

На правах рукописи



Шалунова Анна Викторовна

**ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА РАСПЫЛЕНИЯ
С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДИСПЕРСНОСТИ,
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ФОРМЕ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бийск – 2012

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Хмелев Владимир Николаевич

Официальные
оппоненты: Попок Николай Иванович
доктор технических наук, профессор
ОАО ФНПЦ «Алтай», начальник лаборатории

Блазнов Алексей Николаевич
доктор технических наук, доцент
Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО АлтГТУ, профессор кафедры

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем химико-
энергетических технологий Сибирского
отделения Российской академии наук (ИПХЭТ
СО РАН)

Защита состоится 28 мая 2012 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан 25 апреля 2012

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Верещагин А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 промышленности.

Широко используемые способы распыления: гидравлическое, механическое, пневматическое и электростатическое – обладают большим количеством недостатков, снижающих эффективность технологических процессов и делающих их непригодными для практического применения.

В этой связи основными направлениями совершенствования различных процессов химических технологий являются 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 энергоемкость, 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. Обусловлено это сильной зависимостью дисперсных характеристик формируемых капель жидкости и производительности распыления от свойств жидкости и параметров УЗ воздействия, что приводит к необходимости подбора подходящей величины ультразвукового воздействия для каждой распыляемой жидкости в зависимости от ее свойств, площади распылительной поверхности и требуемой производительности распыления. На сегодняшний день подбор требуемой величины УЗ воздействия осуществляется вручную, как правило, на основании субъективных ощущений оператора. Это приводит к практической невозможности обеспечения оптимальных условий распыления, что вызывает ухудшение дисперсных характеристик образующихся капель жидкости.

Несмотря на существенность обозначенной проблемы, к настоящему времени выполнено недостаточное количество теоретических исследований и практических наработок, позволяющих ее решить. Поэтому задача выявления условий и режимов ультразвукового воздействия, необходимых для обеспечения факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме, является актуальной.

Цель работы – повышение эффективности процесса распыления жидкостей ультразвуковыми колебаниями за счет теоретического определения и экспериментального подтверждения режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование факела распыла с необходимыми производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками.

Задачи исследований:

- Установить основные закономерности процессов, происходящих на границе раздела жидкость–газовая среда при воздействии ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности на тонкий слой распыляемой жидкости и проводящих к распылению жидкости.
- На основе выявленных закономерностей, с учетом не изученных ранее влияющих факторов, предложить и разработать математическую модель, позволяющую анализировать процесс ультразвукового распыления жидкости в слое при различных режимах и условиях ультразвукового воздействия.
- На основе анализа разработанной модели, используя математическое моделирование, выявить зависимости параметров распыления различных по свойствам жидкостей от режимов УЗ воздействия, необходимых и достаточных для формирования капель жидкости с заданными дисперсными характеристиками и производительностью.
- Предложить и разработать методику расчета размеров распылительной поверхности, количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости, обеспечивающих формирование факела распыла с заданными характеристиками по форме и производительности.
- Провести экспериментальные исследования для подтверждения теоретически выявленных режимов и условий УЗ воздействия, обеспечивающих формирование факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме.
- На основе полученных теоретических и экспериментальных результатов предложить и разработать варианты практического применения созданных ультразвуковых распылителей жидкостей и подтвердить их эффективность.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является процесс распыления жидкостей ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на решение поставленных задач. Теоретические исследования проводились путем построения математических моделей, допускающих аналитические и численные решения.

Научная новизна:

- Впервые выявлены и математически описаны процессы, происходящие на границе раздела жидкость–газовая среда при воздействии ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности на тонкий слой распыляемой жидкости и проводящие к распылению жидкости.
- Впервые, на основе анализа предложенной модели процесса ультразвукового кавитационного распыления различных по физическим

свойствам жидкостей, установлена и подтверждена экспериментально зависимость производительности распыления и размеров формируемых капель от амплитуды и частоты ультразвукового воздействия.

– Для формирования факела распыла с заданными характеристиками по форме и производительности разработана методика расчета для определения необходимых размеров распылительной поверхности, количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости.

– Впервые определены зависимости дисперсных характеристик формируемых капель от поверхностного натяжения и вязкости распыляемых жидкостей, позволяющие устанавливать частоту и амплитуду УЗ воздействия для получения необходимого количества капель заданных размеров.

Практическая значимость:

– Разработана модель процесса ультразвукового кавитационного распыления, учитывающая влияние физических свойств распыляемых жидкостей и позволяющая определять частоту и амплитуду УЗ воздействия для формирования капель определенного диаметра с заданной производительностью.

– Экспериментально определены значения среднеквадратичного отклонения диаметра формируемых капель в зависимости от параметров УЗ воздействия и свойств жидкостей, необходимые для формирования факела распыления с задаваемой однородностью формируемых капель.

– Разработаны конструкции и методика расчета рабочих инструментов с различной площадью распылительной поверхности, позволившие обеспечить удельную производительность распыления до 0,62 мл/с с одного квадратного сантиметра поверхности.

– Предложены и реализованы на практике конструкции ультразвуковых распылителей, обеспечивающих, за счет установления и поддержания необходимых режимов ультразвукового воздействия, формирование факела распыляемых жидкостей с задаваемой производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками.

Личный вклад автора: предложена и разработана теоретическая модель процесса ультразвукового кавитационного распыления, позволяющая определять частоту и амплитуду УЗ воздействия, необходимые и достаточные для формирования капель с задаваемыми производительностью и средним диаметром, с учетом физических свойств распыляемых жидкостей; разработана методика расчета формы размеров распылительной поверхности; проведены экспериментальные исследования, подтвердившие теоретические результаты; предложены варианты практических конструкций УЗ распылителей, основанные на выявленных зависимостях и обеспечивающих формирование факела распыла с необходимыми производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались: на Международных конференциях-семинарах по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM'2008, 2009, 2010, 2011, г. Новосибирск);

Всероссийской научно-технической и методической конференции «Современные проблемы технической химии» (2009, г. Казань); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности» (2009, г. Бийск); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (2009, г. Бийск); Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП–2010, 2011, г. Бийск); Всероссийской научно-технической конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (2009, г. Красноярск).

Исследования проводились в рамках Государственного контракта № П2518 «Разработка и создание высокоэффективных электроакустических преобразователей для интенсификации процессов в газовых средах» в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы; Гранта Президента РФ для государственной поддержки российских ученых МК -369.2011.8 «Разработка и исследование мелкодисперсных распылителей вязких жидкостей на основе новых физических принципов многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия» (соисполнитель); НИОКР – регистрационный номер № 01.02.0509063.

На защиту выносятся:

- результаты теоретических исследований процесса распыления жидкостей УЗ колебаниями, позволяющие, с учетом физических свойств распыляемых жидкостей, определять частоту и амплитуду УЗ воздействия, необходимые для формирования капель с задаваемыми производительностью и средним диаметром;
- методика расчета размеров распылительной поверхности, количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости, обеспечивающих формирование факела распыла с заданными характеристиками формы и производительности;
- результаты экспериментальных исследований, подтвердившие теоретически выявленные зависимости производительности распыления и размеров формируемых капель от амплитуды и частоты ультразвукового воздействия, с учетом физических свойств распыляемой жидкости;
- конструкции ультразвуковых распылителей, основанные на выявленных зависимостях, способные обеспечить ультразвуковое воздействие в необходимом диапазоне рабочих частот, амплитуд и форм распылительной поверхности.

