 представлен внешний вид интерфейса разработанной программы.

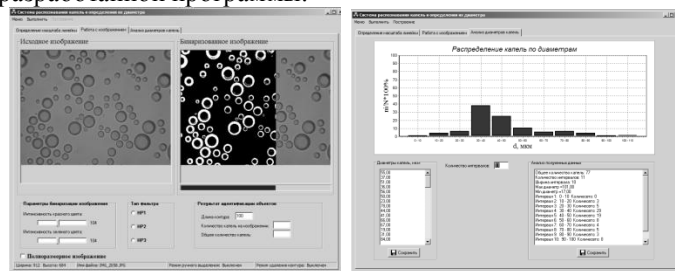


Рисунок 2 – Внешний вид интерфейса программы для определения диаметра капель

Для проведения экспериментов были использованы 4 ультразвуковых распылителя с рабочими частотами 22 кГц, 44 кГц, 60 кГц и 130 кГц[3].

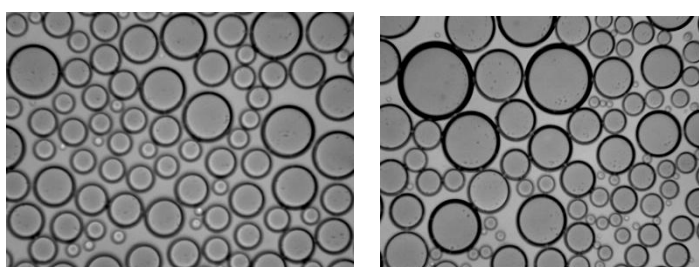
### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении экспериментов в качестве распыляемых жидкостей использовались [4]:

- 1) вода;
- 2) водные растворы с различной концентрацией глицерина (для создания жидкостей с различной вязкостью и равным поверхностным натяжением);
- 3) водные растворы с различной концентрацией этилового спирта (для создания жидкостей с различным поверхностным натяжением и равной вязкостью).

На Рис. 3 и 4 представлены полученные фотографии сформированных капель жидкости. Даже по фотографиям можно говорить о росте диаметра капель с увеличением амплитуды на одной частоте.

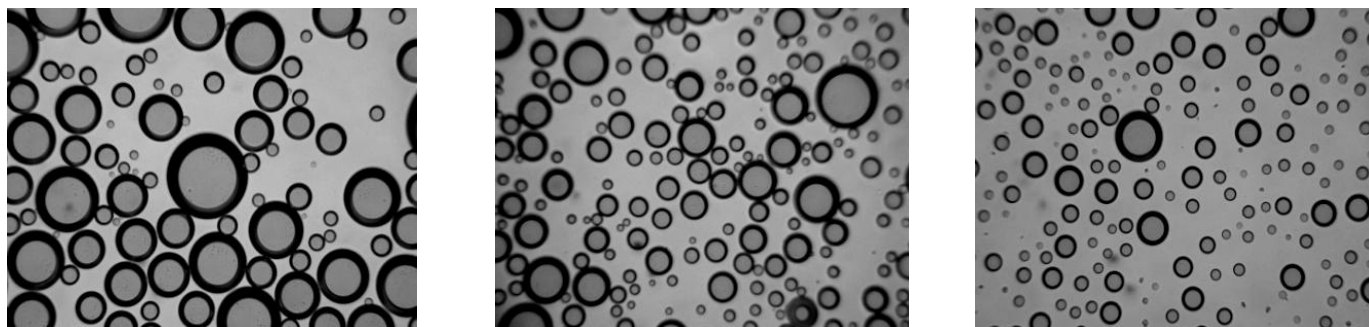
На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости среднего диаметра и среднеквадратичного отклонения (СКО) формируемых капель от амплитуды колебаний распылительной поверхности, показанные на Рис. 5.



