

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



АНТОННИКОВА АЛЕКСАНДРА АЛЕКСАНДРОВНА

ОСАЖДЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
доцент О.Б. Кудряшова

Бийск – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Общая характеристика проблемы и обзор методов ее решения	11
1.1 Классификация и основные характеристики аэрозолей	11
1.2 Источники возникновения промышленных аэрозолей.....	15
1.2.1 Текстильная промышленность	15
1.2.2 Горнодобывающая промышленность	16
1.2.3 Мукомольное производство.....	18
1.3 Пылеулавливающие аппараты для очистки производственных помещений	19
1.3.1 Сухая механическая очистка	20
1.3.2 Аппараты мокрой очистки	23
1.3.3 Электрофильтры.....	24
1.3.4 Фильтрация аэрозолей.....	26
1.3.5 Акустическая коагуляция.....	27
1.3.5.1 Механизмы акустической коагуляции аэрозолей	28
1.3.5.2 Влияние аэрозольных и акустических характеристик на кинетику процесса.....	33
1.3.6 Проблемы существующего оборудования для улавливания аэрозолей различных веществ. Предлагаемый способ осаждения	36
Выводы по первой главе.....	38
2 Выбор методов распыления дополнительной дисперсной фазы и акустического воздействия	39
2.1 Акустические излучатели.....	39
2.1.1 Аэродинамические излучатели.....	39

2.1.1.1 Статические сирены.....	40
2.1.1.2 Динамические сирены	43
2.1.2 Электромеханические излучатели	45
2.1.2.1 Электромеханические преобразователи с магнитострикционным активным элементом.....	46
2.1.2.2 Электромеханические преобразователи с пьезоэлектрическим активным элементом.....	47
2.2 Классификация способов распыления жидкостей.....	50
2.2.1 Гидравлическое распыление.....	51
2.2.2 Механическое распыление.....	51
2.2.3 Электростатическое распыление.....	52
2.2.4 Пневматическое распыление	53
2.2.5 Акустическое распыление.....	54
Выводы по второй главе.....	54
3 Физико-математическая модель эволюции аэрозоля	56
3.1 Физико-математическая постановка задачи.....	56
3.2 Испарение капель и его влияние на спектр частиц	58
3.3 Модель коагуляции аэрозоля под действием ультразвука	60
3.4 Физико-математическая модель коагуляции в случае двухфазного аэрозоля	64
3.5 Учет радиационного давления в модели. Изменение массы аэрозоля	66
Выводы по третьей главе	70
4 Экспериментальная часть.....	72
4.1 Способы и устройства для экспериментальных исследований	72
4.2 Эволюция жидкокапельных аэрозолей.....	78

4.2.1 Осаждение водного аэрозоля ультразвуковым воздействием	78
4.2.2 Ультразвуковое осаждение трудноиспаряемых жидкостей	80
4.2.3 Ультразвуковое осаждение мелкодисперсных аэрозолей трудноиспаряемых жидкостей в условиях высокой влажности	86
4.2.4 Влияние частоты акустических источников на осаждение аэрозоля	88
4.3 Эволюция твердофазных аэрозолей	90
4.3.1 Осаждение мучной пыли ультразвуковым воздействием	90
4.3.2 Осаждение дыма ультразвуковым воздействием	91
4.4 Взаимодействие жидкокапельных и твердофазных частиц в аэрозоле	93
4.4.1 Осаждение дыма при введении дополнительной фазы	93
4.4.2 Осаждение угольной пыли при введении дополнительной фазы	95
4.5 Рекомендации по размещению в помещении ультразвуковых излучателей в целях осаждения аэрозоля	97
4.6 Рекомендации по использованию распылителей дополнительной дисперсной фазы в целях осаждения аэрозоля	99
Выводы по четвертой главе	100
Заключение	101
Список использованных источников	102
Приложение А Акт использования	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационной работы. Окружающий человека атмосферный воздух непрерывно подвергается загрязнению. Воздух производственных помещений загрязняется выбросами технологического оборудования или при проведении технологических процессов без локализации отходящих веществ. Удаляемый из помещения вентиляционный воздух может стать причиной загрязнения атмосферного воздуха промышленных площадок и населенных мест.

В последнее время активно растет уровень профессиональных заболеваний работников различных отраслей производства, где имеют место аэрозольные загрязнения [1]. Качество воздуха производственных помещений, его воздействие на организм человека, а также во многих случаях влияние на оборудование в значительной мере обусловлены содержанием в нем взвешенных частиц, главным образом, пыли. Присутствие пыли непосредственным образом отражается на здоровье человека, находящегося в помещении. Отсюда возникает необходимость проведения исследований по созданию метода эффективной нейтрализации вредных выбросов, в частности, осаждения аэрозолей. Актуальность исследований обусловлена необходимостью охраны здоровья и создания безопасных условий труда.

В настоящее время для нейтрализации промышленных аэрозолей используются разнообразные устройства (например, циклоны, фильтры, пылеуловители, осадительные камеры). Однако они обладают значительными недостатками: сложность устройства, неприменимость для мелкодисперсных аэрозолей; чувствительность к использованию в агрессивных взрывоопасных средах; необходимость замены или очистки фильтров, что приводит к ограничению применимости подобных способов очистки газовых сред. Возможным решением указанной проблемы является укрупнение и последующее осаждение частиц под действием автономных акустических источников (ультразвуковых). С другой стороны, для ликвидации твердофазных аэрозольных

и газообразных выбросов эффективным способом может служить дополнительное распыление мелкодисперсного жидкокапельного аэрозоля, что создает условия для коагуляции промышленного аэрозоля и его осаждения.

Предложенный способ осаждения (воздействие ультразвука и дополнительной дисперсной фазы на облако аэрозоля) имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами улавливания и осаждения промышленных аэрозолей:

- простота конструкции, компактность в размещении;
- применимость к агрессивным и взрывоопасным газам;
- возможность работы при высоких давлениях и температурах.

Достижимый эффект растет с увеличением дисперсности нейтрализующего аэрозоля, так как мелкодисперсный аэрозоль обладает большой поверхностью по отношению к массе, что ведет к увеличению суммарной поверхности адсорбции. Таким образом, большой практический интерес представляет дополнительное введение мелкодисперсного аэрозоля с характерным размером частиц порядка 1-5 микрометров.

В связи с этим, **целью настоящей работы** является теоретическое и экспериментальное исследование процессов эволюции и механизмов осаждения мелкодисперсных аэрозолей с помощью акустического излучения и дополнительной дисперсной фазы; поиск путей и способов ускорения осаждения таких аэрозолей.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

- Проанализировать наиболее распространенные источники образования промышленных аэрозолей и способы их нейтрализации. Предложить новый эффективный метод осаждения аэрозолей, обосновав его преимущества перед применяемыми на практике методами.
- Осуществить обоснованный выбор способов экспериментального исследования, учитывая свойства рассматриваемых аэрозольных сред.
- Создать экспериментальную базу и разработать методики проведения исследований процесса коагуляции взвешенных частиц рассматриваемого

аэрозоля в звуковом поле, с предварительным распылением жидкокапельного аэрозоля.

– Разработать физико-математическую модель эволюции аэрозольного облака, в том числе двухфазного аэрозоля, под действием ультразвукового (УЗ) излучения.

– Провести серии экспериментов по осаждению различных аэрозолей под УЗ-воздействием, в том числе с внесением дополнительной дисперсной фазы с целью установления закономерностей процесса и проверки адекватности физико-математической модели.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование механизма взаимодействия УЗ-излучения с мелкодисперсными аэрозольными средами. Получены новые закономерности, позволяющие определить изменение массы и дисперсности аэрозоля в зависимости от начальных размеров, физико-химических свойств частиц и параметров внешней среды.

2. На основании исследования механизмов ультразвукового осаждения аэрозолей, впервые найдены предельные случаи осаждения мелкодисперсных аэрозолей и возникающие при этом основные процессы: коагуляция или радиационное давление. Установлено, что применение дополнительной дисперсной фазы с размерами частиц, порядка 2-4 мкм, увеличивает скорость коагуляции частиц аэрозолей в условиях ультразвукового воздействия.

3. Определены новые закономерности процесса осаждения мелкодисперсных аэрозолей, состоящих из двух фаз (жидкокапельной и твердофазной), в широком диапазоне параметров: дисперсность и физико-химический состав частиц, температура и влажность среды, частота акустического воздействия.

4. Исследование ультразвукового осаждения аэрозолей имеет фундаментальное значение с точки зрения выявления механизмов взаимодействия частиц аэрозолей с характерным диаметром, менее 10 мкм, с акустическим излучением. Прикладное значение работы заключается в разработке новых способов осаждения промышленных аэрозолей.

Практическая ценность работы:

1. Теоретически и экспериментально подтверждена эффективность предварительного введения мелкодисперсного водного аэрозоля и применения УЗ-воздействия для коагуляции и осаждения аэрозолей.

2. Предложены рекомендации по оптимальному размещению в производственном помещении источников акустического излучения и дополнительной дисперсной фазы с целью наиболее эффективного осаждения вредных пылей и дымов.

3. Разработанный способ очистки и полученные данные работы могут быть применены для устранения мелкодисперсного аэрозоля пыли, задымленности, пара в закрытом пространстве.

Достоверность результатов, полученных в работе, основывается на строгом физическом обосновании разработанных моделей, логической постановке экспериментов и большом объеме полученных экспериментальных данных; использовании измерительной техники нового поколения, методов статистики при обработке и анализе погрешности измерений в соответствии с установленными методиками. Достоверность расчетных методов удовлетворительно подтверждается сходством расчетных и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель коагуляции аэрозольных сред, учитывающая процессы испарения, седиментации, влияния акустического поля, взаимодействия фаз.