Публикации. Основные материалы диссертации изложены в 21 печатной работе, в том числе в 2 монографиях, 5 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, подано 2 заявки на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 104 наименований и содержит 164 страницы машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, состояние проблемы, сформулированы цель работы и задачи исследований.

В первом разделе рассматриваются основные характеристики сформированного факела аэрозоля, проводится анализ их влияния на эффективность различных технологических процессов, исследуются существующие способы распыления жидкостей. Выявлено, что для эффективной реализации многих технологических процессов химической промышленности (мокрой очистки газов от дисперсных примесей, абсорбции газовых примесей, распылительной сушки) необходимо обеспечение оптимальных параметров факела распыления, уникальных для каждого процесса в конкретном технологическом оформлении. Ими являются: размер и дисперсность получаемых капель жидкости, производительность распыления, диаметр и угол раскрытия факела (т.е. форма факела). Установлено, что среди существующих способов распыления именно ультразвуковой способ позволяет формировать факел распыления с характеристиками по дисперсности, производительности и форме, наиболее соответствующими потребностям современных производств химической технологии.

Однако анализ работ (Розенберг Л. Д., Экнадиосянц О. К., Богуславский Ю. Я., Новицкий Б. Г.) и обзор существующего УЗ оборудования для распыления жидкостей показали, что на сегодняшний день не существует научных данных или методик, позволяющих определять условия (площадь и форма распылительной поверхности) и режимы (частота и амплитуда) ультразвукового воздействия для обеспечения факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме. Существующие аналитические выражения, приведенные в работах (Розенберг Л. Д., Новицкий Б. Г.), как правило, не учитывают физические свойства и явления, происходящие в распыляемой жидкости, и поэтому обеспечивают результаты, весьма далекие от получаемых на практике.

В заключительной части первого раздела, на основании проведенного анализа, показывается необходимость проведения исследований, направленных на выявление режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование факела распыла с необходимыми производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками.

Второй раздел посвящен теоретическому определению режимов ультразвукового воздействия, способных обеспечить формирование факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме.

Для этого была разработана математическая модель кавитационного распыления жидкостей, включающая в себя рассмотрение процесса: создания переменного звукового давления в распыляемом слое жидкости, приводящего к образованию кавитационных полостей в жидкости, осуществляющих запас энергии, сопровождающийся мгновенным её

высвобождением при схлопывании кавитационного пузырька, в виде ударных волн, которые при выполнении некоторых условий (толщина слоя, вязкость и поверхностное натяжение жидкости, амплитуда УЗ воздействия) приводят к образованию капиллярных волн. При достижении капиллярными волнами пороговой амплитуды происходит их распад на отдельные капли, что обеспечивает протекание процесса УЗ распыления жидкостей. Поэтапный анализ модели позволяет определить все необходимые зависимости.

Первый этап. Практический интерес представляет развитие кавитации в слое, непосредственно граничащем с поверхностью ультразвукового распылителя. Амплитуда звукового давления непосредственно на распылительной поверхности:

$$|P(0)| = \rho_0 \omega^2 A_n h, \quad (1)$$

где $|P(0)|$ – амплитуда звукового давления вблизи поверхности рабочего инструмента; ρ_0 – равновесная плотность жидкости; ω – круговая частота акустических колебаний; c^{-1} ; A_n – амплитуда колебаний поверхности рабочего инструмента, мкм; h – толщина слоя жидкости, мм.

Второй этап. В связи со сложностью моделирования динамики совокупности кавитационных пузырьков для определения радиуса кавитационного пузырька была использована модель процесса расширения и схлопывания одиночного пузырька, описываемая уравнением Кирквуда–Бете:

$$R \left(1 - \frac{R}{C} \right) \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{R}{3C} \right) \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \left(1 + \frac{R}{C} \right) H + \frac{R}{C} \left(1 - \frac{R}{C} \right) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (2)$$

где C – локальная скорость звука в жидкости, м/с; H – энтальпия жидкости, кДж/моль; R – радиус пузырька, мкм.

Третий этап. Для определения амплитуды давления во фронте ударной волны, образующейся при схлопывании кавитационного пузырька, были использованы результаты исследования явления подводного взрыва, выполненного Р. Коулом. Амплитуда во фронте ударной волны на расстоянии h от центра кавитационного пузырька определялась:

$$P_m = \frac{\rho_0 c^2}{\sqrt{2}} \sqrt{\theta \frac{c P_1 R_{min}}{B'(\gamma'-1)}} \cdot \frac{1}{h \ln(h/R_{min})}, \quad (3)$$

где B' – постоянная равная $3 \cdot 10^8$ Па; c – скорость звука в жидкости, м/с; θ – время расширения кавитационного пузырька, с; P_1 – максимальное давление, при захлопывании кавитационного пузырька, Па; γ' – показатель адиабаты; R_{min} – минимальный радиус кавитационного пузырька при захлопывании, м.

Четвертый этап. Поскольку распад капиллярных волн на капли происходит при амплитудах, превышающих длину волны, то для определения реального профиля капиллярной волны, необходимо учитывать не линейные эффекты, т.е. определять первую и вторую гармоники.

Динамика жидкости при образовании капиллярных волн описывается известными уравнениями Навье–Стокса, связывающими поля скоростей и давлений жидкой среды:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{u}^{(n)} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}^{(n)}}{\partial t} + (\mathbf{u}^{(n-1)}, \nabla) \mathbf{u}^{(n-1)} \right) = -\nabla p^{(n)} + \mu \Delta \mathbf{u}^{(n)}, \end{cases} \quad (4)$$

где n – номер гармоники; $p^{(n)}$ – n -я гармоника давления жидкости, Па; $\mathbf{u}^{(n)}$ – n -я гармоника скорости жидкости, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Граничные условия выглядят следующим образом:

$$\text{– кинематическое условие: } \frac{\partial \xi^{(n)}}{\partial t} + \frac{\partial \xi^{(n-1)}}{\partial x} v^{(n-1)} = u^{(n)}; \quad (5)$$

– динамические условия:

$$\begin{cases} p^{(n-1)} \frac{\partial \xi^{(n-1)}}{\partial x} + 2\mu \left(\frac{\partial v^{(n)}}{\partial y} + \frac{\partial u^{(n)}}{\partial x} - 2 \frac{\partial v^{(n-1)}}{\partial x} \frac{\partial \xi^{(n-1)}}{\partial x} \right) = -\sigma \frac{\partial^2 \xi^{(n-1)}}{\partial x^2} \frac{\partial \xi^{(n-1)}}{\partial x} \\ -p^{(n)} + 2\mu \left(2 \frac{\partial u^{(n)}}{\partial y} - \left(\frac{\partial v^{(n-1)}}{\partial y} + \frac{\partial u^{(n-1)}}{\partial x} \right) \frac{\partial \xi^{(n-1)}}{\partial x} \right) = \sigma \frac{\partial^2 \xi^{(n)}}{\partial x^2} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{– условия на бесконечности: } \begin{cases} p^{(n)}|_{y=-\infty} = 0 \\ \mathbf{u}^{(n)}|_{y=-\infty} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $\xi^{(n)}$ – n -я гармоника смещения свободной поверхности; μ – вязкость жидкости, мПа·с; σ – поверхностное натяжение мН/с.