в) амплитуда колебаний 18 мкм

г) амплитуда колебаний 21 мкм

Рис. 3. Фото капель жидкости полученных на частоте 22 кГц при различных амплитудах УЗ колебаний

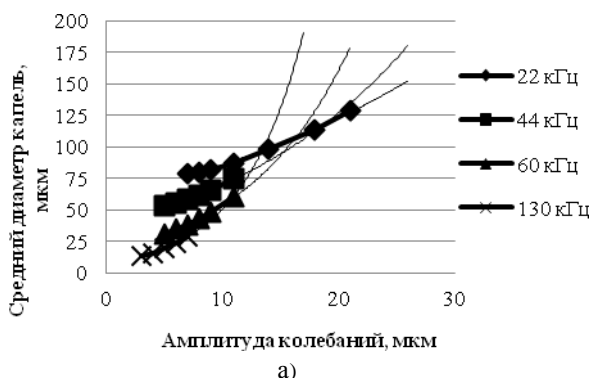


а) вязкость 6 мПа\*с

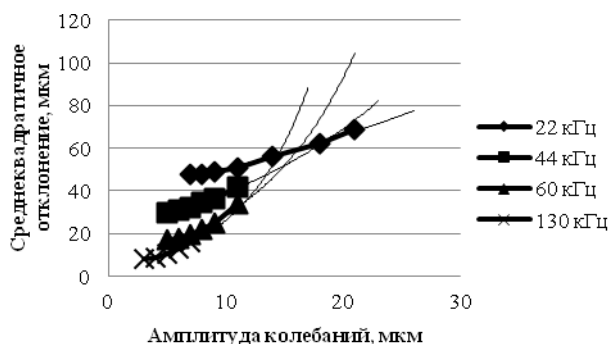
б) вязкость 15 мПа\*с

в) вязкость 30 мПа\*с

Рисунок 4 – Фото капель жидкостей с различной вязкостью, полученных на частоте 22 кГц при амплитуде УЗ колебаний 11 мкм



а)



б)

Рис. 5. Зависимость среднего диаметра формируемых капель(а) и СКО(б) от амплитуды колебаний распылительной поверхности

Представленные графики позволили установить, что зависимость между средним диаметром формируемых капель и амплитудой колебаний распылительной поверхности имеет не линейный характер. С увеличением амплитуды колебаний происходит значительный рост среднего диаметра и СКО капель. Аппроксимация полученных зависимостей в область высоких амплитуд колебаний, позволила установить более быстрое возрастание СКО диаметров для высоких частот, что вызывает необходимость более точного поддержания установленной амплитуды колебаний на высоких частотах УЗ воздействия.

Для практического использования полученных результатов была получена зависимость среднего диаметра формируемых капель жидкости от частоты УЗ воздействия при минимальной амплитуде УЗ колебаний (при которой

процесс распыления только начинался), показанная на Рис. 6.

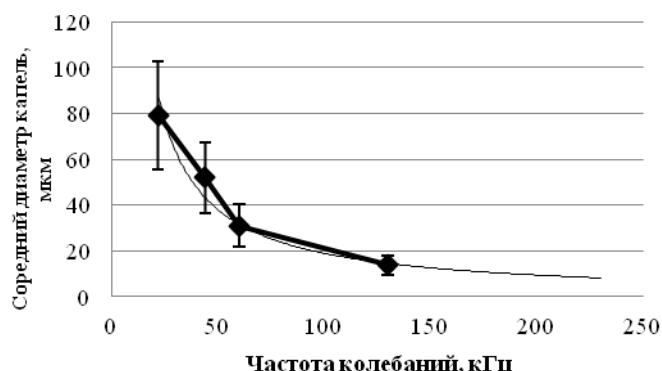


Рис. 6. Зависимость среднего диаметра формируемых капель от частоты УЗ воздействия

Представленная зависимость показывает, что уменьшение диаметров наблюдается во всем диапазоне исследуемых частот. Проведенная аппроксимация показывает, что начиная с частот больших 100 кГц, скорость уменьшения диаметра капель с ростом частоты несколько падает. Полученная зависимость свидетельствует о необходимости повышения частоты УЗ колебаний свыше 100 кГц и создания УЗ колебательных систем, способных обеспечивать на указанных частотах воздействие с амплитудами, достаточными для распыления жидкостей. Для этого необходимо разработать новые конструкции высокочастотных УЗ колебательных систем для распыления жидкостей, которые позволят формировать аэрозоли со средним диаметров 10 мкм и менее.

Полученная зависимость является базовой, необходимой для начального определения рабочей частоты распылителя, обеспечивающего формирование капель с требуемым средним диаметром.