2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований эволюции аэрозолей при УЗ-воздействии и введении дополнительной фазы различной дисперсности для различных значений параметров аэрозоля, акустического воздействия, окружающей среды.

Публикации

Основные материалы диссертации изложены в 21 научных работах, в том числе 9 статей в российских рецензируемых научных журналах.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на VII Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 2011), XVII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2011), Всероссийской научной конференции «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» (г. Бийск, 2011), XVIII и XIX Рабочих группах «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2011, 2012), International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices «EDM 2012» (Erlagol, Altai, 2012), XXX Сибирском теплофизическом семинаре X Международной конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (г. Новосибирск, 2012), XXIII семинаре по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием) (г. Томск, 2012), IV научно-технической конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» (г. Бийск, 2012).

Исследования проводились в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 12-08-90811-мол_рф_нр «Эволюция облака жидкокапельных аэрозолей в поле силы тяжести с учетом взаимных столкновений и процессов динамического взаимодействия частиц с окружающей средой», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 2012-1.4-12-000-4005-8160 «Повышение эффективности ракет космического назначения (РКН) с маршевыми ЖРД за счёт использования ресурсов отделяющихся частей (ОЧ), в том числе заключённых в невырабатываемых остатках компонентов ракетного топлива (КРТ) и накопленной энергии на участке выведения для реализации программы прикладных и фундаментальных экспериментов».

Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, установлении задач и планировании исследований, выборе теоретических и экспериментальных методов решения поставленных задач. Диссертант принимал

непосредственное участие в постановке и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, подготовке публикаций по выполненной работе.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения; изложена на 114 страницах машинописного текста, включая 46 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 103 источника.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе описаны источники возникновения вредных аэрозолей в различных отраслях промышленности (на примере нескольких производств). Приведен обзор литературы и выполнен анализ используемых на практике способов улавливания дисперсных примесей из газовых сред.

Во второй главе осуществлен сравнительный анализ конструкций источников ультразвуковых колебаний и способов распыления жидкокапельного аэрозоля.

В третьей главе представлены теоретические исследования процессов, происходящих в аэрозольных средах; физико-математические модели коагуляции и осаждения двухфазного аэрозоля под действием акустических полей.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение теоретических расчетов с применением методов численного моделирования.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1 Общая характеристика проблемы и обзор методов ее решения

В процессе производственной деятельности в воздушную среду помещений могут поступать разнообразные вредные вещества. Для создания нормальных условий труда очень важно обеспечить необходимую чистоту воздуха, так как большое число работающих может подвергаться воздействию производственной пыли. Вредными принято считать вещества, которые при контакте с организмом человека в случае нарушения требований безопасности могут вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания, отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами, как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений [2].

Особенно большая опасность возникает в процессе работы с нанопорошками, причем, с точки зрения безопасности важен полный технологический цикл: от получения порошков до их утилизации.

Для правильного выбора пылеулавливающего оборудования, разработки новых и совершенствования существующих пылеулавливающих устройств необходимо знать основные свойства аэрозолей.

В главе 1 приведен анализ характеристик вредных аэрозолей различных отраслей промышленности и показаны способы и оборудование для их очистки. На основании аналитического обзора предложен новый метод решения данной проблемы.

1.1 Классификация и основные характеристики аэрозолей

Аэрозоли – это дисперсные системы с газообразной дисперсионной средой и твердой (дым, пыль) или жидкой (туман) дисперсной фазой [3]. Общепринятая классификация аэрозолей по типам включает в себя три больших класса: дымы, пыли, и туманы [3, 4].

Пыли состоят из твердых частиц, распыленных в газообразной внешней среде в результате механического измельчения твердых тел (например, пыль,

образующаяся в результате дробления или измельчения горных пород и минералов, при бурении или взрывных работах); под действием аэродинамических сил (воздушной струи) на порошкообразные материалы [5]. В обыденной жизни пылью нередко называют осадок пыли на различных поверхностях, легко переходящий обратно во взвешенное состояние. В большинстве случаев пыли – весьма полидисперсные малоустойчивые системы; они содержат больше крупных частиц, чем дымы и туманы, хотя кривые распределения частиц пыли по размеру нередко заходят и в субмикронную область. Счетная концентрация (число частиц в единице объема среды) в пыли обычно невелика, по сравнению с туманом или дымом [6].

Дымы – конденсационные аэрозоли с твердой дисперсной фазой, а также системы конденсационного происхождения, содержащие и твердые и жидкие частицы (размер частиц – от субмикронных до 5 мкм). Дымы образуются при горении или возгонке летучих веществ, а также в результате химических и фотохимических реакций [3, 6].

Туманы – капельки жидкости, возникающие при конденсации пара либо распылении жидкокапельного аэрозоля. При этом в каплях могут содержаться растворенные вещества или твердые частицы в виде суспензии (размер частиц – до 10 мкм и выше). Счетная концентрация частиц тумана выше концентрации частиц пыли, но мала по сравнению с дымами [5].

По способу происхождения аэрозоли разделяют на конденсационные и диспергационные (дисперсионные) аэрозоли. При объемной конденсации пересыщенного пара или в результате протекания реакция в газах, ведущих к образованию нелетучих продуктов, образуются конденсационные аэрозоли [3]. Диспергационные аэрозоли образуются при диспергировании (распылении, измельчении) твердых и жидких тел и при переходе порошков в состояние аэрозолей под действием потоков воздуха, сотрясений и т.п.

Формы частиц аэрозоля удобно принимать за сферические (для упрощения анализа процессов, происходящих в аэрозолях). Однако они могут иметь различную форму, за исключением жидких капель, которые чаще всего являются

сферами или эллипсоидами. Частицы аэрозолей можно распределить на три основных класса, форма частиц для каждого из которых приведена на рисунке 1.1.

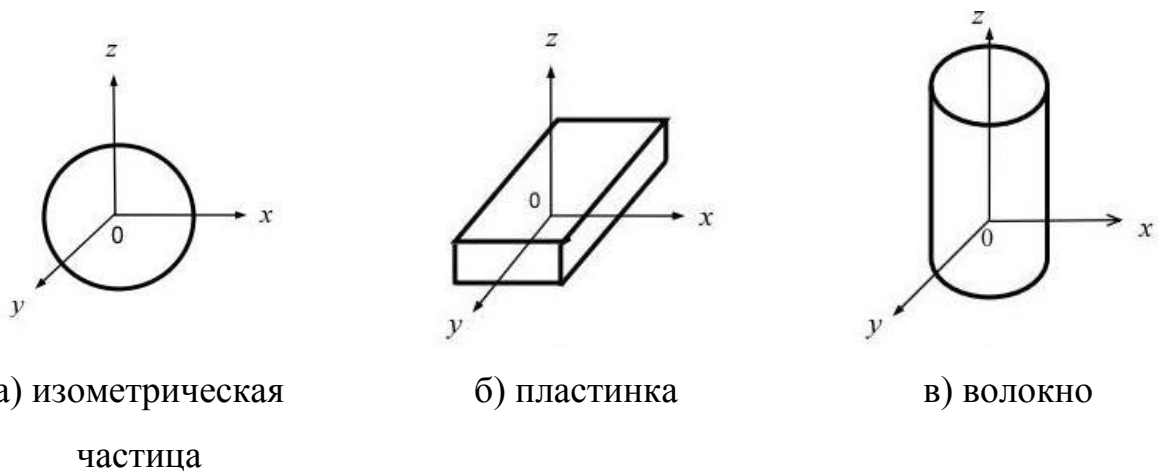


Рисунок 1.1 – Основные формы частиц

Для изометрической частицы (рисунок 1.1 а), все три размера по осям x , y , z в первом приближении совпадают. Сферы, правильные многогранники или частицы, близкие к ним по форме, относятся к этому классу. К изометрическим частицам относится большая часть научных представлений о поведении аэрозолей (движение двухфазных сред, оптика аэрозолей и т. д.).

Пластинки представляют собой частицы, которые имеют два длинных ребра и одно короткое: пленки, диски, лепестки, чешуйки, мембраны (рисунок 1.1 б).

Частицы в форме волокон имеют протяженные размеры в одном направлении и сравнительно небольшие – в других двух направлениях (рисунок 1.1 в). К ним относятся минеральные волокна или нити, иглы, призмы (например, асбест). Причиной исследования поведения волокон в воздухе стало установление того, что асбестовая пыль при вдыхании вредна для здоровья. Однако волокна, как аэродисперсные системы, слабо изучены, что нельзя сказать про изометрические частицы.

Форма частиц аэрозоля зависит от природы материала и способа получения частиц. Например, при конденсации молекул пара, образующиеся частицы имеют, как правило, сферическую форму. При размельчении крупных образцов

возникающие частицы редко бывают сферическими, за исключением, дробления капель.

По размерам аэрозольные частицы принято подразделять на четыре класса:

- ультрадисперсные аэрозоли – от 0,001 до 0,01 мкм;
- высокодисперсные аэрозоли – от 0,01 до 0,1 мкм;
- среднедисперсные аэрозоли – от 0,1 до 20 мкм;
- грубодисперсные аэрозоли – от 20 до 100 мкм [6].

Среднедисперсные аэрозоли называются также большими частицами, а грубодисперсные – гигантскими. Для частиц меньше 1 мкм в литературе также употребляются термины субмикронная или тонкодисперсная фракция [7, 8]. В работе, частицы аэрозоля с размером от 1 до 15 мкм будут отнесены к классу мелкодисперсных аэрозолей.

