

На правах рукописи

*К.Шалунова*

Шалунова Ксения Викторовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ  
ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
ПОЛЕЙ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бийск – 2011

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Хмелев Владимир Николаевич

Официальные доктор технических наук, профессор  
оппоненты: Попок Николай Иванович

кандидат технических наук, доцент  
Блазнов Алексей Николаевич

Ведущая организация ИПХЭТ СО РАН (г. Бийск)

Защита состоится 23 июня 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) государственного 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) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

Автореферат разослан « 23 » мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Светлов С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Значительная часть современных технологических процессов в химической промышленности и смежных отраслях связана с образованием большого количества аэрозолей с различной дисперсной фазой. Несмотря на все усилия, прилагаемые в области охраны природы, в атмосферу земли ежегодно поступает около 150 млн тонн различных аэрозолей искусственного происхождения с частицами микронного размера. Эти аэрозоли имеют огромную суммарную поверхность взаимодействия, вследствие чего их химическая и биологическая активность столь высока, что они представляют чрезвычайную опасность для человека.

Действенных способов и газоочистного оборудования, способных изменить создавшуюся экологическую обстановку, на сегодняшний день не существует. Это обуславливает необходимость решения указанной проблемы путем разработки новых технологий и современных устройств, позволяющих осаждать мелкодисперсные примеси с целью безопасного выброса отходящих газов в атмосферу, а в ряде случаев с целью улавливания и возвращения готового продукта в производственный цикл.

Перспективным направлением решения указанной проблемы является создание систем коагуляции дисперсных частиц ультразвуковыми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности как в виде самостоятельных средств очистки, так и в составе инерционных пылеуловителей различного типа.

Ультразвуковая коагуляция имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными способами очистки: способность коагулировать аэрозоли различного происхождения и дисперсности; применимость к взрывоопасным и агрессивным газам; возможность работы при высоких температурах и давлениях; возможность создания компактного оборудования. Однако несмотря на указанные преимущества, УЗ коагуляция не нашла широкого промышленного распространения.

Причина неиспользования промышленных систем УЗ коагуляции связана с отсутствием системных теоретических и экспериментальных исследований, объясняющих механизм коагуляции аэрозоля в акустическом поле и позволяющих определить параметры воздействия (уровень звукового давления, частота, время воздействия) на газодисперсные среды, обеспечивающие максимальную эффективность процесса коагуляции.

Невозможность создания и применения промышленных систем УЗ коагуляции обусловлена также несовершенством излучателей, не способных формировать акустические колебания высокой интенсивности в газовых средах, отсутствием исследований их технических характеристик и возможностей применительно к реализации процесса коагуляции.

Таким образом, задача теоретического и экспериментального определения оптимальных режимов ультразвукового воздействия и создания технологического оборудования, обеспечивающего повышение эффективности процесса коагуляции, является актуальной.

**Цель работы** – повышение эффективности процесса коагуляции газодисперсных систем с различной дисперсной фазой наложением ультразвуковых полей высокой интенсивности за счет выявления

оптимальных режимов воздействия, их экспериментального подтверждения при помощи специальных излучателей и создания практических конструкций для систем газоочистки.

**Задачи исследований:**

- определить основные факторы, влияющие на эффективность процесса коагуляции дисперсных частиц.
- с учетом степени влияния выявленных факторов разработать модель, описывающую процесс акустической коагуляции под действием упругих колебаний в газовой среде.
- на основе разработанной модели провести теоретическое исследование зависимости эффективности коагуляции газодисперсных систем от параметров акустического воздействия и выявить оптимальные режимы воздействия.
- на основе теоретически выявленных оптимальных режимов ультразвукового воздействия сформулировать основные требования к ультразвуковым аппаратам для коагуляции аэрозолей.
- выбрать конструктивную схему ультразвукового излучателя, технические характеристики которого будут соответствовать основным требованиям к УЗ аппаратам и позволять обеспечивать оптимальное воздействие для реализации процесса коагуляции.
- провести экспериментальные исследования, направленные на подтверждение теоретически выявленных оптимальных параметров акустического воздействия.
- на основе полученных теоретических и экспериментальных результатов разработать варианты практического применения ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газов и способы повышения эффективности работы различного пылеулавливающего оборудования.

**Объект и методы исследования.** Объектом исследования является процесс коагуляции мелкодисперсного аэрозоля за счет наложения ультразвуковых полей высокой интенсивности. При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на решение поставленных задач. Исследования проводились путем построения теоретических моделей, допускающих аналитические и численные решения.

**Научная новизна:**

- впервые проведено комплексное изучение процесса коагуляции аэрозоля за счет воздействия упругими колебаниями высокой интенсивности, позволившее установить необходимость и эффективность повышения частоты воздействия и использования колебаний ультразвукового диапазона частот для коагуляции мелкодисперсных (менее 10 мкм) аэрозолей;
- предложена математическая модель процесса ультразвуковой коагуляции аэрозолей, учитывающая влияние вязкости газовой среды и позволившая впервые определить оптимальные режимы ультразвукового воздействия (частота и уровень звукового давления) в зависимости от характеристик газодисперсной системы (концентрация, дисперсный состав);
- впервые экспериментально подтверждена эффективность процесса коагуляции мелкодисперсного аэрозоля ультразвуковыми колебаниями с

частотами, выше 20 кГц, и даны обоснования возможных вариантов практического применения процессов ультразвуковой коагуляции;

- предложены и реализованы на практике новые способы и конструкции устройств для очистки газовых сред от дисперсных примесей.

**Практическая значимость:**

- разработана математическая модель процесса коагуляции газодисперсных систем под действием акустических колебаний, позволяющая определять частоту и уровень звукового давления в зависимости от характеристик газодисперсной системы и устанавливать технические требования к акустическим излучателям при проектировании систем коагуляции аэрозолей в различных условиях;
- экспериментально подтверждена эффективность применения ультразвукового воздействия для коагуляции аэрозолей и даны рекомендации по установлению оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия на аэрозоли с различной дисперсной фазой;
- установлена эффективность применения для коагуляции аэрозолей нового класса излучателей, выполненных в виде изгибно-колеблющихся дисков различного диаметра, возбуждаемых при помощи пьезоэлектрического преобразователя;
- по результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны конструкции пылеулавливающих устройств и предложены варианты практического применения ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газов.

**Личный вклад автора:** предложена и разработана теоретическая модель ультразвуковой коагуляции аэрозолей позволяющая определять режимы и условия ультразвукового воздействия на газодисперсные системы; установлены технические требования к ультразвуковым аппаратам для коагуляции мелкодисперсных аэрозолей; проведены экспериментальные исследования эффективности УЗ коагуляции для аэрозолей с различной дисперсной фазой и размером частиц; предложены варианты конструкций газоочистного оборудования, основанные на использовании УЗ коагуляции.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на Международных конференциях-семинарах по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM'2008, EDM'2009, EDM'2010 (г. Новосибирск); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности» (г. Бийск); Всероссийской научно-технической конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (г. Бийск); Второй международной конференции «Пылегазоочистка-2009» (г. Москва); Всероссийской научно-технической и методической конференции «Современные проблемы технической химии» (г. Казань); Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП–2010) (г. Бийск).

Исследования проводились в рамках Государственных контрактов № 02.515.11.5100 «Разработка и испытания экспериментального образца установки электрофизического воздействия на природные и техногенные воздушно-капельные дисперсии» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы»; № 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; НИОКР – регистрационный номер № 01.02.0509063.

**На защиту выносятся:**

– результаты теоретических исследований процесса коагуляции аэрозоля упругими колебаниями высокой интенсивности, обеспечившие выбор режимов и условий ультразвукового воздействия и позволившие установить необходимость использования для коагуляции мелкодисперсных (менее 10 мкм) аэрозолей колебаний ультразвуковой частоты (более 20 кГц);

– результаты экспериментальных исследований, подтвердившие оптимальность теоретически выявленных режимов ультразвукового воздействия и показавшие эффективность УЗ коагуляции для очистки газовых потоков;

– предложенные способы и конструкции оборудования (циклоны, сепараторы с установленными ультразвуковыми аппаратами) для очистки газов от дисперсных примесей методом акустической коагуляции.