Для обеспечения производительности, достаточной для практического использования ультразвукового распыления жидкостей, необходимо увеличивать амплитуду УЗ колебаний. Однако, как было экспериментально установлено, увеличение амплитуды колебаний приводит к увеличению среднего диаметра и СКО формируемых капель. Это обуславливает необходимость, в определении амплитуды УЗ колебаний распылительной поверхности при которой обеспечивается достаточная производительность распыления, но СКО и средний диаметр и формируемых

капель не превышают установленных значений. Для этого были получены зависимости удельной производительности распыления от амплитуды колебаний, для всех исследуемых частот УЗ воздействия, показанные на Рис. 7.

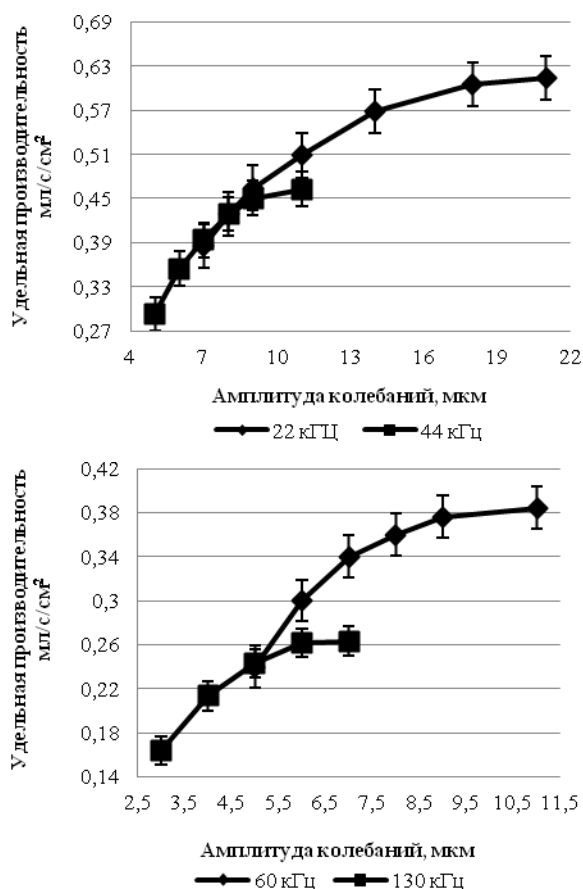


Рис. 7. Зависимость производительности распыления от амплитуды колебаний распылительной поверхности для различных частот

Как следует из графиков, после некоторого значения амплитуды (зависящего от частоты УЗ воздействия) рост производительности практически прекращается. При этом дальнейшее увеличение амплитуды приводит только к ухудшению дисперсных характеристик формируемых капель.

На основе анализа результатов практического применения УЗ распыления в процессах химической технологии (распылительная сушка и нанесение фоторезиста на поверхность кремниевых пластин) было установлено [5,6], что их эффективная реализация обеспечивается, если СКО диаметров формируемых капель жидкости не превышает 60%. Это условие выполняется, при выборе амплитуды УЗ колебаний на уровне, обеспечивающем 80% от разницы между максимальной и минимальной производительности распыления и может считаться оптимальным для практической реализации процессов. Так для частоты колебаний распылительной поверхности 22 кГц это будет амплитуда в 14 мкм, для 44 кГц – 8 мкм, для 60 кГц – 7 мкм и для 130 кГц – 5 мкм.

На рисунке 8 показаны зависимости среднего диаметра и дисперсии формируемых капель от частоты, при выявленных амплитудах УЗ колебаний.

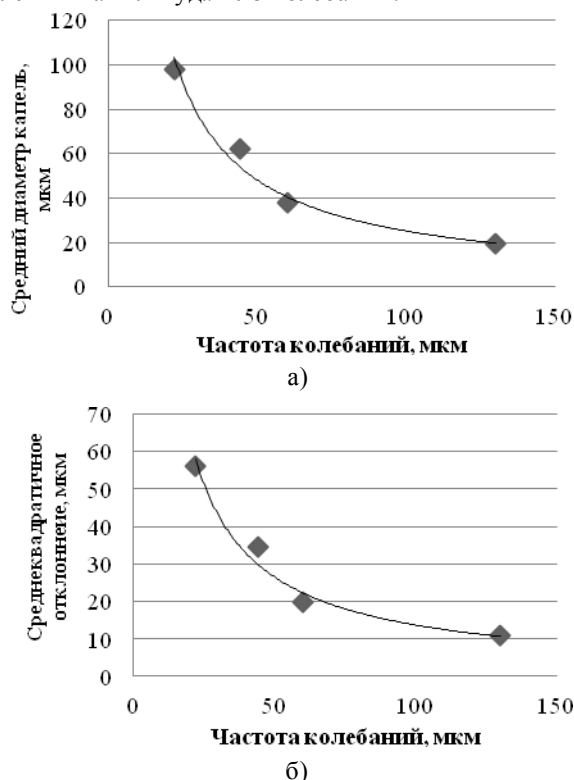


Рис. 8. Зависимости среднего диаметра (а) и СКО (б) диаметра формируемых капель от частоты УЗ воздействия