В таблице 1.1 приведены типичные размеры аэрозольных частиц различного происхождения [9, 10].

Таблица 1.1 – Типичные размеры аэрозольных частиц некоторых веществ

Аэрозоль	Диаметр частиц, мкм
Табачный дым	0,1 ÷ 1,0
Хлорид аммония	0,1
Туман серной кислоты	0,3 ÷ 0,5
Топочный дым	0,1 ÷ 10,0
Растворимый кофе, сажа, сахарная пудра	0,1 ÷ 10,0
Слоистые облака	1,0 ÷ 10,0
Факел распыла аэрозольного баллончика	1,0 ÷ 100,0
Атмосферный туман	2,5 ÷ 50,0
Тальк	10,0 ÷ 50,0
Дождевые облака	10,0 ÷ 100,0
Цветочная пыльца	15,0 ÷ 20,0
Крупа, дождевые капли	более 50,0 ÷ 100,0

Так как преследуется цель – осаждение вредных аэрозолей в закрытом пространстве, то поэтому далее будут рассмотрены источники образования промышленных аэрозолей на примерах отдельных производств.

1.2 Источники возникновения промышленных аэрозолей

В соответствующем подразделе более подробно рассмотрены источники образования промышленного аэрозоля и свойства пыли отдельных производств: текстильной, мучной, угольной пыли. Данные виды производств рассмотрены лишь для примера, так как к источникам возникновения вредных аэрозолей можно отнести практически все промышленные производства.

1.2.1 Текстильная промышленность

Текстильная промышленность развивается во многих странах мира. Производства по получению и обработке волокнистых веществ, изготовление из них всевозможных тканей и пряжи относятся к рассматриваемому виду промышленности [11].

В приготавительно-прядельных цехах вредные условия труда по большей степени определяются воздействием на работающих пыли [12]. Пыль является основной производственной вредностью, когда понижена влажность воздуха в помещении, повышена температура, усилена скорость движения воздуха в цеху, идет переработка низких сортов сырья. Переработка льна, в особенности короткого волокна и очесов, сопровождается усиленным выделением пыли, в отличие от переработки шерсти и хлопка [13, 14]. При загрузке материала в машины, выгребании угаров и чистке оборудования может образоваться существенное количество пыли [11].

На предприятиях начальной обработки льна проводились исследования воздушной среды, которые выявили высокую степень ее запыленности [15]. Содержание частиц пыли на рабочих местах в процессе первоначальной обработки доходило до 1 г/м^3 , без вентиляции – $1,6 \text{ г/м}^3$. От общего количества

частиц пыли в помещении мелкодисперсные частицы ($D_{32} < 1,3$ мкм) составили 17,3 %-44,2 % [16].

Проводились исследования по дисперсному составу льняной пыли в условиях Костромских льнокомбинатов имени В.И. Ленина и «Красная текстильщица» (г. Нерехта), которые показали различие в каждом подразделении. Например, в ткацком производстве содержание частиц пыли размером до 5,2 мкм составляло 34,44 %-84,4 %, в прядильном – 35,94 %-66,3 %. Лавсановые добавки содействовали снижению мелкодисперсных фракций пыли до 28,2 % [17].

При вдыхании текстильная пыль может вызвать заболевание глаз – конъюнктивитов, болезнь кожи в виде дерматитов, экземы, развитие заболеваний органов дыхания (бронхитов, трахеитов, фарингитов, ларингитов, атрофических и гипертрофических катаров слизистой оболочки носа). Впоследствии она способствует появлению биссиноза (профессиональное заболевание). Пыль льна, шерсти, шелка и хлопка обладает аллергенными свойствами, она способна вызывать такие заболевания, как бронхиальная астма, носовая астма, протекающая по типу острых ринитов [18, 19].

1.2.2 Горнодобывающая промышленность

Горнодобывающая промышленность занимает весомое место в промышленном производстве многих стран мира, недра которых богаты полезными ископаемыми [11].

Работы в подземных выработках (искусственных помещениях и коридорах, образующихся при проходческих и очистных работах) сопровождаются загрязнением производственной среды, а именно: образованием пыли [20].

При выемке угля или взрывных работах в угольных шахтах образуется наибольшая масса пыли. При транспортировке или переработке горных пород, связанной с их измельчением, также образуется много пыли. Интенсивное создание пыли происходит и при работе очистных комбайнов (90 % пыли в процессе горных работ). Исследования установили, что суммарное количество

пыли от разрушенного угля складывается из частиц, вновь образовавшихся в процессе работ, и из частиц, находящихся в трещинах и пустотах пласта. В пластах, расположенных в зонах геологических разломов и повышенного давления, пыли особенно много.

Средний медианный диаметр взвешенной пыли изменяется в очистных забоях крутых пластов – 30 мкм и пологих – 21-33 мкм; в забоях подготовительных выработок – 30-50 мкм; на пунктах погрузки и перегрузки – 28-41 мкм; на вентиляционных штреках вблизи лав пологих пластов – 16-27 мкм; крутых – 16-23 мкм. В забоях подготовительных выработок, в которых пыль более крупных размеров, наблюдается наибольший коэффициент вариации дисперсности пыли $\pm 22\%$, а наименьшее его значение в вентиляционных штреках $\pm 12\%$ [21].

Угольную и породную пыль относят к категории неядовитых, однако наличие пыли в воздухе приносит большой вред здоровью человека [22]. Патогенное действие производственной пыли проявляется в виде гнойничковых поражений кожи, повреждения слизистой оболочки глаз (конъюнктивит), верхних дыхательных путей (гипертрофические и атрофические риниты, трахеобронхиты), легких (хронические бронхиты). Наиболее серьезное из профессиональных заболеваний – пневмокониоз [23-25].

У рабочих угольных шахт преобладает антракоз или силикоантракоз с относительно доброкачественным течением. У отдельных рабочих карьеров и подземных шахт могут возникать и другие профессиональные заболевания легких, в частности, хронический бронхит пылевой этиологии (в основном, у людей старше 40 лет при стаже работы более 15 лет).

В угольных шахтах, как правило, присутствует метан, который в концентрациях 5 %-16 % взрывоопасен. При наличии серы в составе угля или рудных пород (чаще всего в виде серного колчедана – пирита) в нижних слоях воздуха и шахтных водах может скапливаться сероводород и сернистый газ, способные вызывать тяжелые, опасные для жизни, острые отравления.

1.2.3 Мукомольное производство

Мукомольная, зерновая промышленность является важным звеном в производстве главных продуктов питания, содержащих в своем составе питательные вещества, незаменимые для человека. В силу значимости данного вида промышленности особое внимание нужно уделять экологической обстановке на предприятии.

Измельчение зерна, сухая очистка его поверхности, очистка от примесей и сортирование, а также перемещение зерна в рабочем помещении способствуют образованию большого количества органической и минеральной пыли [26].

Зерновая и мучная пыль в определенных условиях может создать опасность загорания и взрыва. Воспламенение и взрыв пыли, находящейся во взвешенном состоянии, зависит от концентрации ее в воздухе, зольности, размера частиц, температуры и влажности воздуха в рабочем помещении. Для пыли элеваторов и мукомольных заводов температура загорания (искрения и вспышки) колеблется в пределах 315 °С-725 °С, а температура воспламенения – в пределах 600 °С-800 °С. При зольности пыли 4 % нижний предел взрывоопасной концентрации $(15-20) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, а при зольности 22 % – $(55-60) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

Скопление пыли на полу, потолке, поверхностях производственного оборудования также представляет серьезную угрозу, поскольку возможно непредвиденное их распыление до пожароопасных концентраций [26]. Возможность взрыва необходимо предотвращать профилактическими мероприятиями. Прежде всего, нельзя допускать запыленности воздуха и скапливания пыли [27].

Помимо загорания и возможности взрыва, запыленность и скапливание пыли несут опасность для здоровья работающего персонала. Условия труда работников большинства профессий в производстве зерновой продукции классифицированы как вредные и опасные 2-3 степени 3 класса [28-30].

Органическая мучная пыль оказывает негативное влияние на состояние здоровья работников, что проявляется высокой распространенностью нарушений

со стороны основных органов и систем в основном типичной и характерной аллергической направленности [28-30]. Наиболее высокая частота расстройств отмечена со стороны верхних дыхательных путей (84,3 %) и бронхо-легочного аппарата (57,8 %), органов зрения (53,7 %), нервной (38,8 %) и сердечно-сосудистой (34,7 %) систем и опорно-двигательного аппарата (36,7 %). Довольно высока частота жалоб работников мучной промышленности на поражения кожных покровов (43,5 %), а в среднем у 23,5 % обследованных лиц установлены клинические проявления аллергодерматозов.

Для предотвращения распространения пыли на производствах данного вида промышленности применяют инерционные пылеотделители, тканевые фильтры, также на заводах установлена система аспирации с отчетливым количеством отсасываемого воздуха из каждой точки пылевыведения [26].

1.3 Пылеулавливающие аппараты для очистки производственных помещений

Помимо систем вентиляции, которые обеспечивают частичную замену пыльного воздуха свежим, в промышленности находят применение разные системы нейтрализации пыли. Пылеулавливающее оборудование выбирают индивидуально для каждого вида производств, опираясь на свойства пыли и рабочую обстановку: желаемая степень очистки, влажность и температура воздуха в помещении, объем и концентрация аэрозоля, размер частиц, химическое и физическое состояние [9, 31].