На основе системы уравнений Навье–Стокса с учетом граничных условий и промежуточных преобразований было получено следующее выражения для профиля капиллярной волны:

$$\xi(x, t) \approx A \sin(\omega t) (\cos(kx) - ((Ak/3)\cos(2kx) + 2Ak)\cos(\omega t)), \quad (8)$$

где A – амплитуда колебаний капиллярной волны, мкм; k – волновое число капиллярной волны.

Волновое число капиллярной волны k определяется с помощью следующего выражения:

$$(\omega - i\beta)^2 \rho \left(1 - \frac{\rho(i\omega + \beta)}{2\mu k^2} \right) \frac{1}{k} - 4(i\omega + \beta)k\mu \left(-1 + \frac{\rho(i\omega + \beta)}{2\mu k^2} + \sqrt{1 - \frac{\rho(i\omega + \beta)}{\mu k^2}} \right) = -i\sigma \frac{\rho(\omega - i\beta)}{2\mu}, \quad (9)$$

где β – декремент затухания.

Таким образом, полученное выражение для профиля капиллярной волны учитывает все основные свойства распыляемой жидкости.

Пятый этап. Определение диаметра капель, на которые распадается капиллярная волна, основывалось на теории распада струй Релея. Установлено, что при вязкостях распыляемых жидкостей до 30 мПа·с диаметр капель можно считать зависящим только от средней толщины капиллярной волны и определять согласно следующему выражению:

$$D = 1,89 D_{\text{кап.ср}}, \quad (10)$$

где $D_{\text{кап.ср}}$ – диаметр по высоте локального подъема жидкости.

На основании полученных данных были построены зависимости представленные на рисунке 1.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что амплитуда колебаний распылительной поверхности существенным образом влияет на диаметр формируемых капель жидкости (увеличивая его), а повышение

вязкости или снижение поверхностного натяжения жидкости приводит к уменьшению диаметра формируемых капель.

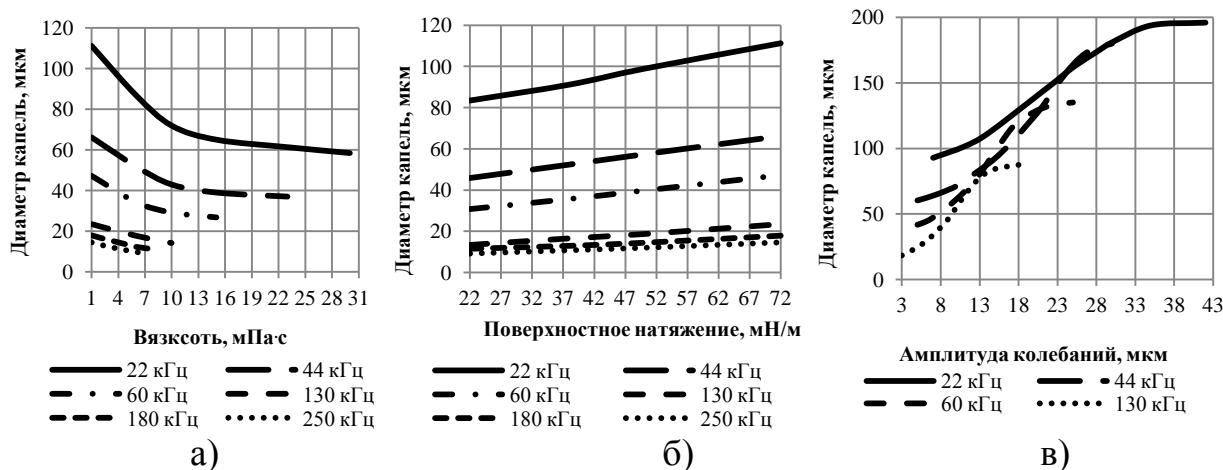


Рисунок 1 – Зависимости диаметра формируемых капель жидкости от вязкости (а), поверхностного натяжения (б) и амплитуды колебаний (в)

Заключительным результатом рассматриваемого этапа явилось определение зависимости диаметра капель жидкости от частоты УЗ колебаний (рисунок 2).

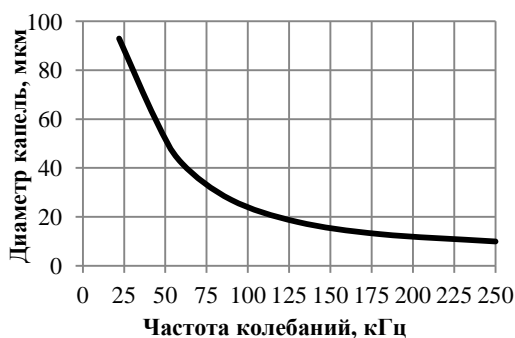


Рисунок 2 – Зависимость диаметра формируемых капель жидкости от частоты УЗ воздействия

Полученная зависимость свидетельствует о перспективности применения исследуемого метода УЗ распыления жидкостей в области высоких частот и необходимости разработки новых конструкций высокочастотных УЗ колебательных систем для распыления жидкостей. Это позволит формировать аэрозоли со средним диаметром 10 мкм и менее.

Шестой этап. Определение скорости отрыва капли жидкости (необходимое для расчета характеристик формы факела) выполнялось со следующими промежуточными вычислениями: определение времени роста возмущения, кинетической энергии и скорости движения жидкости. В результате описанных действий получено следующее выражение для скорости отрыва капли:

$$v = \sqrt{3\sigma\lambda/8D^3\rho} \cos(\omega\sqrt{\rho\lambda^3/64\sigma}) \quad (11)$$

где λ – длина капиллярной волны.

Седьмой этап. При определении производительности учитывалось, что с одной капиллярной волны может образовываться несколько капель. Точное количество жидкости, перешедшие в капли с одной капиллярной волны,

учитывается путем введения поправочного коэффициента a . Удельная производительность описывалась по формуле

$$P = V f N_s = a (\lambda^2 A / 2\pi) \cdot (\pi^2 / 2 - 2) f N_s, \quad (12)$$

где N_s – количество капиллярных волн на единицы площади поверхности; f – частота колебаний рабочего инструмента, кГц;

Полученные зависимости производительности распыления от амплитуды колебаний и от частоты УЗ воздействия показаны на рисунке 3.