Таким образом, были определены зависимости, с помощью которых можно установить частоту и амплитуд УЗ колебаний, обеспечивающие формирование факела распыления с заданными дисперсными характеристиками.

Помимо режимов УЗ воздействия на дисперсные характеристики формируемых капель также оказывают влияние физические свойства жидкостей, подвергаемых распылению. Это вязкость и поверхностное натяжение жидкости.

Первоначально было исследовано влияние вязкости жидкости на дисперсные характеристики формируемых капель. На основании полученных экспериментальных данных были построены зависимости среднего диаметра (Рис. 9.а) и СКО (Рис. 9.б) формируемых капель от вязкости жидкости, при оптимальных амплитудах колебаний распылительной поверхности (14 мкм, на частоте 22 кГц, 8 мкм, на частоте 44 кГц, 7 мкм, на частоте 60 кГц, 5 мкм, на частоте 130 кГц). Указанные значения амплитуд УЗ колебаний обеспечивали распыление жидкостей с максимальной вязкостью.

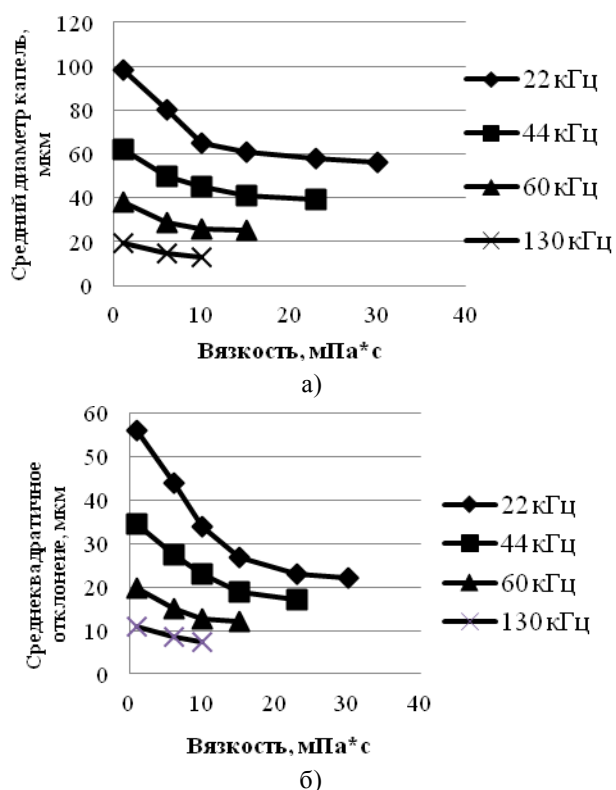


Рис. 9. Зависимость среднего диаметра (а) и СКО (б) формируемых капель от вязкости распыляемой жидкости

Видно, что с ростом частоты уменьшается максимально допустимое значение вязкости распыляемой жидкости. Увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению диаметра формируемых капель. При этом наибольшее влияние проявляется до значений вязкости порядка 10...15 мПа\*с, после чего уменьшение диаметра капель практически прекращается.

Установлено, что при воздействии УЗ колебаниями на частоте 22 кГц изменение вязкости распыляемых жидкостей в пределах от 1 мПа\*с до 30 мПа\*с вызывает изменение диаметра формируемых капель от 96 мкм до 56 мкм; на частоте 44 кГц (вязкость 1 мПа\*с до 23 мПа\*с) – от 61 мкм до 39 мкм; на частоте 60 кГц (вязкость 1 мПа\*с до 15 мПа\*с) – от 38 мкм до 22 мкм; на частоте 130 кГц (вязкость 1 мПа\*с до 10 мПа\*с) – от 19 мкм до 13 мкм. В свою очередь, СКО диаметра формируемых капель жидкости при изменении вязкости изменяется следующим образом: на частоте 22 кГц уменьшается на 60%; на частоте 44 кГц на 59%; на частоте 60 кГц на 54%; на частоте 130 кГц на 40%.