**Публикации.** Основные материалы диссертации изложены в 29 печатных работах, в том числе в 1 монографии, 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 101 наименования и содержит 155 страницы машинописного текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первом** разделе выполнен анализ количественного и качественного состава дисперсных загрязняющих выбросов в различных отраслях промышленности, проведен анализ используемых на практике способов улавливания дисперсных примесей из газовых сред.

Установлено, что большинство промышленных выбросов представляют собой мелкодисперсные аэрозоли (как с твердой, так и с жидкой дисперсной фазой), чрезвычайно опасные для человека, и обоснована необходимость их улавливания. Показано, что существующее оборудование обладает рядом серьезных недостатков, основным из которых является низкая эффективность улавливания мелкодисперсных (10 мкм и менее) частиц. Низкая эффективность обуславливается сущностью физических эффектов,

положенных в основу существующего газоочистного оборудования (аэродинамический, гидродинамический, фильтрационный, электрический).

Выявлено, что одним из возможных путей решения указанной проблемы является предварительное укрупнение дисперсных частиц при помощи энергии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности – ультразвуковая коагуляция.

В разделе показано, что исследования, проведенные в нашей стране, (Л. Д. Розенберг, Х. Грин, Н.А. Фукс, В.Ф. Юдаев, Е.П. Медников, Р.Ш. Школьникова, В.И. Тимошенко) и за рубежом (С.А. Stokes, О. Brandt, E. Niedeman, J.A. Gallego-Juarez, E. Riera-Franco De Sarabia, G. Rodriguez-Corral), подтверждают интенсифицирующее воздействие ультразвуковых колебаний на процесс улавливания дисперсных примесей и позволяют определить ультразвуковую коагуляцию как эффективное средство для повышения эффективности очистки газодисперсных систем.

Проведенный анализ факторов, влияющих на эффективность процесса коагуляции под действием УЗ колебаний, показал, что наибольшее влияние оказывают частота, уровень звукового давления и размер частиц газодисперсной системы. При этом установлено, что на сегодняшний день отсутствует теоретическое обоснование, позволяющее определять оптимальные режимы УЗ воздействия в зависимости от характеристик дисперсной фазы и условий протекания процесса.

Проведенный далее анализ оборудования (электродинамические, электростатические, электромагнитные, магнотриксционные излучатели), предназначенного для создания ультразвуковых колебаний в воздушной среде, показал, что наибольшее распространение в практике получили аэродинамические излучатели. Однако их применение для ультразвуковой коагуляции газодисперсных систем крайне не эффективно из-за невозможности работы на частотах более 20 кГц; больших габаритных размеров; низкого КПД (достигающего в лучших образцах 39 %, но как правило, не превышающего 20 %); быстрого износа механических узлов; необходимости защиты обслуживающего персонала от акустического излучения широкого спектра.

Показано, что наиболее перспективным вариантом замены аэродинамических излучателей являются пьезоэлектрические преобразователи с излучающими элементами, выполненными в виде дисков, изгибно-колеблющихся на частотах, кратных основной моде колебаний.

В заключительной части первого раздела, на основании проведенного анализа, показывается необходимость повышения эффективности процесса коагуляции газодисперсных систем акустическими колебаниями за счет определения и обеспечения оптимальных условий акустического воздействия и применения эффективных излучателей ультразвуковых колебаний и ставятся частные задачи исследований.

**Второй раздел** посвящен теоретическим исследованиям, конечным результатом которых является определение режимов (частота и уровень звукового давления) ультразвукового воздействия, обеспечивающего максимальную эффективность процесса акустической коагуляции в зависимости от дисперсного состава газодисперсной системы.

Для анализа процесса была построена модель, позволяющая описать процесс ультразвуковой коагуляции под действием упругих колебаний в газовой среде. Построенная модель основывается на системе известных уравнений Смолуховского, описывающей кинетику процесса коагуляции и развиваемой исследователями процесса коагуляции. Основным отличием предложенной модели от ранее известных (предложенных ранее Changdong Sheng, Xianglin Shen) является учет вязкости газовой дисперсионной среды при определении компоненты вероятности парного столкновения дисперсных частиц. Учет вязкости газа обусловлен необходимостью коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 10 мкм), при улавливании которых возникают трудности с применением других способов, поскольку при столь малых размерах частиц в силу малости числа Рейнольдса вязкость газа оказывается очень существенной. Более того, при коагуляции аэрозолей с размерами частиц до 1–2 мкм число Рейнольдса остаётся малым даже при очень высоких уровнях звукового давления (до 165 дБ), что делает невозможным анализ процесса коагуляции без учета вязкости.

Сущность применяемого подхода к построению модели коагуляции заключается в следующем. Предполагается, что масса каждой частицы пропорциональна  $m_0$ , то есть каждая отдельно взятая частица имеет массу  $km_0$ , где  $k$  – целое число, больше либо равное 1. Далее вводятся функции  $n_k(t)$ , каждая из которых – суть концентрация частиц, имеющих массу  $km_0$ , или  $k$ -мер. Кинетика коагуляции в предположении, что коагуляция происходит главным образом за счёт парных столкновений, описывается системой уравнений Смолуховского:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_i(t), \quad (1)$$

где  $k$  – натуральное число, изменяющееся в пределах от 1 до бесконечности (искомая система состоит из уравнений 1 при различных значениях  $k$ );  $\beta_{i,k}$  – ядро коагуляции, не зависящее от времени, характеризующее интенсивность столкновения  $i$ -мер и  $k$ -мер, м<sup>3</sup>/с;  $n_k$  – концентрация  $k$ -мер в момент времени  $t$ , с.

Первое слагаемое правой части характеризует интенсивность увеличения концентрации  $k$ -мер за счёт столкновения  $i$ -мер и  $k$ -мер, а второе слагаемое – убыль концентрации  $k$ -мер за счёт столкновения  $k$ -мер с любыми другими частицами.

Для вычисления вероятности столкновения частиц в ряде известных работ (Changdong Sheng, Xianglin Shen) во внимание принимались два механизма взаимодействия частиц: ортокинетический и механизм гидродинамического взаимодействия. Численные оценки показывают, что при сильном различии частиц по размерам доминирующим является ортокинетический механизм. А для частиц, близких по размеру, наоборот, доминирует механизм гидродинамического взаимодействия. Поэтому результирующее ядро коагуляции можно приближённо представить в виде суммы двух компонент:

$$\beta_{i,k} = \beta_{Oi,k} + \beta_{Hi,k}, \quad (2)$$

где  $\beta_{Oi,k}$  – компонента ядра коагуляции, характеризующая сближение частиц



за счёт механизма ортокинетического взаимодействия,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\beta_{Hi,k}$  – компонента ядра коагуляции, характеризующая сближение частиц за счёт механизма гидродинамического взаимодействия,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Ортокинетическая компонента ядра коагуляции определяется с помощью выражения:

$$\beta_{oi,j} = 2(a_i + a_j)^2 U_0 H_{i,j}, \quad (3)$$

где  $a_i, a_j$  – радиус  $i$ -меры и  $j$ -меры соответственно, мкм;  $U_0$  – амплитуда колебательной скорости газовой среды в отсутствие аэрозольных частиц, м/с;  $H_{i,j} = |H_i - H_j|$  – модуль разности коэффициентов увлечения  $i$ - и  $j$ -меры, характеризующий амплитуду колебательной скорости относительного смещения  $i$ - и  $j$ -меры. Вероятность столкновения пропорциональна этому модулю разности. Т.е., согласно ортокинетическому механизму, с ростом амплитуды скорости колебательного смещения частиц увеличивается их вероятность столкновения.