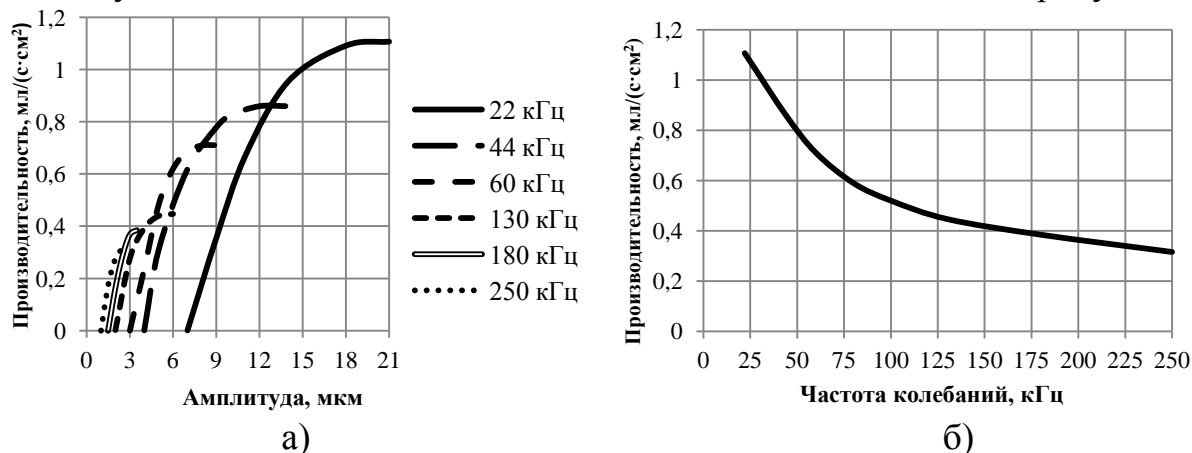


Рисунок 3 – Зависимость производительности распыления от амплитуды (а) и частоты (б) УЗ колебаний, коэффициента $a=1$

Установлено, что даже на частотах порядка 250 кГц значение удельной производительности распыления достигает достаточных для практического использования значений ($\sim 0,3$ мл/(с·см²), т.е. увеличение частоты в 10 раз с 22 кГц до 250 кГц приводит к уменьшению удельной производительности распыления менее чем в 5 раз с 1,1 до 0,3 мл/(с·см²). Это еще раз подтверждает необходимость разработки высокочастотных УЗ колебательных систем для распыления жидкостей.

Для нахождения угла распылителя γ было предложено решать обратную задачу: определять геометрические параметры факела в зависимости от угла распылителя. Предполагалось, что в начальный момент времени капля движется под углом к горизонту, равным $\alpha' = (90 - \gamma/2)$. Учитывая проекции системы уравнений равновесия сил на оси координат в произвольный момент времени, было получено следующее уравнение $\alpha' = \arctg(v_x/v_y)$, где v_x v_y – проекция скоростей на оси. Зная эти параметры, не трудно определить диаметр факела. Если формируемый диаметр факела не соответствует заданному диаметру, то значения угла распылителя необходимо уточнить.

На рисунке 4 показана полученная зависимость приращения радиуса факела распыления от угла распылителя на расстоянии одного метра при различных значениях частоты колебаний.

На основании полученных зависимостей было установлено, что при проектировании ультразвуковых распылителей угол следует выбирать из диапазона 60° – 180° .



Рисунок 4 – Зависимость приращения радиуса факела распыления от угла распылителя

Восьмой этап. Место расположения и количество отверстий на распылительной поверхности было определено из условия необходимости обеспечения ее равномерного покрытия слоем распыляемой жидкости. Количество окружностей, которые можно разместить вдоль образующей конуса, будет равно

$$N = \left(R - R_0 \sin \frac{\gamma}{2} \right) / \left(2R_0 \sin \frac{\gamma}{2} \right), \quad (13)$$

где R_0 – радиус круга, по которому растекается распыляемая жидкость под действием УЗ колебаний, определен экспериментальным путем.

Если полученное значение не является целочисленным, то его необходимо уточнить. Количество каналов на каждой окружности выбирается равным $K = 2\pi i \sin(\gamma/2)$.

Третий раздел содержит результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение теоретически найденных условий и режимов ультразвукового воздействия, необходимых для обеспечения факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме. В работе использовано два типа средних диаметров: для сравнения характеристик дисперсных систем используют средний арифметический диаметр d_{10} ; а при проектировании оборудования для реализации тепло- и массообменных процессов необходимо знание среднего объемно-поверхностного диаметра. Для проведения экспериментов были использованы 4 ультразвуковых распылителя с рабочими частотами 22 кГц, 44 кГц, 60 кГц и 130 кГц.

В первой части раздела описаны результаты исследований влияния амплитуды и частоты УЗ воздействия на дисперсные характеристики формируемых капель жидкости. В качестве распыляемой жидкости использовалась вода. На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости среднего диаметра, среднего объемно-поверхностного диаметра d_{32} и среднеквадратичного отклонения (СКО) формируемых капель от амплитуды колебаний распылительной поверхности, показанные на рисунке 5.

Представленные графики позволили подтвердить, что зависимость между средним диаметром формируемых капель и амплитудой колебаний

распылительной поверхности имеет нелинейный 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 воздействия.

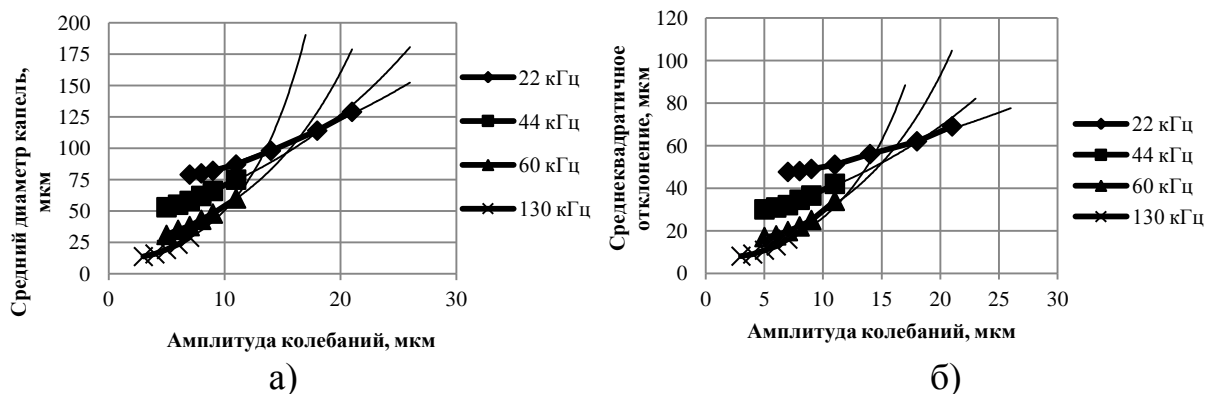


Рисунок 5 – Зависимость среднего диаметра формируемых капель(а) и СКО(б) от амплитуды колебаний распылительной поверхности

Для практического использования полученных результатов была получена зависимость среднего диаметра и диаметра d_{32} формируемых капель жидкости от частоты УЗ воздействия при минимальной амплитуде УЗ колебаний (при которой процесс распыления только начинался).