Начальные (для вязкости 1 мПа\*с) значения средних диаметров капель, представленных зависимостей совпадают со значениями средних диаметров капель для невязких жидкостей (полученных для оптимальных значений амплитуды колебаний распылительной поверхности). Поэтому, представленные зависимости можно использовать для определения изменения среднего диаметра капель, вызванного сменой типа распыляемой жидкости или изменением вязкости распыляемой жидкости.

Далее были проведены исследования зависимости дисперсных характеристик формируемых капель от поверхностного натяжения распыляемой жидкости.

На рисунке 10 представлены полученные зависимости среднего диаметра и СКО формируемых капель от поверхностного натяжения жидкости при оптимальной амплитуде колебаний распылительной поверхности.

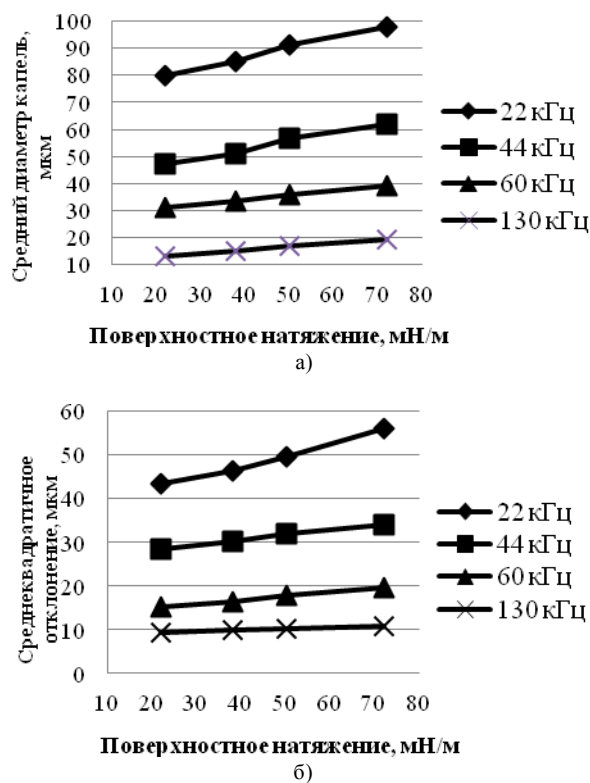


Рисунок 10 – Зависимость среднего диаметра (а) и СКО (б) формируемых капель от поверхностного натяжения распыляемой жидкости

Из графиков видно, что при малых поверхностных натяжениях средний диаметр формируемых капель уменьшается. Однако это уменьшение меньше, чем было получено в экспериментах для жидкостей с различными вязкостями. Так, изменение поверхностного натяжения в пределах от 22 мН/с до 72 мН/с вызывает изменение среднего диаметра формируемых капель: на частоте 22 кГц – от 80 мкм до 98 мкм; на частоте 44 кГц – от 47,2 мкм до 62 мкм; на частоте 60 кГц – от 31,2 мкм до 38 мкм; на частоте 130 кГц – от 13,4 мкм до 19,3 мкм. СКО формируемых капель жидкости, значительно зависит от поверхностного натяжения. Так при уменьшении поверхностного натяжения с 72 мН/м до 22 мН/м СКО диаметра уменьшается в 1,24 раз (или на 24%) при частоте УЗ воздействия 22 кГц.

Таким образом, в результате проведенных исследований были установлены зависимости формируемых средних диаметров и СКО диаметров формируемых капель жидкости от режимов УЗ воздействия и от свойств самой жидкости.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для определения рабочей частоты распылителя, обеспечивающей формирование капель с

заданными дисперсными характеристиками при проектировании УЗ распылителей. Учет полученных результатов является необходимым для определения амплитуды колебаний распылительной поверхности при распылении жидкостей различной вязкости и поверхностного натяжения при эксплуатации УЗ распылителей в реальных технологических процессах.

Важнейшим параметром, влияющим на эффективность процессов, основанных на распылении жидкости, является производительность распыления.