Конструкции и аппараты для улавливания аэрозолей можно подразделить на пять базовых групп:

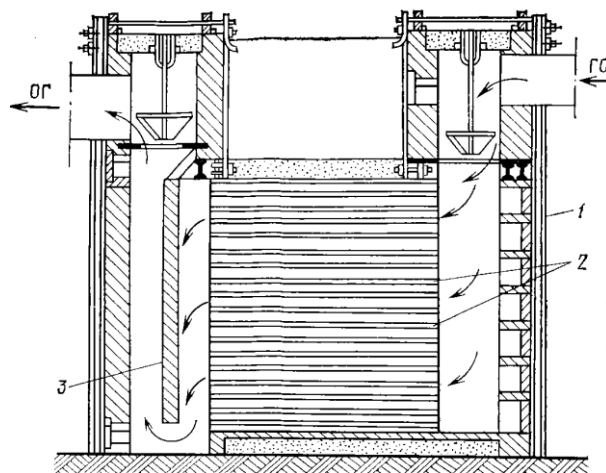
- сухая механическая очистка,
- аппараты мокрой очистки,
- электрофильтры,
- фильтрация аэрозолей,
- звуковая и ультразвуковая коагуляция.

Далее более подробно рассмотрены важные особенности перечисленных методов очистки загрязненного воздуха.

1.3.1 Сухая механическая очистка

В основе работы сухих механических пылеуловителей лежат гравитационный, инерционный и центробежный механизмы осаждения [32].

В гравитационном способе применяется свойство аэрозольных частиц, взвешенных в воздухе, оседать под воздействием силы тяжести при движении пылевоздушного ламинарного потока в осадительной камере. Размеры осадительной камеры должны быть большими (по поперечному сечению и длине) для того, чтобы предотвратить турбулизацию потока, которая препятствует осаждению частиц. При этом оседают частицы более крупного размера. Для сокращения высоты осаждения применяются горизонтальные полки, которые размещены по разным сечениям осадительной камеры (рисунок 1.2).



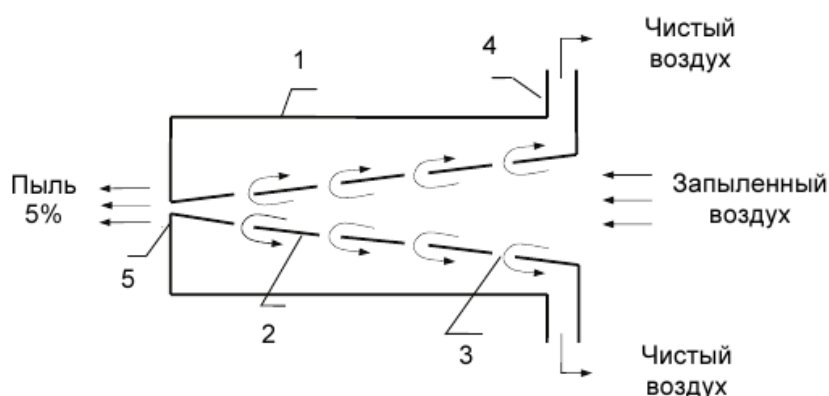
1 – корпус; 2 – полки; 3 – перегородки

Рисунок 1.2 – Многополочная пылеосадительная камера Говарда

Преимуществами пылеосадочной камеры являются простота устройства, несложность эксплуатации, долговечность. К недостаткам такого способа очистки следует отнести большие размеры камеры и возможность улавливания только крупных частиц размером 50-100 мкм. Гравитационный способ чаще всего используется для первичной обработки воздуха от частиц наиболее крупных

размеров. Частицы, оставшиеся в камере, затем осаждаются при помощи других, более результативных способов, к примеру, циклонов. Для осаждения взрыво- и пожароопасной пыли устройство больших камер не должно допускаться [33].

Инерционное осаждение основано на том, чтобы взвешенные в воздухе частицы пыли при смене направленности потока газа стремились к сохранению постоянства начального направления движения. Рассмотрим схему конического инерционного пылеотделителя (аппарат Линдерота, рисунок 1.3).



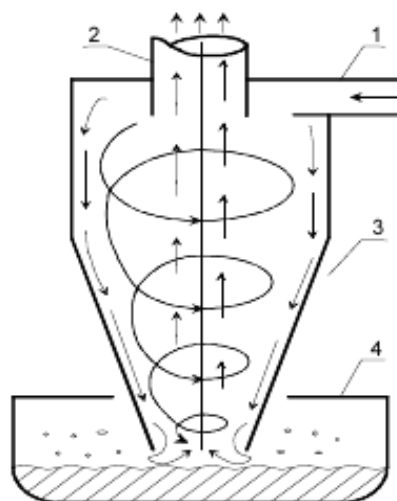
1 – корпус; 2 – конический элемент; 3 – жалюзи; 4, 5 – патрубки

Рисунок 1.3 – Аппарат Линдерота

Фильтруемый газ с высокой скоростью поступает в широкий конец конической трубы, где размещено большое число щелевых отверстий – жалюзей. Угол сужения в трубе и форма щелей выбираются так, чтобы воздух проходил через щели, при этом меняя направление движения. Содержащаяся в остальных приблизительно пяти процентах от первоначального объема газа пыль проходит в узкий конец трубки. Рассматриваемый аппарат гарантирует осаждение 97 % пылевых частиц с размером ~ 80 мкм. Такой метод осаждения можно применять только для грубодисперсных аэрозолей. Помимо небольшой эффективности к недостаткам этого метода можно отнести забивание щелей или быстрое истирание.

Центробежные методы очистки газов основаны на действии центробежной силы, которая возникает при вращении частей очистного аппарата или при вращении очищаемого газового потока в самом аппарате. В качестве

центробежных аппаратов пылеочистки используют циклоны разных типов: ротоклоны (вращающиеся пылеуловители), батарейные циклоны и др. Наиболее распространенным аппаратом в промышленности для осаждения частиц, взвешенных в воздухе, является циклон (рисунок 1.4).



1 – входной патрубок; 2 – отводящий патрубок; 3 – корпус; 4 – бункер

Рисунок 1.4 – Схема возвратно-поточного циклона:

Запыленный воздух тангенциально поступает по патрубку 1 вовнутрь цилиндрической части высотой h и следует по спирали ко дну конической части, затем движется вверх в приосевой области через турбулизованное ядро. Частицы пыли центробежной силой отбрасываются к стенкам и закрученным потоком сносятся вниз к герметизованному пылесборнику.

Наравне с противоточными на практике используются проточные циклоны. В них запыленный газ следует из одного конца и по спирали проходит к другому. При этом как пыль, так и газ выходят с одного конца из циклона (в пристеночной области – пыль, а в приосевой – очищенный газ). Соединив циклоны в последовательную батарею, резко возрастет эффективность (мультициклоны).

Оценить эффективность циклона можно по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{9\eta D_p}{2\pi n u (\rho_p - \rho)}},$$

где d – диаметр частиц, улавливаемых циклоном на 50 %; η – коэффициент динамической вязкости газа; D_p – диаметр выходного патрубка; u – средняя входная скорость газа; ρ_p , ρ – плотность частиц и газа; n – число оборотов газового потока в циклоне (обычно $n=3\div 5$).

Циклоны широко применяются для очистки от пыли вентиляционных и промышленных выбросов. Они имеют много преимуществ: простота устройства, надежность в эксплуатации при сравнительно небольших капитальных и эксплуатационных затратах. Циклоны используются обычно для грубой и средней очистки воздуха от сухой неслипающейся пыли. Они обладают сравнительно небольшой фракционной эффективностью в области фракций пыли размером 5-10 мкм, что является их основным недостатком [33].

1.3.2 Аппараты мокрой очистки

Принцип работы аппаратов мокрой очистки состоит в том, что пылевые частицы приводят в контакт с жидкостью, которая удаляется из аппарата вместе с пылью. Для повышения эффективности очистки жидкость подают в виде тумана или крупных брызг. При этом мелкие капли сливаются с более крупными, скорость оседания которых намного выше. Мокрое пылеулавливание производится в скрубберах Вентури (рисунок 1.5), оросительных башнях, вращающихся промывателях, гидроциклонах (циклонных скрубберах).

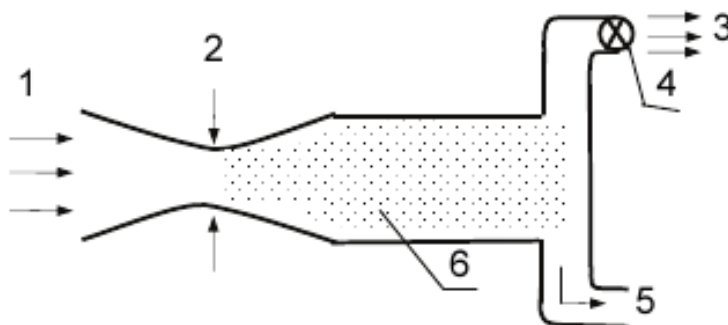


Рисунок 1.5 – Конструкция скруббера Вентури: 1 – запыленный газ; 2 – подача чистой жидкости; 3 – очищенный газ; 4 – вентилятор; 5 – жидкость с пылью; 6 – область взаимодействия частиц пыли и капель жидкости

Запыленный газ в оросительную башню поступает снизу и встречает поток распыленной жидкости. Частицы пыли схватываются падающими каплями.

Более крупные капли падают вниз, а мелкие улавливаются рядом перегородок, с которых жидкость вместе с уловленными пылевыми частицами стекает в отстойник. Очищенный газ выходит из башни сверху. Максимальная эффективность захвата частиц пыли диаметром 2-10 мкм получается при размере капель жидкости 0,5-1,0 мм.