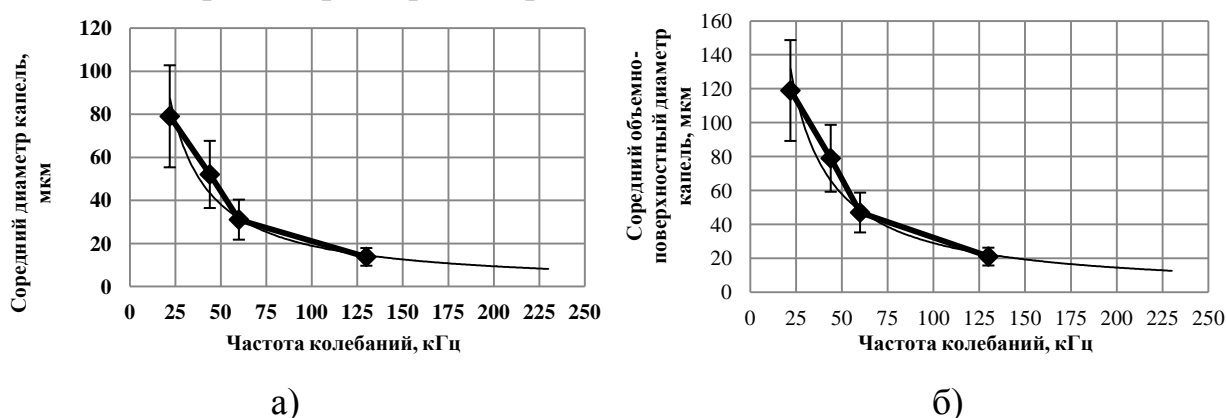


Рисунок 6 – Зависимость среднего диаметра(а) и среднего объемно-поверхностного диаметра(б) формируемых капель от частоты УЗ воздействия

Полученная зависимость является базовой, необходимой для начального определения рабочей частоты распылителя, обеспечивающей формирование капель с необходимым средним диаметром. Представленная зависимость хорошо согласуется с теоретически полученными результатами (см. рисунок 2), различие не превышает 30 % и подтверждает теоретически выдвинутое предположение о необходимости повышения частоты УЗ распыления свыше 100 кГц и создания УЗ колебательных систем, которые способны обеспечивать на указанных частотах воздействие с амплитудами, достаточными для распыления жидкостей.

Для обеспечения производительности, достаточной для практического использования ультразвукового распыления жидкостей, необходимо увеличивать амплитуду УЗ колебаний. Однако, как было установлено теоретически и экспериментально, увеличение амплитуды колебаний приводит не только к возрастанию производительности распыления, но и к увеличению среднего диаметра и СКО формируемых капель. Это обуславливает необходимость определения амплитуды УЗ колебаний распылительной поверхности, при которой обеспечивается достаточная производительность распыления, но СКО и средний диаметр 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 рисунке 7.

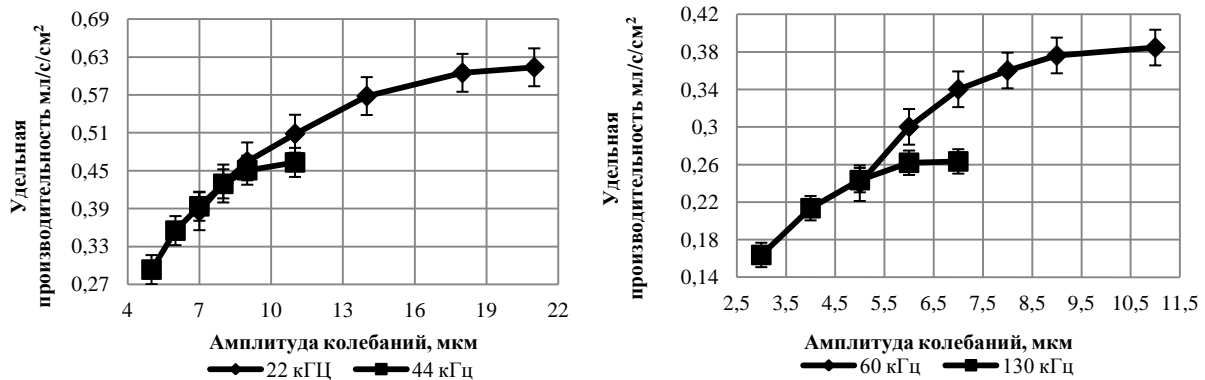


Рисунок 7 – Зависимость производительности распыления от амплитуды колебаний распылительной поверхности для различных частот

Как видно из графиков, после некоторого значения амплитуды (зависящего от частоты УЗ воздействия) рост производительности практически прекращается, что соответствует теоретически полученным результатам. 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, 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. Так, 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.

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

Таким образом, были определены зависимости, с помощью которых можно установить необходимые режимы УЗ воздействия, 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. Как показали проведенные теоретические исследования, из свойств жидкости основное влияние на диаметры формируемых капель оказывают вязкость и поверхностное натяжение жидкости.

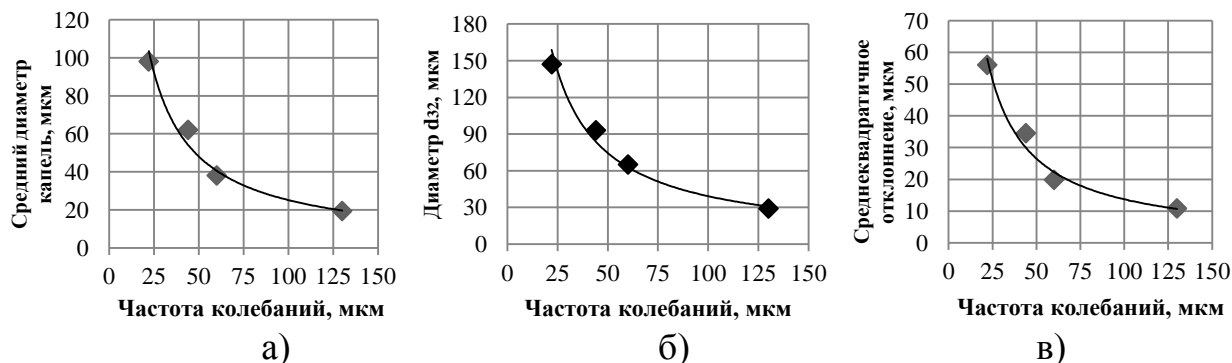


Рисунок 8 – Зависимости среднего диаметра (а), диаметра d_{32} (б), СКО диаметра (в) формируемых капель от частоты УЗ воздействия

Первоначально было исследовано влияние вязкости жидкости на дисперсные характеристики формируемых капель. В качестве распыляемой жидкости использовались растворы с различной концентрацией глицерина.

На основании полученных экспериментальных данных были построены зависимости среднего диаметра (рисунок 9,а) и СКО формируемых капель от вязкости жидкости, при 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 колебаний распылительной поверхности обеспечивали распыление максимального числа исследуемых жидкостей (рисунок 9).

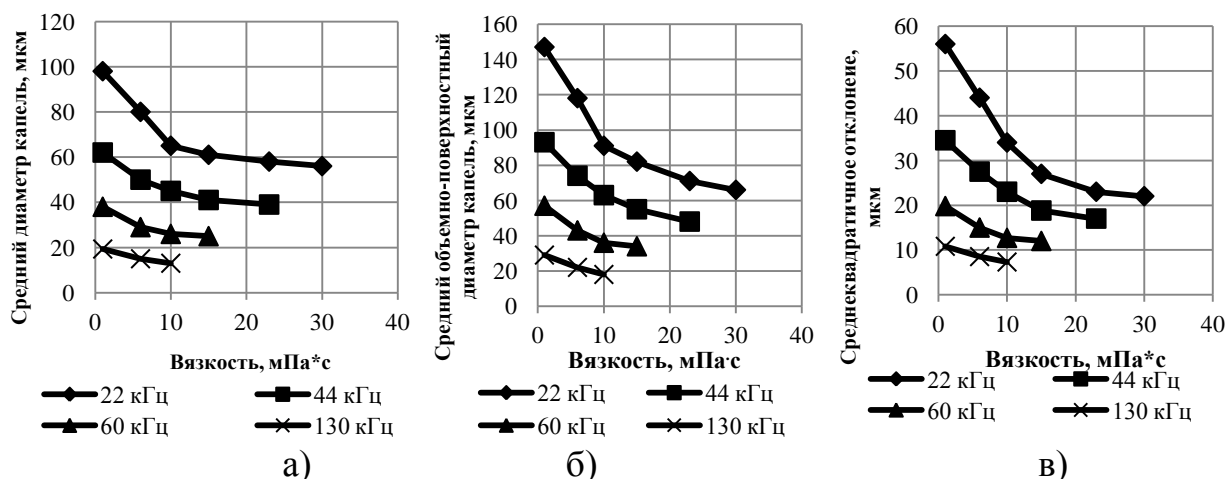


Рисунок 9 – Зависимость среднего диаметра (а), диаметра d_{32} (б) и СКО диаметра (в) формируемых капель от вязкости распыляемой жидкости

Видно, что с ростом частоты уменьшается максимально допустимое значение вязкости распыляемой жидкости. Полученные значения

соответствуют теоретически установленными значениями максимальной вязкости жидкости, при которой распыление не происходит.