Для нахождения комплексных коэффициентов увлечения  $H_i$  и  $H_j$  используется уравнение Бассета–Буссинеска–Осеена с подстановкой следующих выражений для скорости частиц  $u_p = U_{p0} e^{-i\omega t}$  и среды  $u = U_0 e^{-i\omega t}$  (справедливо при допущении, что сфера значительно меньше по сравнению с длиной волны). Выражение для комплексного коэффициента увлечения каждой из частиц будет иметь следующий вид:

$$H_i = \frac{U_{p0}}{U_p} = \frac{1 + \frac{3}{2} \sqrt{\delta \omega \tau_i} - i \left( \frac{3}{2} \delta \omega \tau_i + \frac{3}{2} \sqrt{\delta \omega \tau_i} \right)}{1 + \frac{3}{2} \sqrt{\delta \omega \tau_i} - i \left( \left( 1 + \frac{1}{2} \delta \right) \omega \tau_i + \frac{3}{2} \sqrt{\delta \omega \tau_i} \right)}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – отношение плотности газовой среды к плотности частиц;  $\omega$  – круговая частота,  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\tau_i = \frac{2\rho_p a_i^2}{9\mu}$  – время релаксации частицы, с.

Путем нахождения комплексного коэффициента увлечения  $i$ -мер и  $j$ -мер, подстановки полученного коэффициента в уравнение (3) была определена ортокинетическая компонента ядра коагуляции.

Для определения гидродинамической компоненты ядра коагуляции использовалось выражение:

$$\beta_{Hi,j} = \frac{(a_i + a_j)^2}{3\mu} \left( \frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_j} \right) \int_0^\pi h(f_{21}) f_{21} \sin \theta d\theta, \quad (5)$$

$$h(f_{21}) = \begin{cases} h(f_{21}) = 0, & \text{если } f_{21} \geq 0 \\ h(f_{21}) = 1, & \text{если } f_{21} < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – угол между волновым вектором акустической волны и линией центров частиц, ° (в выражении (5) при вычислении вероятности столкновения интеграл берётся по всем углам, т.е. суммируются вероятности столкновения  $j$ -мер, линии центров которых с  $i$ -мерами расположены под различными углами к волновому вектору акустического поля);  $f_{21}$  – сила взаимодействия частиц, (Н). В отличие от известной модели, при вычислении силы взаимодействия учитывается вязкость газовой среды, определяемая

следующим образом:

$$f_{21} = (\overline{F_A - F_B}, \vec{l}), \quad (7)$$

где  $\vec{l}$  – единичный вектор линии центров частиц;  $F_A$ ,  $F_B$  – силы, действующие на частицы А и В в вязкой среде, (Н), определяемые по следующим выражениям:

$$F_{A_i} = \iint_{S_A} \left( -pn_i + \sum_{j=1}^3 \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j \right) dS, \quad (8)$$

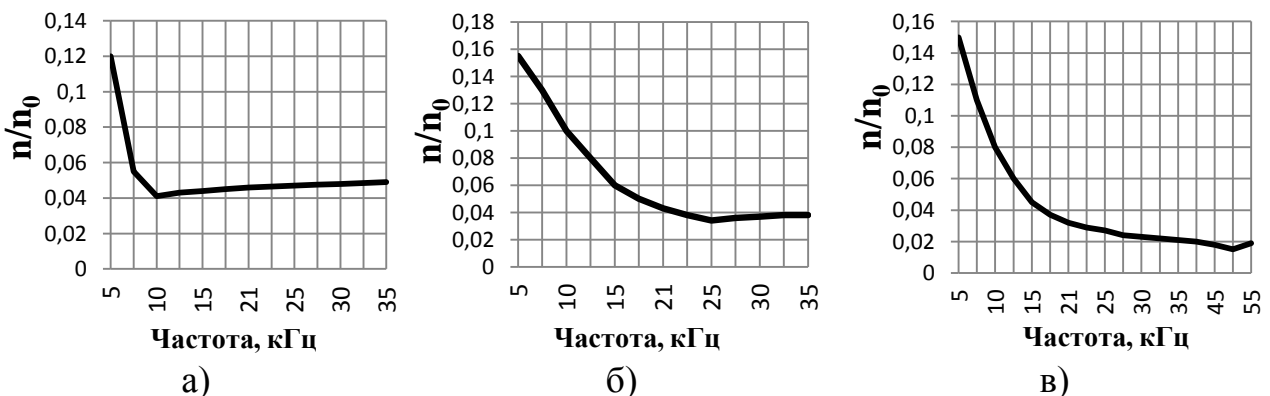
$$F_{B_i} = \iint_{S_B} \left( -pn_i + \sum_{j=1}^3 \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j \right) dS, \quad (9)$$

где  $S_A, S_B$  – поверхности сфер А и В соответственно;  $p$  – давление газа на частицу, Па;  $n_i$  и  $n_j$  –  $i$ -я и  $j$ -я компоненты вектора нормали к поверхностям сфер А и В в формулах (8) и (9) соответственно;  $\eta$  – динамическая вязкость газовой среды, Па·с;  $u_i$  и  $u_j$  –  $i$ -я и  $j$ -я компоненты скорости газовой среды соответственно, м/с;  $x_i$  и  $x_j$  –  $i$ -я и  $j$ -я координаты поверхности сферы, по которой берётся интеграл.

Для определения сил, действующих на частицы, было рассчитано поле обтекания для каждой из них. Путем нахождения силы взаимодействия частиц  $f_{21}$  подстановки ее в выражение (5), определялась гидродинамическая компонента.

После того, как компоненты ядра были найдены, определялось ядро коагуляции  $\beta_{i,k}$  (2), после чего уравнение Смолуховского (1) решалось с помощью численного интегрирования методом Рунге–Кутты.

Численный анализ построенной модели позволяет определить оптимальные параметры УЗ воздействия. На первом этапе был проведен анализ зависимости эффективности процесса коагуляции от частоты акустического воздействия (рисунок 1). Расчёты проводились при постоянном уровне звукового давления 130 дБ, модельное время воздействия ультразвуковыми колебаниями 2 мин. При расчетах принималось допущение, что изначально аэрозоль монодисперсный.



а – размер частиц 9 мкм; б – размер частиц 5 мкм; в – размер частиц 1 мкм  
Рисунок 1 – Зависимость эффективности коагуляции от частоты воздействия для аэрозолей с различными размерами частиц

Обобщение представленных зависимостей на рисунке 1 позволяет сделать вывод о возрастании оптимальной частоты с увеличением

дисперсности аэрозоля. Оптимальная частота для аэрозоля с начальными размерами частиц порядка 10 мкм лежит ниже границы УЗ диапазона (рисунок 1а), в то время как аэрозоли с размерами частиц 5 мкм и менее наиболее эффективно коагулируются в УЗ диапазоне частот (рисунок 1б, в).

Таким образом, оптимальные частоты акустического воздействия для осуществления процесса коагуляции лежат в области ультразвуковых частот, так как в этом случае обеспечивается высокая эффективность коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 5 мкм) при незначительном снижении эффективности грубодисперсных аэрозолей (10 мкм и более).

На втором этапе проводился анализ зависимости времени коагуляции от уровня звукового давления. Характер влияния уровня звукового давления на эффективность процесса ультразвуковой коагуляции показан зависимостями, приведенными на рисунке 2. Условия моделирования: частота колебаний 20 кГц; время воздействия – 300 с с момента начала процесса; радиус частиц – 3 мкм.