В гидроциклоне и вращающемся промывателе вероятность соударений частиц пыли с жидкостью повышается путем придания распыленной жидкости вращательного движения. Это также способствует быстрому освобождению газа от капель промывающей жидкости.

Главный недостаток всех аппаратов мокрой очистки запыленного газа от аэрозолей – образование больших объемов жидких отходов (шлама). Поэтому, такой способ очистки следует применять, когда предусмотрены замкнутая система оборота воды и утилизация шлама и всех его компонентов. В противном случае, мокрые аппараты очистки газа, по существу, только несут загрязнения из выбросов газа в сточную воду, то есть, из загрязненной атмосферы в водоемы.

1.3.3 Электрофилтры

Данный способ пригоден для очистки газа от самых разнообразных аэрозолей – туманов агрессивных кислот, цемента, сажи и т.д. Он основан на применении процесса ионизации и зарядки аэрозольных частиц, когда газ проходит через интенсивное электромагнитное поле, которое создают коронирующие электроды. Частицы осаждаются на специальных заземленных элементах конструкции (электродах осаждения). Наиболее широко этот метод применяется для улавливания летучей золы и дымовых газов ТЭЦ. Начальная стоимость электрофилтров намного выше, чем у других аппаратов, однако эксплуатационные затраты намного ниже.

Электрофилтры, применяемые в промышленности, конструктивно исполнены в виде ряда заземленных труб или пластин, расположенных параллельно друг другу. Запыленный газ пропускается через эти поверхности (рисунок 1.6).

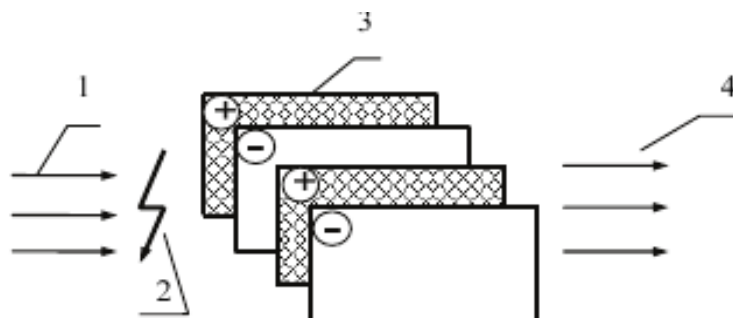


Рисунок 1.6 – Схема электрофилтра: 1 – запыленный газ; 2 – коронный разряд; 3 – пластины; 4 – очищенный газ

Между запыленными поверхностями находятся проволочные коронирующие электроды, на которые подается напряжение $\sim(25\div 100)$ кВ. Частицы пыли заряжаются в коронном заряде и, проходя через заряженные пластины, оседают на них. Пластинчатые электроды снабжены жалюзи, через которые пыль осаждается в бункер за счет периодического постукивания электромагнитными вибраторами. Электрофилтры могут работать в широком диапазоне температур от минус 70°C до плюс 1200°C . Общая эффективность электрофилтров обычно превышает 90 % и достигает 100 % при тщательной регулировке.

Электрофилтр не может быть использован для сбора частиц с очень высоким сопротивлением электричества. Кроме того, электрофилтры не применяют, если газ является взрывоопасной смесью или такая смесь может образоваться в ходе процесса, так как при работе электрофилтра неизбежно возникновение искровых разрядов.

К недостаткам данного метода относятся: существенный расход энергии, идущий на создание электромагнитного поля, значительные затраты средств на создание и поддержку очистных установок.

1.3.4 Фильтрация аэрозолей

Рассматриваемый способ очистки устроен на прохождении потока запыленного воздуха через систему фильтров (фильтрующих элементов). Механизмом в фильтрации частиц крупных размеров является зацепление частиц материалом фильтра и инерционное осаждение. Основную роль для фильтрации мелкодисперсных частиц играют зацепление, электрические эффекты и броуновская диффузия. Наиболее эффективна фильтрация для осаждения высокодисперсных аэрозолей. Грубые частицы желательно улавливать при помощи других методов, поскольку фильтры легко забиваются пылью. На практике используют волокнистые, масляные и тканевые фильтры.

Наиболее эффективными фильтрующими элементами являются волокнистые фильтры. Они изготовлены из волокнистых материалов по специальной технологии. На практике применяют следующие типы волокнистых фильтров: фильтрованная бумага; керамические волокна; гофрированный картон; спрессованная стекловата; электрически заряженные волокнистые материалы; маты, состоящие из равномерно распределенных волокон (базальт). Эффективность таких фильтров составляет 95 %-99 %.

Масляные фильтры представляют собой стеклянную или металлическую вату, которая уложена в рамки размером 50×50 см и глубиной 10 см. Для улавливания пылевых частиц вату пропитывают консистентной смазкой или маслом. Загрязненные фильтры промывают и повторно замасливают. Эффективность очистки масляными фильтрами достигает 85 % при улавливании частиц размером не менее 10 мкм. В случае очистки горячего воздуха, вслед за уходящим потоком могут уноситься брызги масла, за счет снижения вязкости масла.

Тканевые фильтры используются для фильтрации аэрозолей с низким значением концентрации пыли, при этом частая замена ткани не требуется. К этому классу, в основном, причисляются рукавные фильтры, которые соединены в батареи. Рукавные фильтры имеют длину 0,6-9,0 м и диаметр 125-450 мм.

Пылевые частицы, попадая внутрь рукава, оседают на его внутренней стороне. Через боковую поверхность рукава выходит очищенный воздух. Для изготовления тканевых фильтров в качестве материала используются хлопчатобумажные, синтетические и шерстяные ткани. Осадок пыли периодически удаляется из ткани обратным потоком воздуха из наружного продувочного кольца, автоматически перемещающегося по высоте рукава и выдувающего накопившуюся пыль.

Фильтрация – весьма распространенный прием тонкой очистки газов. Ее преимущества – высокая эффективность тонкой очистки и сравнительная низкая стоимость оборудования (за исключением металлокерамических фильтров). Недостатки фильтрации – высокое гидравлическое сопротивление и быстрое забивание фильтрующего материала пылью.

1.3.5 Акустическая коагуляция

Акустическая коагуляция аэрозолей является явлением, обусловленным активным воздействием ультразвука (звука) на вещество. Еще на ранних этапах изучения мощного ультразвука было обнаружено явление укрупнения мелких взвешенных в воздухе частиц под действием акустических колебаний [34]. В дальнейшем в Германии, СССР и Англии проводились исследования, направленные на выяснение природы этого эффекта. Были предложены различные гипотезы о механизме ультразвуковой коагуляции, но ни одна из них полностью не объяснила процесса. Проведенные теоретические исследования подтвердили интенсифицирующее воздействие звука на пылетуманоулавливание, и это стимулировало интерес к промышленному применению звуковой энергии. Подробное изложение содержания основных работ по выяснению механизма акустической коагуляции и практическому использованию коагуляции и осаждения аэрозолей содержится в книге Е.П. Медникова [35]. Другие работы В.И. Тимошенко, Н.Н. Чернова, и В.Н. Хмелева [36-40], более поздние по времени, тоже рассматривают эти вопросы.

Описанный в этой работе способ очистки заключается в увеличении размеров частиц аэрозоля, после чего их улавливание другими известными методами становится проще. Установки, направленные на создание условий для коагуляции или слияния частиц, состоят из источника акустических колебаний, камеры и седиментатора, в качестве которого можно взять циклон.

Звуковые волны создаются свистком Гартмана, источником возбуждений которого служит генератор высокой частоты; свисток состоит из магнитострикционного или электродинамического излучателя, или источника вида сирены. Генераторы типа сирены используются, преимущественно в промышленных условиях, там, где необходима мощность звука 10-50 кВт. В зависимости от размеров частиц требуется разная частота для коагуляции аэрозоля; она может меняться от $f = 20 \div 16000$ Гц (звук) до $f > 16000$ Гц (ультразвук). Наблюдается обратная зависимость между размерами частиц и эффективной для коагуляции частотой колебаний.

В любом случае, вероятность столкновения и коагуляции частиц зависит от расстояния, на котором они находятся друг от друга. Поэтому описанный метод применим лишь для очистки воздуха от аэрозолей с достаточно высокой концентрацией частиц (~ 2 г/м³), если идет речь о частицах диаметром 1-10 мкм.

На практике для осаждения туманов серной кислоты, сажи, золы и подобных аэрозолей применяют коагуляцию ультразвуком. После укрупнения мелких частиц они могут быть собраны с помощью циклона. Считается, что этот метод применим в том числе и для субмикронных частиц (диаметр менее 1 мкм), но в литературе нет упоминания о нижнем пределе (по диаметру) применимости метода. Метод работает в широком диапазоне температур вне зависимости от электрических свойств аэрозольных частиц (что, на наш взгляд, так же требует проверки).

1.3.5.1 Механизмы акустической коагуляции аэрозолей

Поведение взвешенных частиц в колеблющемся газе можно рассматривать

как результат действия следующих основных факторов: 1) увлечения частиц в колебательное движение газа, 2) гидродинамических сил притяжения и отталкивания между частицами и 3) радиационного давления звука [5].

Частица аэрозоля, взвешенная в газе, под действием линейных сил акустического поля увлекается в колебательное движение. Этот процесс зависит от свойств среды, плотности и диаметра частицы; она увлекается средой или полностью, или частично, а может оставаться неподвижной. Количественной величиной этого процесса примем коэффициент увлечения $k_{увл}$ – отношение амплитуды движения частицы к амплитуде колебаний среды [41].