Таким образом, 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 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 %.

Поскольку начальные (для вязкости 1 мПа·с) значения средних диаметров капель представленных зависимостей совпадают со значениями средних диаметров капель для невязких жидкостей (см. рисунок 9), полученных для оптимальных значений амплитуды колебаний распылительной поверхности, то 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. В качестве распыляемой жидкости были использованы растворы с различной концентрацией этилового спирта в воде. На рисунке 10 представлены полученные зависимости среднего диаметра и СКО формируемых капель от поверхностного натяжения жидкости при оптимальной амплитуде колебаний распылительной поверхности.

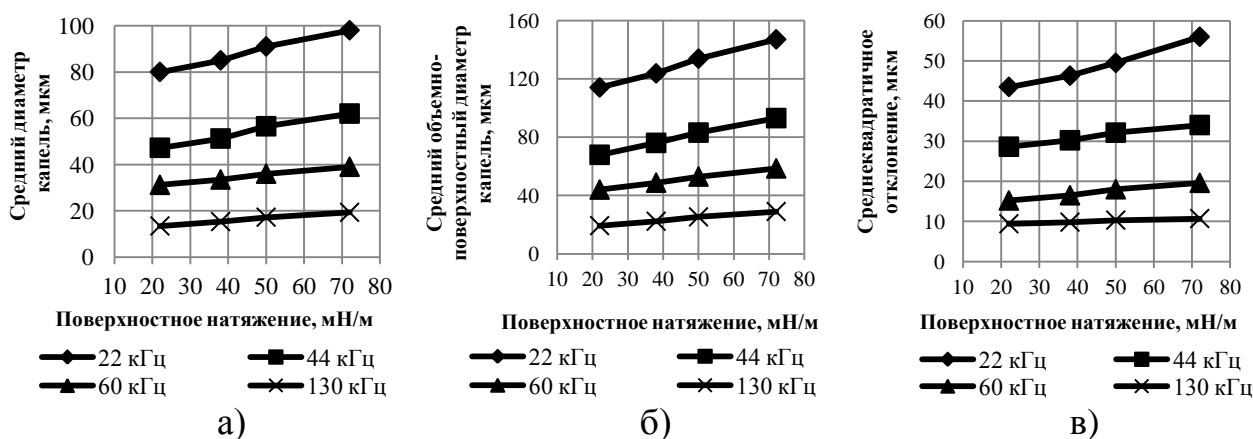


Рисунок 10 – Зависимость среднего диаметра (а), диаметра d_{32} (б) и СКО (в) формируемых капель от поверхностного натяжения распыляемой жидкости

Из графиков видно, что при малых поверхностных натяжениях средний диаметр формируемых капель уменьшается. Однако это уменьшение значительно 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 мкм до 38 мкм; на частоте 130 кГц – от 13 мкм до 19 мкм. СКО формируемых капель жидкости также не в значительной степени 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 как при проектировании УЗ распылителей для определения рабочей частоты распылителя, обеспечивающей формирование капель с заданными дисперсными характеристиками, так и при эксплуатации УЗ распылителей в реальных технологических процессах для определения амплитуды колебаний распылительной поверхности в зависимости от вязкости и поверхностного натяжения распыляемых жидкостей.

Заключительная часть экспериментальных исследований была направлена на исследование зависимости производительности распыления и формы формируемого факела распыла от геометрических размеров распылительной поверхности при различных частотах УЗ воздействия.

При помощи методики, разработанной во второй главе, был рассчитан и изготовлен набор (9 штук) сменных рабочих инструментов с различными площадью, углом при вершине конуса распылительной поверхности и количеством отверстий для подачи распыляемой жидкости. Эскизы некоторых из них представлены на рисунке 11.

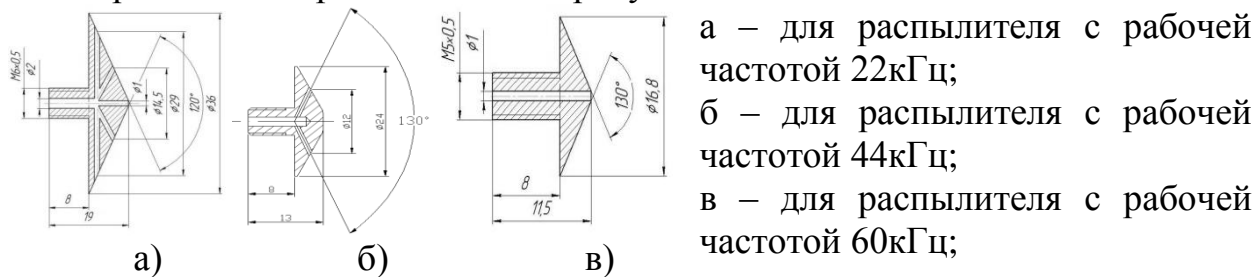


Рисунок 11 – Разработанные рабочие инструменты

Проведенные эксперименты позволили установить, что размеры факела распыления, формируемого изготовленными рабочими инструментами отличаются от расчетных не более чем на 10 %, что является достаточно точным приближением.

На рисунке 12 представлены зависимости приращения радиуса факела в зависимости от угла распылителя для различных частот колебаний распылительной поверхности, построенные на основе корректировки теоретических зависимостей с учетом определенных погрешностей расчета.

Полученная зависимость позволяет определить угол при вершине распылительной поверхности, обеспечивающий необходимый диаметр факела распыла.

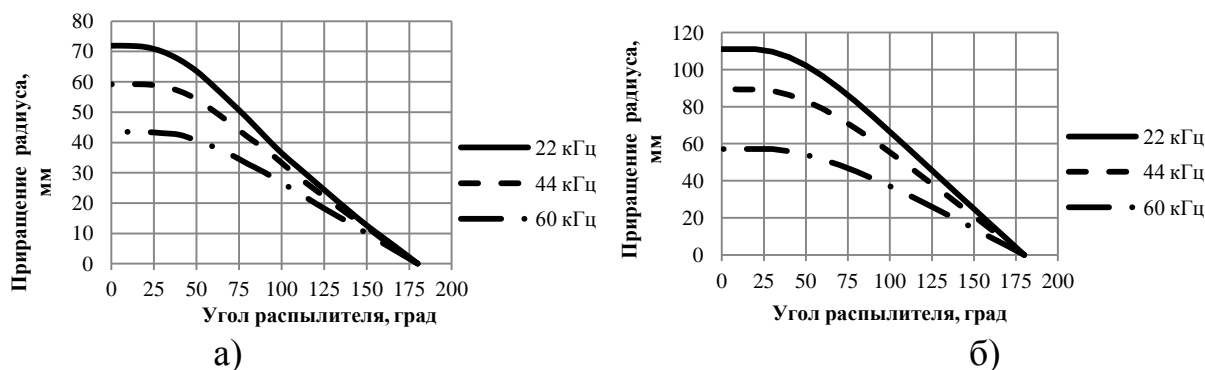


Рисунок 12 – Зависимость приращения факела распыления от угла распылителя на расстоянии 0,06 мм (а) и 1 м (б) от распылительной поверхности

Последним параметром, который влияет на эффективность процессов химических технологий, основанных на распылении жидкости, является производительность распыления.