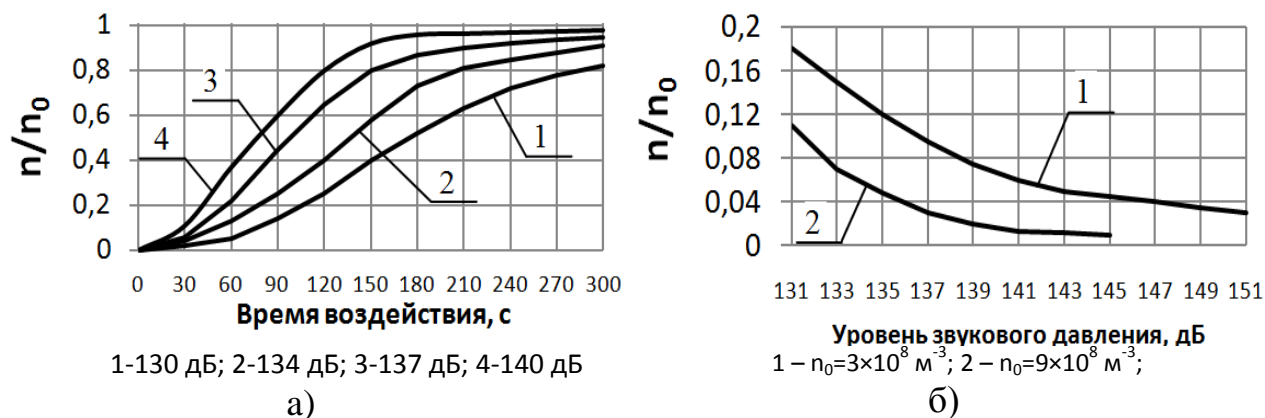


Рисунок 2 – Зависимость эффективности коагуляции от времени (а) и от уровня звукового давления (б)

Анализ приведенных зависимостей (см. рисунок 2) подтверждает рост скорости коагуляции при увеличении уровня звукового давления. Так, повышение уровня звукового давления с 130 до 140 дБ позволяет сократить время коагуляции более чем в 3 раза. Кроме того, зависимости на рисунке 2б подтверждают факт, что коагуляция аэрозолей под действием акустических колебаний происходит более интенсивно при высоких концентрациях аэрозоля.

В результате проведенных теоретических исследований были установлены зависимости эффективности коагуляции газодисперсных систем от параметров ультразвукового воздействия (частота, уровень звукового давления). Установлено, что для мелкодисперсных аэрозолей наиболее эффективно воздействие в ультразвуковом диапазоне частот. Полученные зависимости могут служить основой для определения технических требований к ультразвуковым аппаратам для коагуляции мелкодисперсных аэрозолей.

**Третий раздел** содержит результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение теоретически найденных режимов УЗ воздействия, обеспечивающих максимальную эффективность коагуляции.

Первая часть раздела посвящена выбору конструкции излучателя, способного обеспечивать УЗ воздействие в установленных во втором разделе диапазонах (режимах). Показано, что наиболее перспективным излучателем для создания УЗ колебаний в воздушной среде является пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система (УЗКС) с излучателем, выполненным в виде изгибно-колеблющегося диска ступенчато-переменной толщины.

Конструкция используемой УЗКС, разработанной в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института АлтГТУ, схематично показана на рисунке 3.

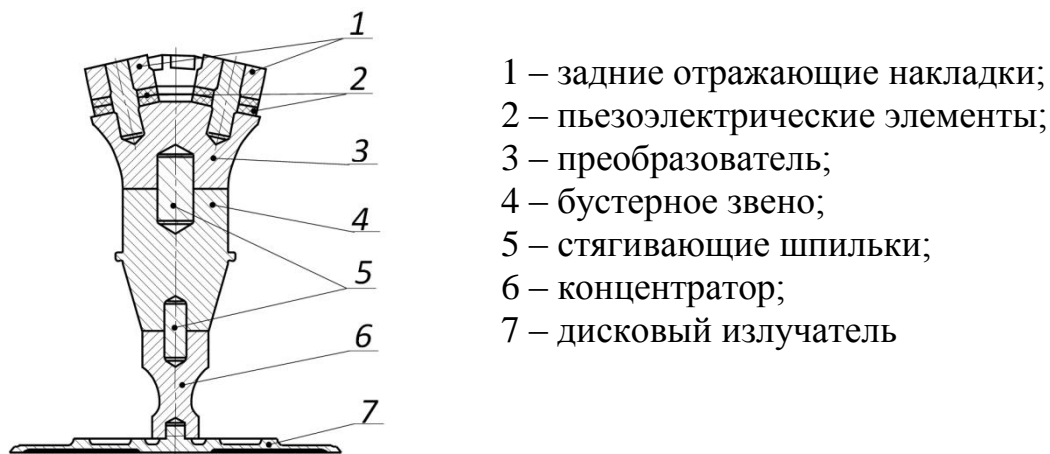


Рисунок 3 – Трехполуволновая УЗКС с дисковым излучателем

Представленная конструкция УЗКС состоит из полуволнового преобразователя 1, 2, 3, полуволнового бустерного звена (бустера) 4, полуволнового концентратора 6, дискового излучателя 7.

Для проведения экспериментальных исследований, направленных на определение эффективности ультразвуковой коагуляции, было использовано 4 УЗКС, технические характеристики используемых систем приведены в таблице.

Таблица – Технические характеристики ультразвуковых аппаратов

Наименование параметра	Значение			
	УЗКС 250	УЗКС 320	УЗКС 360	УЗКС 420
Диаметр излучателя дискового типа, мм	250	320	360	420
Максимальная потребляемая мощность, не более ВА	200	350	450	600
Диапазон регулирования мощности, %	10–100	10–100	10–100	10–100
Уровень звукового давления (1 м), дБ, не менее	140	144	146	150
Частота механических колебаний, кГц	21±0,5	32±0,5	25±0,5	27±0,5

Значительное различие технических характеристик излучателей позволило обеспечить разнообразие условий проведения экспериментов. Для сравнительного воздействия в звуковом диапазоне частот был использован газоструйный излучатель: частота 10 кГц; уровень звукового давления 135 дБ.

Вторая часть третьего раздела посвящена экспериментальному исследованию процесса коагуляции и подтверждению эффективности УЗ воздействия в различных режимах. Для проведения исследований была создана специальная экспериментальная установка, эскиз которой показан на рисунке 4.

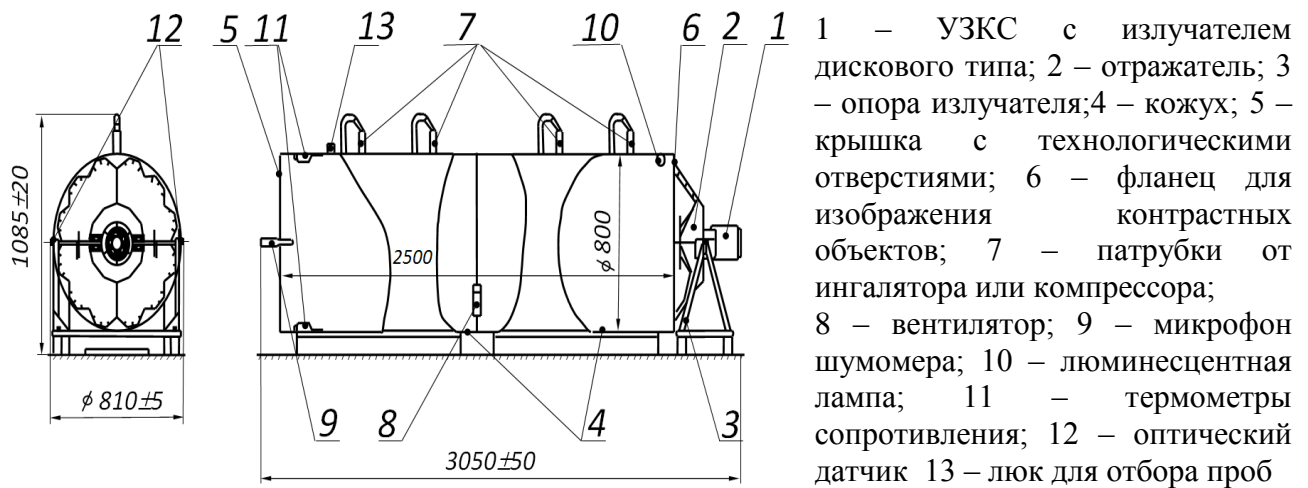
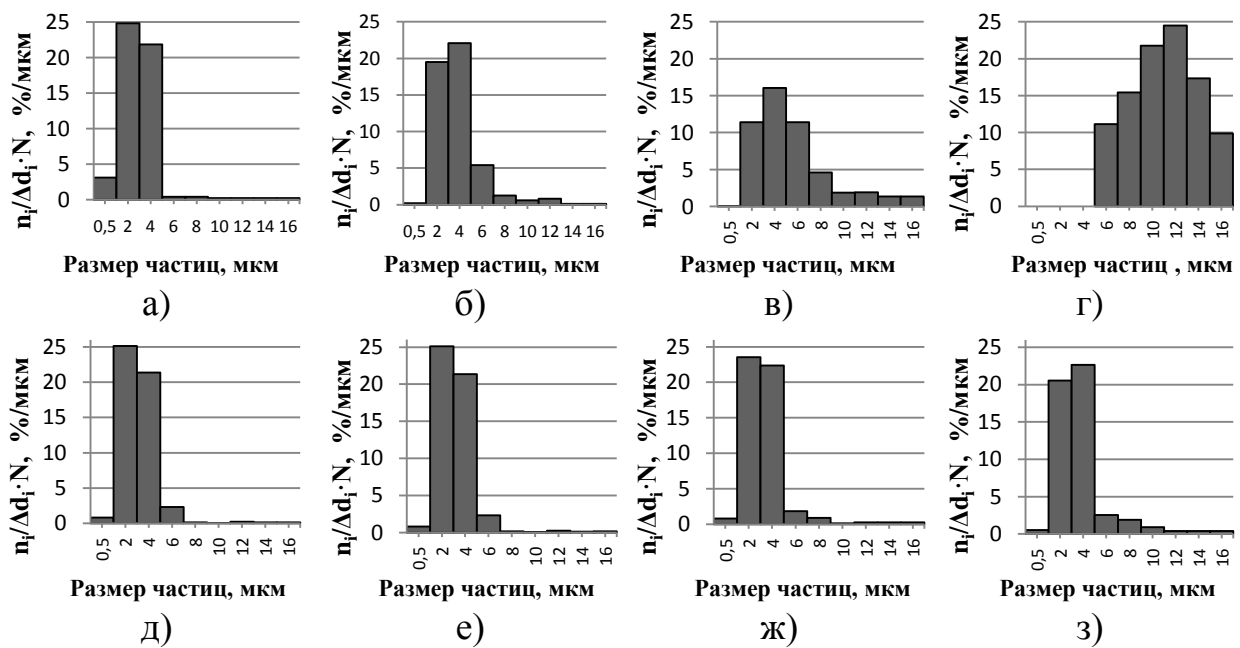