Брандт, Фройнд и Хидеман [42] получили более наглядную формулу для коэффициента увлечения частицы средой. При этом они считали, что между взвешенной частицей и колеблющейся средой действует сила Стокса. Уравнение движения аэрозольной частицы запишется в виде:

$$k_{увл} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad (1.1)$$

где $\tau = (2/9)(\rho_p r^2 / \eta)$ – время стоксовой релаксации частицы, η – динамический коэффициент вязкости среды, r – радиус частицы, ρ_p – ее плотность. Из анализа выражения (1.1) следует, что амплитуда движения частицы тем значительно отличается от амплитуды колебания частиц газа, чем больше радиус и плотность частицы аэрозоля, а также чем больше частота акустических колебаний и меньше вязкость среды.

Осеен [43] получил поправку к коэффициенту увлечения для чисел Рейнольдса $Re = dV/\nu > 1$, где V – скорость движения среды относительно частицы, ν – кинематическая вязкость:

$$k_{увл} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \tau}{1 + 3/8 Re} \right)^2}}. \quad (1.2)$$

В выражении (1.2) степень увлечения зависит от амплитуды звукового давления – она растет с увеличением амплитуды.

Частицы с разным диаметром увлекаются колебательным движением среды по-разному; на этом основана ортокинетическая гипотеза коагуляции аэрозольных частиц в звуковом поле [44]: звуковая коагуляция является результатом столкновения частиц небольших размеров, колеблющихся с большой амплитудой, и частиц больших размеров, имеющих малую амплитуду колебаний.

Даже при очень значительных величинах интенсивности звука и концентрации аэрозоля разница в амплитудах смещения частиц не больше, чем расстояние между их центрами, как следует из оценки амплитуд колебания частиц.

Пшенай-Северин [41] предложил, по-видимому, наиболее перспективный подход к описанию гидродинамического взаимодействия частиц в акустическом поле. Это направление было развито в работах Тимошенко В.И. [45] с учетом гидродинамических сил. Осеен [46] рассмотрел поле скорости около движущегося в среде шара, которое характеризуется сильной асимметрией: перед шаром скорость убывает обратно пропорционально радиусу частицы в квадрате, а позади шара – обратно пропорционально радиусу в первой степени. Из-за этого сопротивление будет уменьшаться не так значительно для «передней» частицы, чем для «хвостовой». Вследствие этой разницы уменьшения сопротивления происходит некоторая сила притяжения между отдельными частицами. Существует оптимальное значение частоты акустического поля для каждого радиуса шара [45], при котором частицы сближаются с максимальной скоростью.

Объяснить ускорение коагуляции монодисперсных аэрозолей в акустическом поле возможно только с привлечением механизма гидродинамического взаимодействия.

В работе [45] рассмотрена задача о сближении разных по диаметру частиц. При этом считается, что режим обтекания Осеена наступает не сразу, а после достижения критического значения скорости обтекания, которому соответствует значение критического числа Рейнольдса, соответствующего единице. До этого момента происходит стоксовское взаимодействие частиц. А значит, перед началом взаимодействия частицы уже обладают некоторой скоростью

относительного движения. Из этой работы можно сделать следующие выводы: две неодинаковые по размеру частицы сближаются на максимальное расстояние, на один-два порядка большее, чем две одинаковые, а зона частот этого взаимодействия шире. При увеличении интенсивности звукового поля и различия в размерах частиц растет величина сближения и расширяется зона максимального взаимодействия между ними; максимум сближения смещается в зону с более низкими частотами. С учетом изменения расстояния между аэрозольными частицами в процессе их взаимодействия показано, что при частотах акустического поля от десятков Гц до десятков кГц расстояния взаимного сближения частиц за период равны расстоянию между ними.

Подольский А.А. и Турубаров В.И. [47, 48] в своих работах внесли уточнения в решение этой задачи при двух режимах (стоксовском и осееновском) обтекания. В расчет ввели изменение расстояния между аэрозольными частицами, возникающее из-за различия параметров колебаний этих частиц. Для режима стоксова обтекания рассмотрели случай произвольного расположения центров частиц относительно вектора колебаний. Было показано, что взаимодействие частиц по Стоксу существенно лишь для выбора оптимальной частоты акустического поля и только при достаточно небольших расстояниях между частицами, если они отличаются в размерах.

Скорость сближения, как было показано, растет при увеличении частоты, приближаясь, асимптотически, к предельному постоянному значению. При увеличении диаметров частиц также растет скорость их сближения.

Время сближения частиц с расстояний, порядка сотен диаметров при амплитуде колебаний около двух метров в секунду и частоте звука около одного килогерца, по оценкам, составит десятые и сотые доли секунды. Из этого следует, что осееновский механизм гидродинамического взаимодействия частиц предсказывает быстрое сближение частиц в акустическом поле. Это может оказаться важным фактором звуковой коагуляции аэрозолей.

В работах Подольского А.А., в отличие от рассмотренных выше исследований, получена слабая зависимость эффективности взаимодействия

частиц от частоты для широкого диапазона частот. Поэтому из этих работ следует отсутствие ограничений в выборе частоты облучателей.

Другой механизм воздействия ультразвука на аэрозоль – это радиационное давление звука. Как отмечается в [49], в акустическом поле с плоской стационарной волной сферическая частица, взвешенная в газе, испытывает действие некоторой периодической силы, источником которой является радиационное давление звука. Эта сила заставляет частицу двигаться в направлении к пучностям волн, то есть туда, где расположены колебания с максимальной амплитудой.

Основываясь на этом, в работе Сен-Клера [43] была предложена радиационная гипотеза коагуляции. Согласно этой гипотезе основная роль в процессе отводится радиационному давлению, под действием которого происходит движение частиц к пучности колебаний. Здесь благодаря локальному повышению концентрации частиц происходит интенсивное их слияние за счет гидродинамического сближения и ортокинетиических соударений. Как показал расчет, время, требуемое для перемещения частиц в пучность волны в используемом при коагуляции диапазоне частот звука, значительно больше времени озвучивания, достаточного для коагуляции. Радиационное давление играет некоторую роль на конечных стадиях процесса, когда частицы существенно увеличили свои размеры. Однако с помощью данного механизма совершенно невозможно удовлетворительно объяснить процесс акустической коагуляции [50].

Скорость движения частиц к пучностям под влиянием радиационного давления резко растет по мере укрупнения частиц в процессе коагуляции. Отсюда следует, что ультразвуковое давление, действительно, способствует коагуляции аэрозолей путем подвода частиц к пучностям волны, где силы гидродинамического взаимодействия между частицами становятся особенно большими и создаются высокие концентрации частиц.

При рассмотрении различных гипотез о природе звуковой коагуляции можно сделать вывод, что ни одна из них не объясняет наблюдаемых эффектов

полностью. Гипотезы предсказывают сближение частиц за счет тех или других явлений, но не объясняют сам процесс агрегации частиц. Большинство высказанных гипотез объясняет явление только для полидисперсных аэрозолей, что является их недостатком. Возможно, больше всего физических аргументов имеется в пользу теории акустической коагуляции, основанной на влиянии сил гидродинамического взаимодействия между частицами, но такая теория сталкивается с большими математическими трудностями, не позволяющими получить точное решение этой задачи.

1.3.5.2 Влияние аэрозольных и акустических характеристик на кинетику процесса

Рассмотрим важный вопрос о влиянии частоты ультразвука на его эффективность. При некоторой заданной частоте акустического поля степень увлечения частицы средой можно считать константой, и только энергия акустического поля, пропорциональная квадрату скорости колебаний, определяет эффект [51]. Меняя частоту поля, мы меняем степень увлечения частицы средой. Влияние частоты на коэффициент увлечения нелинейно: вначале с ростом частоты коэффициент увлечения резко возрастает, а затем (при частотах, когда скорости колебаний частицы и среды примерно равны, то есть, при $\omega^2 r \sim 0,002 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{ц}^2$, дальнейший рост частоты не приводит к увеличению коэффициента увлечения, и поэтому практически нецелесообразен. Такие же выводы о влиянии частоты акустического поля на коагуляцию аэрозолей были сделаны в работах [47,49].

В работе [36] проведено математическое моделирование ультразвуковой коагуляции частиц на основе модели гидродинамического взаимодействия частиц с учетом вязкости среды. Полученные численные результаты подтвердили это положение (рисунок 1.7). В этой работе также показано, что оптимальная частота воздействия несколько возрастает с ростом звукового давления. Для относительно крупных частиц (диаметр больше 18 мкм) оптимальная частота воздействия находится в звуковом диапазоне.

Противоречивые и неоднозначные экспериментальные результаты влияния частоты акустического поля на скорость коагуляции аэрозолей получены в других работах. Например, в [37-39, 52] даже для высокодисперсных аэрозолей предлагается использовать источники низкочастотного излучения – от 150 Гц до 4 кГц. Эти данные противоречат тем, которые приведены в фундаментальном труде [3] и в [36, 40, 51, 53], где показано, что для осаждения высокодисперсных аэрозолей требуется достаточно высокие частоты ультразвука, при которых коагуляция происходит быстрее. Вероятно, множество работ, в которых приводятся результаты осаждения аэрозолей при низких акустических частотах, связано с надежностью, простотой и доступностью используемых звуковых источников колебаний, что имеет значение на практике.