Из полученных экспериментальных данных был сделан вывод о том, что различие между теоретически рассчитанными с использованием выражения (13) и измеренными значениями производительности не зависит от площади распылительной поверхности. С учетом этого был определен поправочный коэффициент a , равный 0,53. На рисунке 13 приведена зависимость максимальной удельной производительности распыления от частоты УЗ воздействия, полученной для уточненного поправочного коэффициента a .

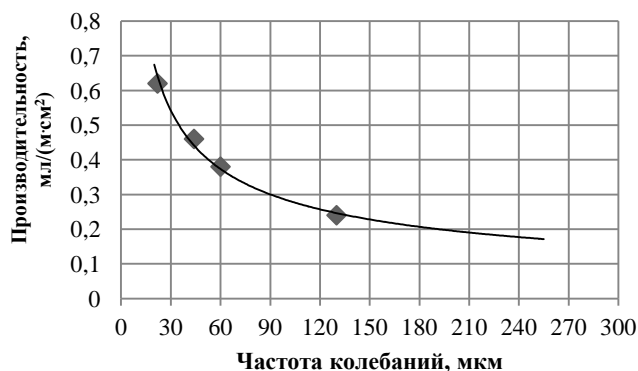


Рисунок 13 – Зависимость производительности распыления от частоты УЗ воздействия

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

Таким образом, в результате проведенных исследований были полностью определены все условия и режимы ультразвукового воздействия, необходимые для обеспечения факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме.

В четвертом разделе приводятся результаты практического применения выявленных условий и режимов ультразвукового воздействия, необходимых для обеспечения факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме, которые позволили создать УЗ распылители различного технологического назначения.

Первым примером практического применения УЗ распылителей, обеспечивающих формирование факела распыляемых жидкостей с задаваемыми производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками за счет установления и поддержания необходимых режимов ультразвукового воздействия, выявленных на основании полученных зависимостей, являются УЗ распылители для нанесения на поверхность пластины слоя фоторезиста.

В настоящее время этот процесс осуществляется при помощи ротационного способа. К недостаткам этого способа относятся: трудность получения относительно тонких и равномерных плёнок; наличие краевого утолщения; трудность организации одновременной обработки нескольких пластин; большие потери фоторезиста.

Применение разработанного распылителя позволило: исключить образование краевого утолщения слоя фоторезиста; наносить фоторезист на подложку с развитой текстурой; повысить равномерность слоя на 8–10 %.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что разработанный УЗ распылитель обеспечивает: средний арифметический диаметр капель 46 – 50 мкм; средний объемно-поверхностный диаметр 57 – 63 мкм; СКО 16 – 20 мкм.

Другим применением полученных результатов является разработка УЗ распылителя для химико-механического полирования полупроводниковых пластин.

Используемый в настоящее время способ химико-механического полирования имеет следующие недостатки: неравномерное распределение полировальной жидкости; высокие непроизводительные потери; увеличенное потребление расходных материалов.

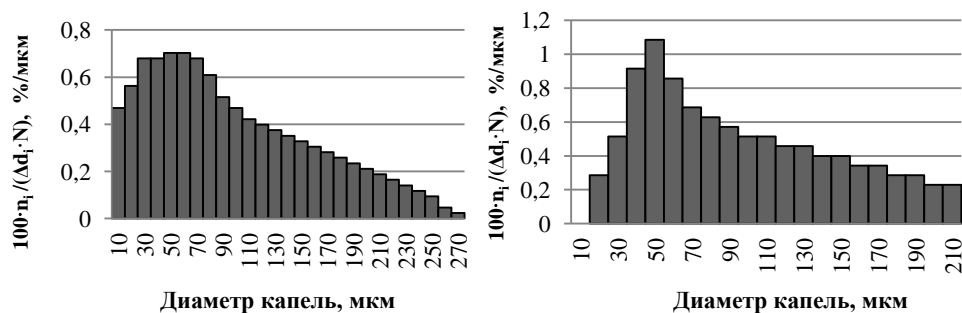
Применение разработанного ультразвукового распылителя, обеспечивающего формирование факела с заданными дисперсными и геометрическими параметрами, позволило снизить расход материалов до 25 % и повысить на 15–20 % качество формируемой поверхности. В целом разработанный УЗ распылитель обеспечивает: средний диаметр 55–75 мкм; средний объемно-поверхностный диаметр 93–109 мкм; СКО 30,9–43 мкм.

Еще одной перспективной областью применения УЗ распыления является распылительная сушка, например, различных экстрактов. Одной из основных проблем распылительной сушки является большой разброс диаметров капель распыляемого продукта. Исходя из этого, был разработан УЗ распылитель с амплитудой колебаний 14 мкм, т.е. при которой, согласно исследованиям, проведенным в третьем разделе, формируются достаточно крупные капли, а дисперсия остается на приемлемом уровне.

На рисунке 14 представлены гистограммы распределения формируемых диаметров капель жидкости, создаваемых пневматическим распылителем и разработанным ультразвуковым распылителем.

Применение разработанного ультразвукового распылителя позволило: выполнить более точные расчеты параметров сушильного аппарата и

обоснованно выбирать тепловой режим сушки; снизить процент потерь дорогостоящего экстракта; повысить равномерность сушки экстракта.



а) пневматическое распыление

б) ультразвуковое распыление

Рисунок 14 – Гистограмма распределения диаметров капель жидкости при пневматическом и ультразвуковом распылении

Возможно применение УЗ распыления и для получения гранулированного алюминия из расплава.

С целью исследования эффективности выбранного ультразвукового воздействия для разработанного ультразвукового оборудования были проведены его испытания. Гранулометрический состав, определенный методом лазерной дифракции, составил: при ультразвуковом воздействии $d_{10}=5,6$ мкм, $d_{50}=16,5$ мкм; без ультразвукового воздействия $d_{10}=6,8$ мкм, $d_{50}=21,3$ мкм. Было установлено, что применение ультразвукового воздействия позволяет увеличить выход фракции с размером частиц до 5 мкм с 8,65 до 12,62 процентов, а фракции с размером до 10 мкм с 24,1 до 33,3 процентов от перерабатываемого металла.

Технологии, основанные на распылении жидкостей, применяются и в медицине. К ним относятся, прежде всего, распыление лекарственных составов для ингаляций, нанесение специальных покрытий на медицинскую технику и инструменты и т.п. Для этих целей необходимы распылители, обеспечивающие получение аэрозолей с размерами капель от 5 до 50 микрон.