В ходе экспериментов была исследована зависимость максимальной производительности распыления от частоты УЗ колебаний. Для этого, при помощи системы регулирования подачи жидкости на распылительную поверхность, расход жидкости выбирался таким образом, чтобы распыляемая жидкость покрывала всю поверхность рабочего инструмента, но в то же время не происходил срыва распыления, т.е. вся жидкость, поступающая на поверхность распыления, переходила в аэрозольное состояние. Объем распыленной жидкости за определенный период времени (120 с.) измерялся мерной колбой. Таким образом, определялась максимальная производительность, обеспечиваемая каждым из распылителей (с рабочими частотами 22 кГц, 44 кГц, 60 кГц и 130 кГц).

На Рис. 11 приведена полученная зависимость максимальной удельной производительности распыления от частоты УЗ воздействия.

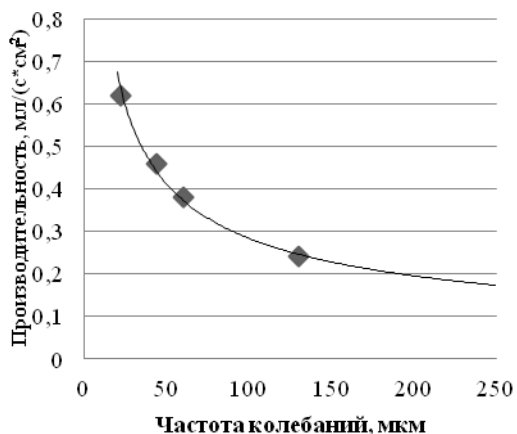


Рис. 11. Зависимость удельной производительности распыления от частоты УЗ воздействия

Полученная зависимость может использоваться для определения площади поверхности распыления, необходимой для обеспечения заданной производительности распыления.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены зависимости дисперсных характеристик распыления от режимов УЗ воздействия и свойств распыляемых жидкостей. Установлено, что:

1. С увеличением амплитуды УЗ колебаний происходит значительный рост среднего диаметра и СКО формируемых капель. Причем, наблюдается более быстрое возрастание

СКО для высоких частот, что вызывает необходимость более точного поддержания установленной амплитуды колебаний на высоких частотах воздействия.

2. Установлена целесообразность повышения частоты УЗ колебаний свыше 100 кГц и создания УЗ колебательных систем, способных обеспечивать на указанных частотах воздействие с амплитудами, достаточными для распыления жидкостей.

3. Выявлены значения амплитуды УЗ колебаний для распыления жидкостей, обеспечивающие достаточную производительность распыления при СКО диаметров формируемых капель жидкости не более 60%. Они равны: для частоты колебаний распылительной поверхности 22 кГц это будет амплитуда 14 мкм, для 44 кГц – 8 мкм, для 60 кГц – 7 мкм и для 130 кГц – 5 мкм.

4. Получены зависимости диаметров и СКО формируемых капель от вязкости и поверхностного натяжения жидкости. Полученные зависимости можно использовать для определения изменения среднего диаметра капель, вызванного сменой типа распыляемой жидкости или изменением ее физических свойств.

5. Установлена зависимость максимальной удельной производительности распыления от частоты УЗ воздействия. Она позволяет определять площадь поверхности распыления, необходимую для обеспечения заданной производительности распыления.

Полученные новые научные данные позволяют определить все исходные параметры, необходимые для проектирования и эксплуатации технологических аппаратов распыления различных жидкостей.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-369.2011.8 «Разработка и исследование мелкодисперсных распылителей вязких жидкостей на основе новых физических принципов многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). Б.Г. Новицкий. М.: Химия, 1983. –192 с.
- [2] Физические основы ультразвуковой технологии. / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. – 688 с.
- [3] Ультразвуковое распыление жидкостей. В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова. Барнаул АлтГТУ, 2010. 272 с.
- [4] Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8 /под ред. А.А.Равделя, А.М.Пономаревой. Л.: Химия, 1983 г. – 231 с
- [5] Разработка ультразвуковых диспергаторов жидких сред для распылительной сушки. В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова. Современные проблемы технической химии. Материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции. Секции 5-7. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. Ун-та, 2009, (с 13 – 20)
- [6] Ультразвуковой распылитель для химико-механического полирования. В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов. Сборник научных трудов «Современные проблемы радиоэлектроники» / под ред. А.И.Громыко, А.В. Сарафанова. Москва: Радио и связь, 2006. (С.181–184)