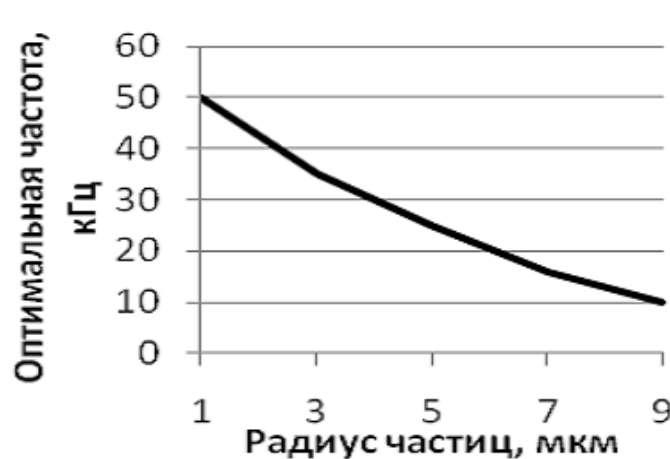


Рисунок 1.7 – Оптимальная частота коагуляции в зависимости от радиуса частиц

Мощность ультразвука влияет на скорость акустического осаждения, по данным, практически, всех работ в соответствии с простой линейной зависимостью: с повышением уровня звукового давления повышается скорость коагуляции. Но следует учесть, что крупные агрегаты частиц (около 100 мкм) можно создать только, если использовать колебания не слишком большой интенсивности [43]. Дело в том, что в интенсивном звуковом поле развивается турбулентность, что ведет к разрывам крупных агрегатов на части. Образованные при акустической коагуляции агрегаты, вообще, обладают невысокой

прочностью, и они часто разрушаются при осаждении. В частности, именно этим объясняется невысокая эффективность ультразвука в процессе осаждения золы [3].

В работах [3, 43] имеются данные о том, что при добавлении к дыму или пыли водных или масляных аэрозолей ведет к склеиванию частиц и значительно повышает эффективность воздействия. Но, несмотря на возможную перспективность добавления дополнительной дисперсной фазы в части ускорения ультразвуковой коагуляции, в литературе упоминания о влиянии этих добавок встречаются очень редко.

Во всех работах отмечается, что с понижением концентрации частиц аэрозолей эффективность акустической коагуляции снижается. Этот вывод полностью соответствует теоретическим представлениям о явлении, так как вероятность столкновений частиц повышается с повышением концентрации.

Приведенные в литературе эксперименты проводились в разных объемах, и это делает сравнение экспериментальных данных затруднительным. Очевидно, время коагуляции и осаждения тем больше, чем больше исследуемый объем облака аэрозоля.

Обычно, вне зависимости от ведущего механизма воздействия, считается, что звуковое поле ведет именно к сближению частиц, к увеличению количества столкновений между частицами [54]. В результате могут образоваться агрегаты двух типов. В первом случае определяющими эффектами при слипании являются молекулярные силы на поверхности частицы, которые влияют на прочность полученных агрегатов. В работе [43] наблюдался другой тип агрегатов, где частицы не соприкасаются, но находятся в непосредственной близости, поддерживаемые исключительно акустическим полем. Как только поле перестает действовать, они разрушаются.

В обоих случаях можно предположить, что образованию и поддержанию агрегатов будет способствовать дополнительная дисперсная фаза (в самом простом случае водный аэрозоль), что приведет к повышению поверхностной активности осаждаемого аэрозоля.

1.3.6 Проблемы существующего оборудования для улавливания аэрозолей различных веществ. Предлагаемый способ осаждения

Недостатки устройств, используемых для пылеулавливания и очистки газов, как показал проведенный анализ оборудования, связаны с невысокой эффективностью физических эффектов, лежащих в их основе.

Повышение экономичности процесса очистки является одной из важных проблем техники пылеулавливания. Как известно, современные системы, применяемые для очистки от пыли газов являются довольно сложными сооружениями, которые состоят из комплекса как, собственно, газоочистительных, так и дополнительных аппаратов (вентиляторы, электродвигатели, насосы) различных типов. Для установки необходимого вспомогательного оборудования требуются дополнительные площади, что приводит к росту затрат средств по организации монтажа оборудования и его эксплуатации.

Чаще всего на практике встречаются задачи по очистке промышленных газов, в связи с чем необходимо решить проблемы улавливания частиц высокой дисперсности и осаждения «полезной» пыли (используемой в дальнейшем) или готового продукта. Такая задача по сбору «полезной» пыли или готового продукта из газов часто встречается на промышленных производствах, например, в пищевой промышленности, при производстве кремния, технического углерода. Традиционные способы пылеулавливания не позволяют просто решить указанную задачу. Мокрый способ пылеулавливания невозможно использовать для этих целей из-за того, что при этом могут измениться физические свойства пыли, что недопустимо. Электрофилтры избирательны в отношении физико-химических свойств извлекаемых частиц (они должны обладать низким удельным электрическим сопротивлением), поэтому их использование в данных целях ограничено.

Мелкие частицы особенно опасны из-за их способности глубоко проникать в дыхательную систему человека, а проблема очистки промышленных газов от таких частиц весьма серьезна.

Такая задача особенно остро стоит для предприятий химической, горной, пищевой отраслей промышленности. Используемые сегодня средства пылеулавливания не обеспечивают высокой степени очистки газов от частиц с характерным размером около микрометра и меньше, так как в этих установках степень эффективности уменьшается с увеличением дисперсности пыли.

Решить проблему увеличения степени улавливания частиц в промышленных газах можно двумя способами: либо улучшать традиционные установки пылеулавливания, либо искать новые направления по усовершенствованию самой техники пылеулавливания, используя новые физические механизмы повышения эффективности очистки.

Первый путь – совершенствования уже существующих аппаратов для получения дополнительного прироста повышения эффективности – либо очень сложен, либо совсем невозможен. Поэтому наиболее разумный способ роста степени очистки газов от частиц пыли – это второй путь. Применение энергии акустических колебаний – это один из возможных вариантов использования нового физического механизма повышения степени очистки.

Осаждение с помощью ультразвука дает следующие преимущества:

- возможно применение в агрессивных газовых средах
- осаждение мелкодисперсных аэрозолей;
- работа при относительно высоких давлениях и температурах;
- возможность установки оборудования в аспирационную шахту;
- высокая скорость обработки больших объемов вредных выбросов.

Итак, один из перспективных способов повышения эффективности очистки – это применение ультразвукового излучения высокой частоты и интенсивности [36].

В настоящей работе предлагается усовершенствованный метод ультразвуковой коагуляции, заключающийся в том, что в существующую

дисперсную среду вводится дополнительная дисперсная фаза (жидкокапельный аэрозоль), которая, как будет показано ниже, способствует ускорению процессов коагуляции и осаждения вредных выбросов.

Выводы по первой главе

1. Рассмотрены наиболее распространенные источники промышленных загрязнений воздуха аэрозолями. Обоснована необходимость улавливания вредных выбросов на производстве. Показано, что наибольшую сложность представляет осаждение аэрозолей с характерным размером частиц, порядка 10-15 мкм и менее.

2. Установлено, что для безопасности жизнеобеспечения на производственных предприятиях при наличии аэрозольных образований требуются разработки специальных технологических способов их нейтрализации, среди которых способы осаждения аэрозолей играют главную роль.

3. Обзор и анализ литературных данных показал, что из существующих способов осаждения аэрозолей наиболее перспективными являются ультразвуковой и акустический, поскольку они обладают рядом преимуществ: осаждение мелкодисперсных аэрозолей, возможность работы при высоких давлениях и температурах, в агрессивных средах, компактность аппаратуры и т.д.

4. Предложен новый метод для повышения эффективности процесса осаждения вредных аэрозольных образований: распыление нейтрализующего жидкокапельного аэрозоля в дополнение к воздействию акустического поля.

2 Выбор методов распыления дополнительной дисперсной фазы и акустического воздействия

2.1 Акустические излучатели

Рассмотрим предлагаемые в настоящее время конструкции источников акустических колебаний, применяемых для ускорения различных процессов. Классификация таких излучателей представлена на рисунке 2.1 [36].

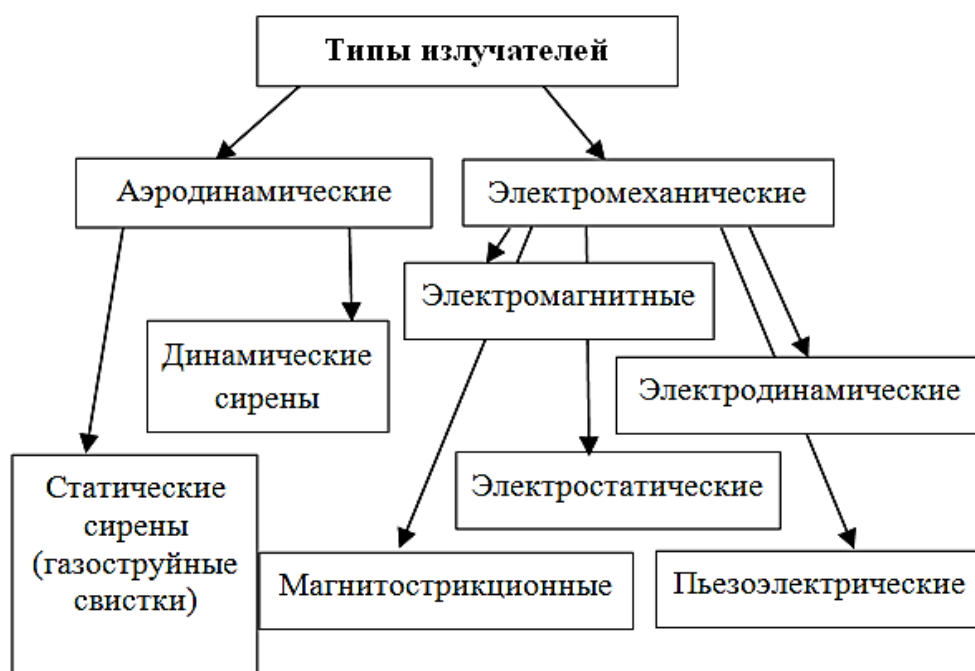


Рисунок 2.1 – Классификация ультразвуковых излучателей для газовых сред

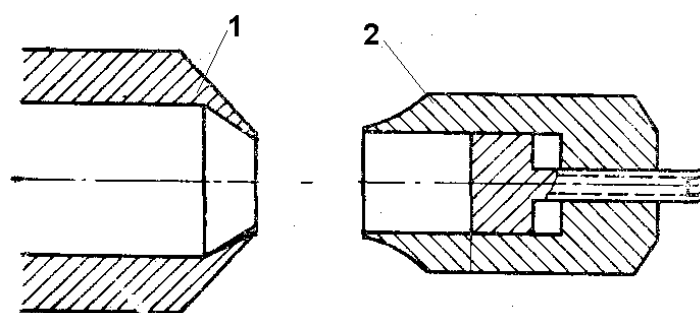
Рассмотрим акустические излучатели более подробно.