Рисунок 4 – Эскиз экспериментальной установки

Первой частью экспериментальных исследований было исследование эволюции дисперсного состава аэрозоля в ультразвуковом поле высокой интенсивности. Исследование проводилось при следующих параметрах: использовался излучатель с диаметром 250 мм; уровень звукового давления 140 дБ; частота 21 кГц, время ультразвукового воздействия 6 минуты. В качестве исследуемого аэрозоля использовался водный аэрозоль (размер частиц 2–5 мкм) с начальной концентрацией 4 г/м<sup>3</sup>, создаваемый УЗ ингалятором типа «Муссон» на частоте 2,5 МГц.

На рисунках 5а, б, в, г и рисунках 5д, е, ж, з представлены гистограммы распределения частиц аэрозоля по размерам при УЗ воздействии и естественном осаждении аэрозоля соответственно.



а) – начало эксперимента с УЗ; б) – 2-я минута эксперимента с УЗ; в) – 4-я минута эксперимента с УЗ; г) – 6-я минута эксперимента с УЗ; д) – начало эксперимента без УЗ; е) – 4-я минута эксперимента без УЗ; ж) – 8-я минута эксперимента без УЗ; з) – 16-я минута эксперимента без УЗ

Рисунок 5 – Эволюция дисперсного состава аэрозоля

Как и следовало ожидать, при ультразвуковом воздействии происходит

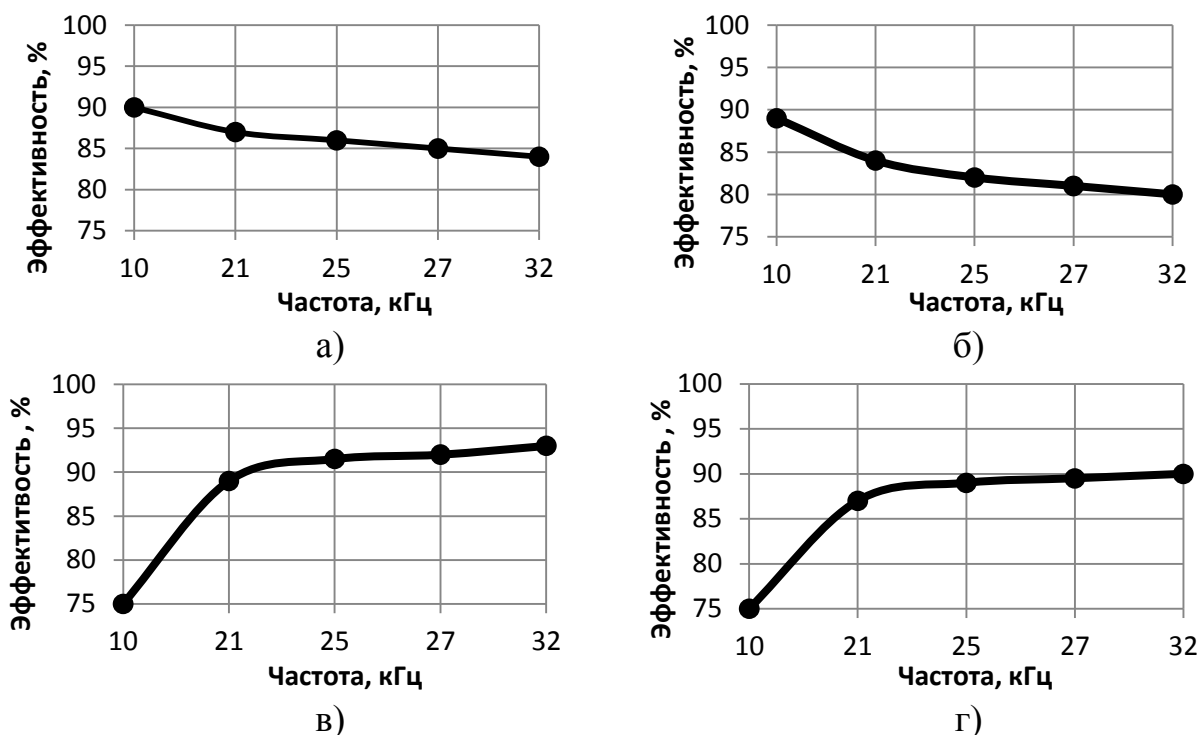
смещение размеров частиц аэрозоля в сторону больших значений, что обусловлено их коагуляцией.

Следующим этапом экспериментов было определение зависимости эффективности коагуляции аэрозолей от частоты воздействия. В качестве аэрозолей были использованы аэрозоль водный № 1, известковая пыль, аэрозоль водный № 2, мучная пыль. Отбор проб осуществлялся через 6 минут. Эффективность ультразвуковой коагуляции рассчитывалась по формуле:

$$\eta = \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\eta$  – эффективность ультразвуковой коагуляции;  $n_1$  – концентрация аэрозоля в начале эксперимента;  $n_2$  – концентрация аэрозоля в конце эксперимента.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, приведены на рисунке 6.



а) – аэрозоль водный № 1 (5–10 мкм) ; б) – известковая пыль (5–10 мкм);  
в) – аэрозоль водный № 2 (2–5 мкм); г) – мучная пыль (1–5 мкм)

Рисунок 6 – Зависимость эффективности коагуляции аэрозоля от частоты звуковых колебаний

Установлено, что акустическое воздействие для коагуляции аэрозолей является наиболее эффективным в ультразвуковом диапазоне частот. Для мелкодисперсных аэрозолей прирост эффективности может достигать 18 % по сравнению со звуковым диапазоном. Небольшое снижение эффективности коагуляция грубодисперсных аэрозолей легко компенсируется безопасностью воздействия в ультразвуковом диапазоне частот.