Для решения задач нанесения покрытий на изделия медицинского назначения был разработан высокочастотный ультразвуковой распылитель, с рабочей частотой 130 кГц. Разработанный распылитель формирует узконаправленный факел аэрозоля со средним диаметром капель 19,3 мкм, СКО которых не превышает 10,8 мкм для не вязких жидкостей. Как показали эксперименты для вязких жидкостей, эти параметры будут еще меньше (средний диаметр 13 мкм; СКО 7,3 мкм), что позволит наносить пленки очень малой толщины. В настоящее время в Новосибирской медицинской фирме «Ангиолайн» проводятся клинические испытания разработанного распылителя.

Приведенные конструкции оборудования и результаты их практического применения показывают эффективность выявленных условий и режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование факела распыления с заданными характеристиками по дисперсности, производительности и форме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволил установить, что при воздействии УЗ колебаниями определенной амплитуды на тонкий слой жидкости создаваемое в жидкости переменное звуковое давление приводит к возникновению кавитационных полостей, при схлопывании которых образуются ударные волны, приводящие, в зависимости от вязкости и поверхностного натяжения жидкости, к образованию на границе раздела жидкости с газовой средой капиллярных волн различной длины и амплитуды, распадающихся на отдельные капли, что обеспечивает протекание процесса УЗ распыления жидкостей.

2. Предложена и разработана теоретическая модель, которая поэтапно описывает процесс ультразвукового распыления жидкостей и позволяет выявить основные закономерности процессов, происходящих в распыляемой жидкости (производительность распыления и размеры формируемых капель), в зависимости от частоты и амплитуды УЗ воздействия с учетом влияния вязкости и поверхностного натяжения жидкости.

3. На основе анализа разработанной модели выявлены зависимости диаметров формируемых капель от параметров УЗ воздействия и физических свойств жидкостей, установлено наличие ограничений на максимальное значение вязкости распыляемой жидкости (30 мПа·с на частоте 22 кГц, 23 мПа·с на частоте 44 кГц, 15 мПа·с на частоте 60 кГц и 10 мПа·с на частоте 130 кГц) и удельной производительности распыления (0,62 мл/с на частоте 22 кГц, 0,46 мл/с на частоте 44 кГц, 0,38 на частоте 60 кГц и 0,23 мл/с на частоте 130 кГц).

4. Предложена и разработана методика расчета, которая позволяет определять размеры распылительной поверхности, количество и месторасположение отверстий для подачи жидкости, обеспечивающих формирование факела распыла с заданными характеристиками формы и производительности.

5. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие теоретически выявленные зависимости производительности распыления и среднего диаметра формируемых капель от параметров УЗ воздействия и свойств самих жидкостей (расхождение не превышает 31 %, коэффициент пропорциональности между теоретически и экспериментально найденными значениями производительности равен 0,53). Установлены зависимости среднеквадратичного отклонения формируемых капель жидкости в зависимости от параметров УЗ воздействия и свойств жидкостей, необходимые для формирования факела распыления с заданными дисперсными характеристиками.

6. На примерах практического применения УЗ распылителей при осуществлении технологических процессов нанесения фоточувствительного слоя на поверхность кремниевой пластины, химико-механического полирования пластины, сушки жидких растительных экстрактов, получения гранулированного алюминия из расплава, нанесения покрытий на стенты

коронарных сосудов показана эффективность применения выявленных зависимостей для определения рабочих частот, амплитуд и формы распылительной поверхности УЗ распылителей, обеспечивающих формирование факела распыла с необходимыми производительностью, дисперсными и геометрическими характеристиками.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Shalunova, A.V. Ultrasonic Oscillating System for Radiators of Gas Media [Текст] / A.V. Shalunova, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev, S.S. Khmelev, N.V. Kuchin // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P. 267–270

2. Шалунова, А.В. Моделирование процесса формирования факела при ультразвуковом распылении [Текст] / А.В. Шалунов, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2008. – № 2 (12). – С. 45–50.

3. Шалунова, А.В. Методика расчета геометрических параметров ультразвукового распылителя [Текст] / А.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов / под ред. А.И. Громько, А.В. Сарафанова. – Красноярск: ИФК СФУ, 2009. – С. 235–238.

4. Shalunova, A.V. Development of Design Procedure of Liquid Media Dispenser for the Atomizing Drier [Текст] / A.V. Shalunova, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 269–273.

5. Шалунова, А.В. Разработка ультразвуковых диспергаторов жидких сред для распылительной суши [Текст] / А.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов // Современные проблемы технической химии: Материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции. Секции 5–7. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. – С. 13–20.

6. Хмелев, В.Н. Экспериментальное исследование эффективности процесса сушки ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова // Современные проблемы технической химии: материалы докладов Всероссийской научно-технической и методической конференции. Секции 1–4. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. – С. 385–393.

7. Шалунова, А.В. Создание оборудования для мелкодисперсного распыления вязких жидкостей [Текст] / А.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: межвузовский сборник – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С.298–300.

8. Хмелев, В.Н. Моделирование процесса формирования факела при ультразвуковом распылении [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова // Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 31–34.

9. Khmelev, V.N. Compact Ultrasonic Atomizer Having Possibilities to Spray in a Layer and in a Fountain [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova, M. Zisser // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 318–320.

10. Khmelev, V.N. Development of Equipment for Fine-dispersed Atomization of Viscous Liquids [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.V. Shalunova, S.S. Khmelev, V.G. Drovkov, Y.D. Skudaev // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 350–353.

11. Хмелев, В.Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – 271 с.
12. Хмелев, В.Н. Новый способ мелкодисперсного распыления вязких жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, С.С. Хмелёв // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМПИ-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 210–214.
13. Хмелев, В.Н. Разработка высокочастотных ультразвуковых колебательных систем для мелкодисперсного распыления жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова, М.В. Хмелев, С.С. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 315–320.
14. Shalunova, A.V Ultrasonic atomizers of nanomaterials [Текст] / A.V. Shalunova, V.N. Khmelev, A.V Shalunov, M.V. Khmelev // XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011. – Novosibirsk, NSTU, 2011. – P. 305–309.
15. Хмелев, В.Н. Получение аэрозолей ультразвуковыми колебаниями: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 271 с. ISBN: 978-3-8443-5675-5
16. Шалунова, А.В. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия [Текст] / А.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – Вып. 1. – С.105–109.
17. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые распылители наноматериалов [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, М.В. Хмелев, А.В. Шалунова, Д.В. Генне // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – Вып. 1. – С. 193–197.
18. Хмелев, В.Н. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для распыления вязких жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, А.В. Шалунова // Электронный журнал "Техническая акустика", <http://ejta.org>, 2011, 10.
19. Шалунова, А.В. Разработка и исследование высокочастотного ультразвукового распылителя жидкости [Текст] / А.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов // Научно – технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 212–215.
20. Хмелев, В.Н. Технологии ультразвукового мелкодисперсного распыления на службе охраны здоровья [Текст] / А.В. Шалунов, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунова // Нанотехнологии и охрана здоровья. – 2011. – № 1. – С. 30-33.
21. Шалунова, А.В. Разработка и исследование новых принципов построения мелкодисперсных ультразвуковых распылителей вязких жидкостей [Текст] / А.В. Шалунов, В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.Н. Голых, А.В. Шалунова // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 158–163.

Подписано в печать 20.04.2012 г. Печать – ризография. Заказ 2012 – 34

Объем 1,44 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27