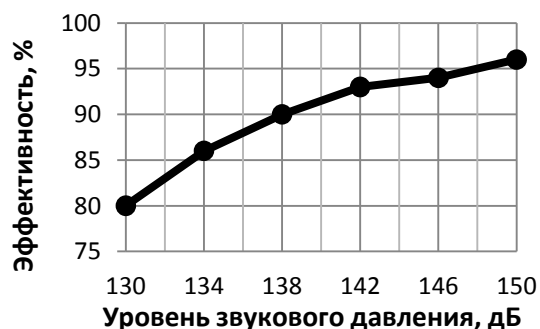
Завершающим этапом первой части экспериментов было определение зависимости эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей от уровня звукового давления. При проведении эксперимента использовался

излучатель с диаметром диска 420 мм, обеспечивающий максимальный уровень звукового давления. Отбор проб проводился через 4 мин после начала эксперимента. Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.

Из приведенных на рисунке 7 зависимостей следует, что при постепенном увеличении уровня звукового давления с 130 до 150 дБ эффективность ультразвуковой коагуляции увеличивается. Однако при приближении значения уровня звукового давления к 150 дБ рост эффективности замедляется. Поэтому экстраполируя полученные зависимости в область более высоких уровней звукового давления, можно предположить, что в диапазоне 160–170 дБ существует оптимальное значение уровня звукового давления, превышение которого уже не приведет к дальнейшему заметному росту эффективности коагуляции и будет энергетически не выгодно.



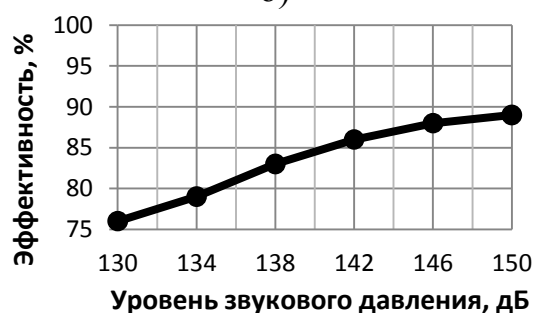
а)



б)



в)



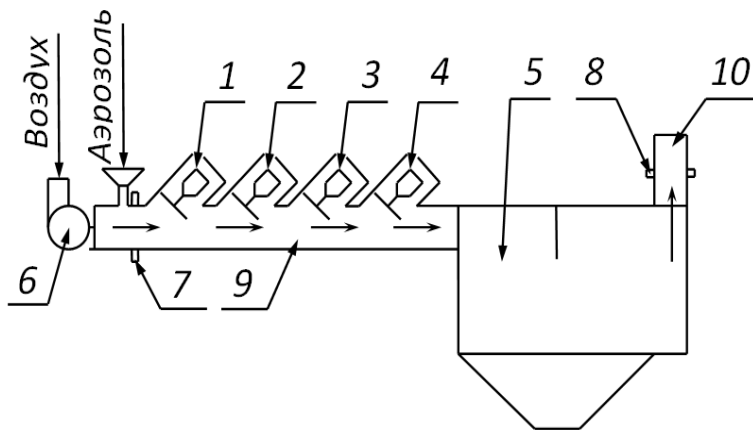
г)

а) – аэрозоль водный № 1 (5–10 мкм); б) – известковая пыль (5–10 мкм);  
в) – аэрозоль водный № 2 (2–5 мкм); г) – мучная пыль (1–5 мкм)

Рисунок 7 – Зависимость эффективности коагуляции аэрозоля от уровня звукового давления

Для демонстрации данного предположения были проведены дополнительные исследования с помощью фокусирующего излучателя (уровень звукового давления в фокусе составляет более 165 дБ), показавшие, что наряду с коагуляцией происходит и дополнительное диспергирование коагулируемой жидкости. Это подтверждает невыгодность применения для коагуляции газодисперсных систем уровня звукового давления свыше 160 дБ.

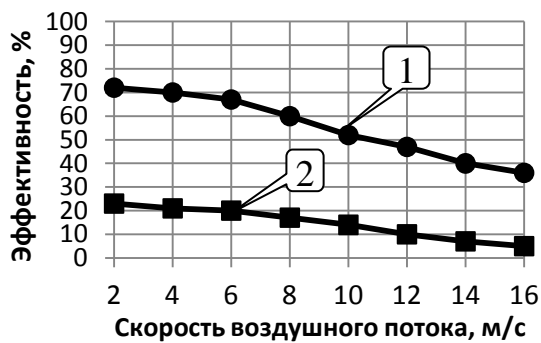
Второй частью экспериментальных исследований было определение возможности и оптимальных режимов ультразвуковой коагуляции аэрозолей, переносимых воздушными потоками. Исследования проводились в специальной установке, эскиз которой представлен на рисунке 8.



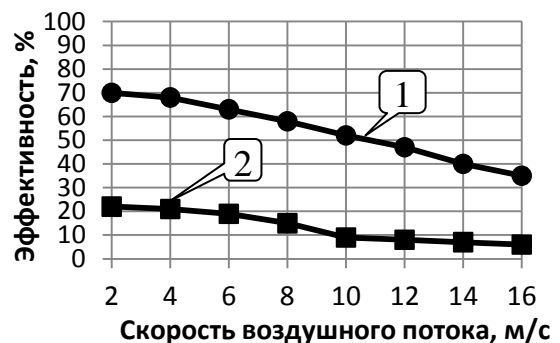
- 1 – УЗКС 320 мм;
- 2 – УЗКС 420 мм;
- 3 – УЗКС 360;
- 4 – УЗКС 250;
- 5 – осадительная камера;
- 6 – нагнетатель;
- 7 – измеритель плотности аэрозоля (ИПА 1);
- 8 – ИПА 2;
- 9 – входной патрубок;
- 10 – выходной патрубок

Рисунок 8 – Эскиз экспериментальной установки для исследования УЗ коагуляции в потоке воздуха

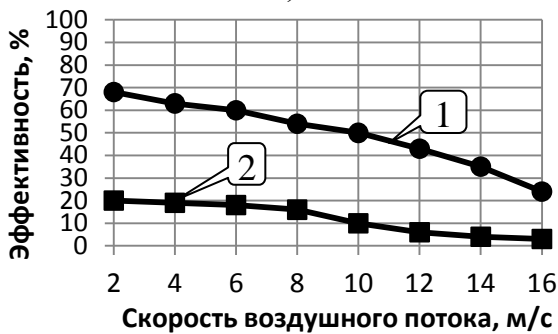
По результатам эксперимента были построены графики зависимости эффективности очистки газового потока от скорости воздушных потоков при наличии ультразвукового воздействия и без него (рисунок 9).



а)



б)



в)



г)

- 1 – с ультразвуковым воздействием; 2 – без ультразвукового воздействия
- а) – аэрозоль водный № 1 (5–10 мкм); б) – известковая пыль (5–10 мкм);
- в) – аэрозоль водный № 2 (2–5 мкм); г) – мучная пыль (1–5 мкм)

Рисунок 9 – Зависимость эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей от скорости воздушных потоков

Анализ полученных данных позволяет говорить о том, что при скоростях воздушных потоков до 8 м/с ультразвуковую коагуляцию можно использовать как самостоятельный способ очистки газовых потоков. Максимальное значение степени осаждения в потоке воздуха составило 72 %. Однако при скорости воздушных потоков свыше 8 м/с ультразвуковую коагуляцию эффективно применять в качестве предварительной или первой ступени обработки газовых потоков (степень эффективности около 20 %).



В результате проведенных исследований была экспериментально подтверждена эффективность акустической коагуляции аэрозолей с различной дисперсной фазой в ультразвуковом диапазоне частот.

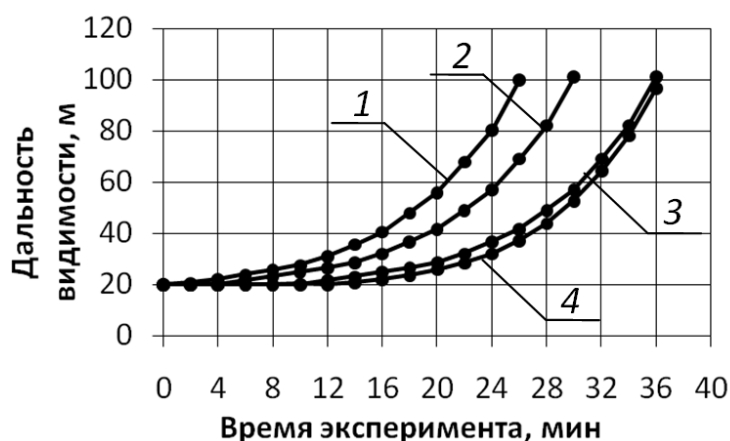
Установлено, что:

- для аэрозолей с размером частиц 5 мкм и более оптимальным режимом коагуляции является воздействие акустическими колебаниями с частотой в диапазоне 21–25 кГц, а для аэрозолей с размером частиц 1–5 мкм с частотой более 25 кГц;
- повышать частоту воздействия выше 27 кГц для аэрозолей микрометрового размера частиц не эффективно по причине малого относительного прироста эффективности и значительного возрастания энергетических потерь в излучателе;
- при приближении значения уровня звукового давления к 150 дБ рост эффективности коагуляции аэрозолей замедляется. Это позволяет предположить, что в диапазоне 160–170 дБ существует оптимальное значение звукового давления, превышение которого уже не приведет к дальнейшему заметному росту эффективности коагуляции (вплоть до кавитационного распыления жидкостных аэрозолей или разрушения конгломератов объединившихся частиц) и будет энергетически не выгодно;
- применение УЗ воздействия на аэрозоли может стать эффективным способом повышения эффективности работы газоочистного оборудования (циклоны различных конструкций, осадительные камеры, пылевые мешки), поскольку позволяет в разы увеличивать размеры аэрозольных частиц, что напрямую влияет на степень их улавливания (известно, что для мелкодисперсных аэрозолей с размером частиц 2–5 мкм степень очистки в циклонах, камерах, мешках составляет не более 60 %, в то время как, степень улавливания частиц размером 15–20 мкм составляет уже 95–99,9 %);
- воздействие в УЗ диапазоне частот позволяет коагулировать аэрозоли, переносимые воздушными потоками, позволяя увеличить степень осаждения от 3 до 6 раз, в зависимости от скорости потока.

**Четвертый раздел** содержит результаты проектирования и предложения по практическому применению ультразвуковой коагуляции.

Первая часть раздела посвящена исследованию возможности и эффективности ультразвуковой коагуляции в больших объемах. Для этого была подготовлена коагуляционная камера объемом 250 м<sup>3</sup>. В качестве меры эффективности воздействия оценивалось время установления требуемой дальности видимости (100 м). Камера наполнялась аэрозолем (с жидкой дисперсной фазой) до достижения начальной видимости, не более 20 м. Контрольное время увеличения дальности видимости с 20 до 100 м в процессе естественного осаждения аэрозоля составляет 5 ч. Результаты представлены на рисунке 10.

Из приведенных зависимостей следует, что наложение ультразвуковых колебаний позволяет сократить время достижения требуемого значения видимости до 11,5 раз. При использовании самого маломощного излучателя диаметром 250 мм время разрушения аэрозоля сократилось в 8,3 раза.

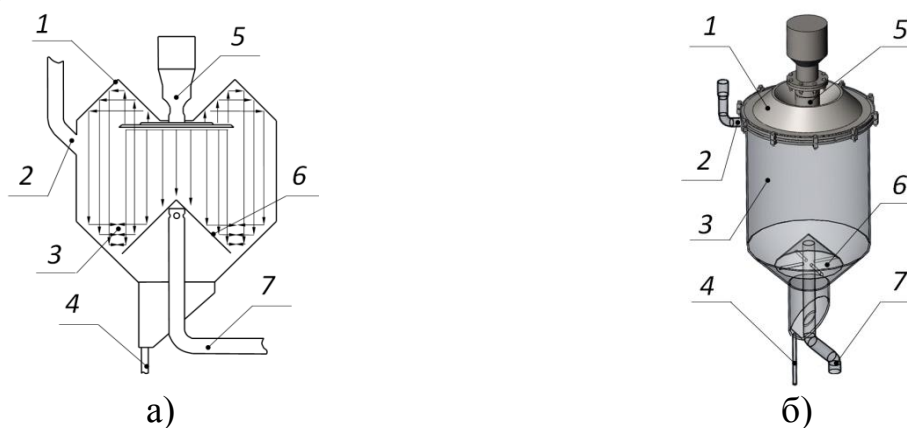


1 – воздействие излучателем диаметром 420 мм;  
 2 – воздействие излучателем диаметром 360 мм;  
 3 – воздействие излучателем диаметром 320 мм;  
 4 – воздействие излучателем диаметром 250 мм

Рисунок 10 – Зависимость изменения дальности видимости в камере от времени в процессе акустического воздействия

Вторая часть раздела содержит предложения по практическому использованию ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газов. Самый простой вариант использования разработанного ультразвукового оборудования – монтаж излучателей непосредственно в газопровод или трубопровод. Такая установка может быть выполнена в виде протяженного канала воздухопровода, в нижней части которого в местах пучности УЗ колебаний выполнены отверстия, соединенные с бункером для коагулированных дисперсных частиц. Размеры дымохода должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечивался режим стоячей волны (использование в наибольшей степени энергии звуковой волны) и время пребывания частиц в камере было бы не меньше 5–10 с.

На рисунке 11 показана разработанная на основе циклона камера с резонансным усилением, содержащая в своем составе источник ультразвуковых колебаний.



а – структурная схема циклона с УЗ излучателем;  
 б – 3D-модель циклона с УЗ излучателем;

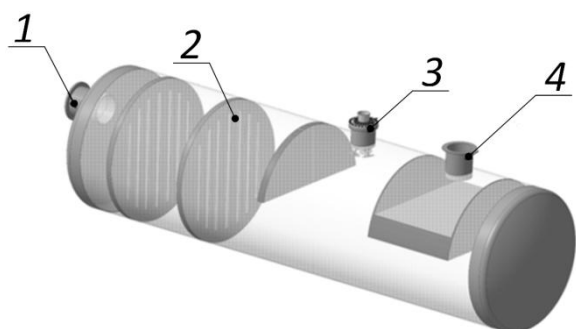
1 – верхний отражатель; 2 – входной патрубок; 3 – корпус циклона;  
 4 – отвод к бункеру; 5 – ультразвуковая колебательная система;  
 6 – нижний отражатель; 7 – выходной патрубок

Рисунок 11 – Конструкция циклона с ультразвуковым излучателем

Предложенный вариант усовершенствования циклона за счет введения в конструкцию источника УЗ колебаний и обеспечения резонансного режима должен значительно повысить эффективность процесса улавливания

аэрозолей за счет дополнительного эффекта УЗ коагуляции (патент РФ на полезную модель № 102197). В настоящее время на основе предложенной конструкции предприятием ЗАО «Электронточмаш» разрабатывается оборудование для улавливания поликристаллического кремния из среды водорода.

На рисунке 12 приведена модель сепаратора для очистки жидкостных включений в попутном газе, с установленными ультразвуковыми аппаратами для коагуляции аэрозолей. Особенностью сепаратора, представленного на рисунке 13, является возможность работы при высоких давлениях. Эффективность процесса улавливания дисперсных примесей в представленных устройствах значительно повышается за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями. В настоящее время разработанный промышленный сепаратор (рисунок 13) готовится к выпуску предприятием ООО «НПП «Экоэнергомаш».



1 – выходной патрубок;  
2 – насадки; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – входной патрубок  
Рисунок 12 – 3D-модель сепаратора

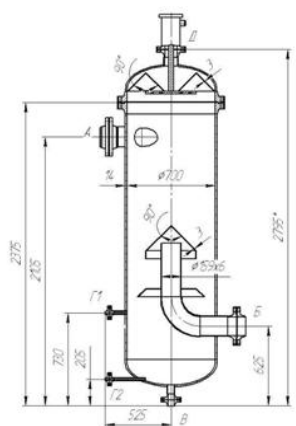


Рисунок 13 – Конструкция сепаратора с УЗ аппаратом для работы при высоком давлении

Приведенные конструкции оборудования показывают, что применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности является перспективным способом повышения эффективности различных систем газоочистки. Введение источников ультразвуковых колебаний в системы газоочистки позволяет значительно повысить степень очистки запыленного газа.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность процесса ультразвуковой коагуляции дисперсных частиц, являются параметры акустического воздействия (частота, уровень звукового давления), и показано, что установление взаимосвязи между указанными параметрами и эффективностью процесса коагуляции позволит определить оптимальные режимы и условия УЗ воздействия на различные газодисперсные системы.

2. Разработана теоретическая модель, описывающая процесс ультразвуковой коагуляции под действием упругих колебаний в газовой среде, основанная на системе уравнений Смолуховского, учитывающая влияние вязкости газовой дисперсионной среды и позволяющая определить

оптимальные режимы ультразвукового воздействия в зависимости от дисперсного состава газодисперсной системы (в диапазоне менее 10мкм).

3. На основе разработанной модели проведено теоретическое исследование зависимости эффективности коагуляции газодисперсных систем от параметров акустического воздействия и установлено, что для мелкодисперсных аэрозолей наиболее эффективно воздействие в ультразвуковом диапазоне частот с уровнем звукового давления более 130 дБ.

4. Сформулированы основные требования к ультразвуковым аппаратам для коагуляции аэрозолей и показано, что для эффективной реализации процесса акустической коагуляции УЗ аппарат должен обеспечивать воздействие с частотой колебаний более 20 кГц и уровнем звукового давления в диапазоне 130–160 дБ.

5. В качестве конструктивной схемы ультразвукового излучателя выбрана трехполуволновая пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем в форме диска, технические характеристики которой соответствуют основным требованиям к УЗ аппаратам и позволяют обеспечивать оптимальное воздействие для реализации процесса коагуляции.

6. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие ускорение процесса коагуляции аэрозолей с различной дисперсной фазой в ультразвуковом диапазоне частот на выявленных режимах в 11-18 раз.

7. На основе полученных теоретических и экспериментальных результатов предложены варианты практического применения ультразвуковой коагуляции для очистки промышленных газов и способ повышения эффективности работы различного пылеулавливающего оборудования.

## **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Khmelev, V.N. The Acoustical Coagulation of Aerosols [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.289–294.

2. Хмелев, В.Н. Усовершенствованная конструкция циклона для очистки промышленных газов от дисперсных примесей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 104–107.

3. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляционная камера для работы в агрессивных средах [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова // Сборник научных трудов «Современные проблемы радиоэлектроники» / Под ред. А.И. Громыко, А.В. Сарафанова. – Красноярск: ИФК СФУ, 2009. – С. 232–235.

4. Khmelev, V.N. Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk [Текст] / V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova, S.S. Khmelev, A.N. Lebedev, A.N. Galahov // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. - P.250-253.

5. Khmelev, V.N. Compact Ultrasonic Drier [Текст] / V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev, R.V. Barsukov, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.277–282.

6. Shalunova, K.V. Development and Investigation of the Ultrasonic Coagulation Camera [Текст] / K.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.274-276.

7. Шалунова, К.В. Осаждение готового продукта из газовой среды методом ультразвуковой коагуляции [Текст] / К.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. 8–12.

8. Хмелев, В.Н. Экспериментальное исследование эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.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. 255–262.

9. Шалунова, К.В. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для разрушения туманов [Текст] / К.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: межвузовский сборник. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 267–272.

10. Хмелев, В.Н. Исследование процесса коагуляции частиц под воздействием ультразвуковых колебаний [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: межвузовский сборник.– Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 335–342.

11. Хмелев, В.Н. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для повышения эффективности систем газоочистки [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, М.В. Хмелев // Вторая международная конференция «Пылегазоочистка-2009»: сборник докладов. – М.: ООО «ИНТЕРЭКО», 2009. – С. 97–101.

12. Шалунова, К.В. Исследование эффективности ультразвуковой очистки промышленных газов от дисперсных примесей [Текст] / К.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов // Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: материалы докладов 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 21–26.

13. Разработка и испытания экспериментального образца установки электрофизического воздействия на природные и техногенные воздушно-капельные дисперсии. Выбор направления исследований и проведение необходимых расчетов (разработка методик), экспериментальные исследования, изготовление образцов: отчет о НИР (промежут.) по

госконтракту № 02.515.11.5100 [Текст] / ООО «Центр ультразвуковых технологий»; рук. Хмелев В. Н. – Бийск, 2009. – 384 с. – Хмелев В.Н., Шалунов А.В. и др. – Библиогр.: С. 273–279. – №ГР 13243.2204023867.09.1.001. – Инв. № 02200953628.

14. Разработка и испытания экспериментального образца установки электрофизического воздействия на природные и техногенные воздушно-капельные дисперсии. Испытания образцов, проведение дополнительных исследований, обобщение и оценка результатов в исследованиях [Текст]: отчет о НИР (заключит.) по госконтракту № 02.515.11.5100 / ООО «Центр ультразвуковых технологий»; рук. Хмелев В. Н. – Бийск, 2009. – 377 с. – № ГР 01200958189 – Инв. № 02201050120.

15. Разработка и создание высокоэффективных электроакустических преобразователей для интенсификации процессов в газовых средах [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) [Текст] / Бийский технологический институт; рук. Шалунов А.В. – Бийск, 2009. – 108 с. – № ГР 01200958189. – Инв. № 02200953628.

16. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов. Бийск: АлтГТУ, 2010. – 228 с.

17. Хмелев, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.

18. Хмелев, В.Н. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 303–309.

19. Хмелев, В.Н. Экспериментальное исследование эффективности воздействия акустическими колебаниями ультразвуковой частоты на воздушно-капельные дисперсии [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, К.В. Шалунова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Том 16. – № 3. – С. 632–642.

20. Ультразвуковая коагуляционная камера: пат. №102197 Российская Федерация: МПК7 В01D51/08 / Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 2010140035/05; заявл. 29.09.10; опубл. 20.11.10, Бюл. № 5. – 5 с.

21. Хмелев, В.Н. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, К.В. Шалунова // Химическая техника.– 2010. – №1. – С. 23–28.

22. Khmelev, V.N. Theoretical Study of Acoustic Coagulation of Gas-dispersed Systems [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golyh, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.328-333.

23. Shalunova, K.V. Investigation of Influence of High-frequency Ultrasonic Vibrations on Industrial Mists [Текст] / K.V. Shalunova, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, D.V. Genne // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.312-317.

24. Шалунова, К.В. Исследование возможности коагуляции аэрозолей различного происхождения [Текст] / К.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 194–199.

25. Хмелев, В.Н. Исследование зависимости геометрических размеров на характеристики излучателя в виде пластины [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Галахов, А.Н. Лебедев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 200–205.

26. Хмелев, В.Н. Теоретическое исследование процесса акустической коагуляции газодисперсных систем [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 222–227.

27. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция твердых частиц в газовых потоках [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Галахов, А.Н. Лебедев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 227–230.

28. Шалунова, К.В. Экспериментальное исследование эффективности ультразвуковой коагуляции аэрозолей с жидкой дисперсной фазой [Текст] / К.В. Шалунова, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 234–237.

29. Способ электрофизического воздействия на воздушно-капельные дисперсии: пат. № 2415438 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> B01D51/08 / Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Шалунова К.В., Лебедев А.Н. .; заявитель и патентообладатель: ООО «Центр ультразвуковых технологий». – 2008142639/14; заявл. 27.10.08; опубл. 10.05.10, Бюл. № 13. – 11 с.

Подписано в печать 19.05.2011 г. Печать – ризография. Заказ 2011 – 73

Объем 1,44 п.л. Тираж 100 экз.

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

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27