2.1.1 Аэродинамические излучатели

В аэродинамических источниках кинетическая энергия потока газа преобразуется в энергию упругих колебаний ультразвуковой частоты. Излучатели обладают небольшими размерами и несложны в изготовлении. Наиболее распространенными среди аэродинамических преобразователей в практике являются динамические сирены и статические сирены (газоструйные свистки).

2.1.1.1 Статические сирены

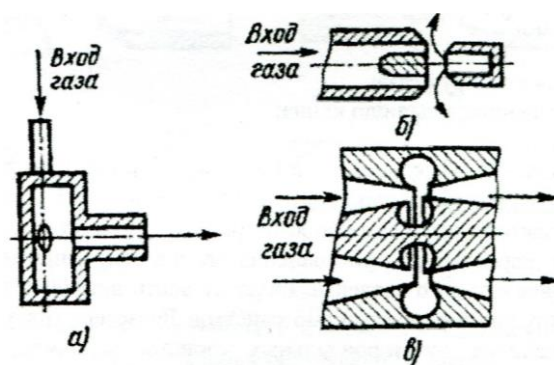
Статические сирены (газоструйные свистки) устроены следующим образом: газ вытекает из сопла 1 со сверхзвуковой скоростью, заполняет периодически резонатор 2, после чего струя газа из резонатора встречается со струей газа из сопла. Образующийся при этом скачок уплотнения, осциллируя, создает звук. Конструкция простейшего газоструйного свистка схематично показана на рисунке 2.2. Эта конструкция предложена Гартманом и состоит из резонатора, сопла и устройства для регулировки резонаторного объема [55, 56].



1 – сопло; 2 – резонатор

Рисунок 2.2 – Принципиальная схема газоструйного свистка Гартмана

Генерация колебаний в газоструйных свистках определяется малоустойчивостью струи в случае перемены условий истечения самой струи. Свистки можно подразделить на ряд типов, исходя из их конструкции. На рисунке 2.3 представлены схематические изображения некоторых свистков.



а) – вихревой свисток; б) – свисток Гальтона; в) – свисток Левассера

Рисунок 2.3 – Схема конструкции газоструйных излучателей-генераторов

В вихревом свистке (рисунок 2.3 а) струя газа вводится тангенциально в цилиндрический объем, в котором закручивается поток, поступая в выходную трубку, осесимметричную камеру [56]. Вихревые свистки конструктивно просты: при частоте излучения $f < 30$ кГц мощность не больше нескольких ватт, КПД вихревых свистков достигает 28 %.

Свисток Гальтона (рисунок 2.3 б) состоит из сопла в виде узкой кольцевой щели и резонатора в форме цилиндра с острыми кромками, которые направлены к соплу, и сплошным дном. Такие свистки, работая на воздухе, при КПД до 15 %-25 % и максимальной частоте $f < 20$ кГц обладают мощностью в несколько ватт.

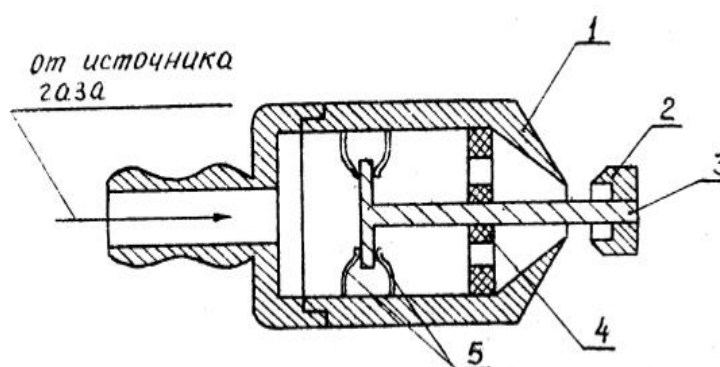
Свисток Левассера (рисунок 2.3 в) отличается наличием двух торовидных резонаторных камер, поочередно расположенных после окружной щели. После обтекания главного резонатора поток попадает во второстепенную резонаторную камеру. Второстепенный резонатор обеспечивает возрастание амплитуды, значит, излучаемой мощности (мощность звука может составлять 260 Вт при КПД 21 %).

На практике применяют свистки наибольшего давления, вида генератора Гартмана. Конструктивно выполнен он довольно просто: сопло в форме конуса, соосно соединенное с резонатором в форме цилиндра. Конструкция подобна конструкции свистка Гальтона, только механизм излучения в свистке Гальтона хорошо отличается от генератора Гартмана. Излучатель начинает свою работу при критическом давлении в сопле, составляющем для воздуха $p_{1кр}=1,88 \cdot p_0$ (p_0 – атмосферное давление). При этом поток начинает движение за пределами сопла со сверхзвуковой скоростью. При взаимодействии с поверхностью струи, возникшие на срезе сопла, возмущения формируют ячеистый поток, который характеризуется периодичным распределением давлений по всей оси струи. Так как впоследствии турбулизация струи разрушает картину, более четко пульсирующая направленность струи выявляется в первых ячейках.

Генераторы Гартмана обладают значительно большей мощностью излучения и низким КПД – не более 6 %, в сравнении со свистками. Низкий КПД объясняется необратимыми потерями энергии в процессе образования резкого скачка уплотнения. Для повышения КПД излучателя применяют

модифицирование генератора Гартмана, которое отличается кривым скачком уплотнения. Вдоль оси потока присоединяют рассекатель, который изменяет граничные условия на оси, а также угол между осью струи и плоскостью скачка давления. В итоге при интенсивности в несколько десятков ватт на квадратный сантиметр КПД излучателей Гартмана приближается к КПД свистков Гальтона, то есть составляет 18 %-25 %.

Существуют специализированные газоструйные излучатели (рисунки 2.4, 2.5) [57-59].



1 – сопло излучателя; 2 – резонатор излучателя; 3 – стержень;
4 – мембрана; 5 – гибкое крепление

Рисунок 2.4 – Газоструйный излучатель с изменяемой рабочей частотой колебаний

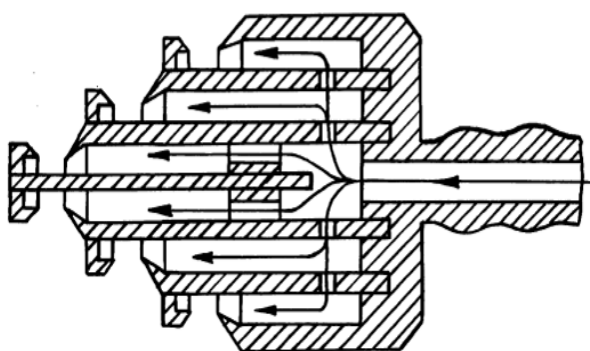


Рисунок 2.5 – Конструкция и фотография газоструйного широкополосного излучателя

Газоструйные излучатели, представленные на рисунках 2.4, 2.5 способны генерировать УЗ-колебания в широком диапазоне частот.

2.1.1.2 Динамические сирены

Работа динамических сирен основана на принципе прерывания потока сжатого воздуха [56, 60, 61]. Продувка воздуха происходит сквозь ряд отверстий, расположенных напротив друг друга по окружности двух дисков, расположенных соосно – неподвижного статора и вращающегося ротора. Струя воздуха, таким образом, прерывается с помощью перемычек между отверстиями на роторе, надвигающимися на отверстия статора. Переменное сопротивление на пути воздушной струи создаются периодическими закрытиями и открытиями этих отверстий. Когда отверстие полностью открыто, это сопротивление минимально, при закрытом отверстии – максимально. Периодическое изменение сопротивления приводит к периодическому разряжению и сжатию воздуха – к образованию упругих колебаний. Внешне ультразвуковая динамическая сирена выглядит, как показано на рисунке 2.6 [62].



Рисунок 2.6 – Ультразвуковая сирена (внешний вид)

Известны две разновидности динамических сирен – аксиального и радиального типа. У сирен первого типа отверстия расположены, по осям, параллельно расположению оси сирены. Звук при этом направлен прямо в камеру озвучивания. Оси отверстий сирен второго типа расположены перпендикулярно

оси сирены. При этом звук направлен в камеру озвучивания при помощи специального отражателя. Аксиальный тип сирен часто применяется для обработки не очень больших объемов, что позволяет уменьшить размеры установки.

Динамические сирены характеризуются следующими величинами максимальной интенсивности излучения: 1 МВт/м^2 (100 Вт/см^2) для КПД до 20 %; при этом частота колебаний составляет 200 кГц и далее до 1 МГц, акустическая мощность достигает 35 кВт.

Аэродинамические излучатели обладают следующими недостатками:

- необходимо использование большого объема сжатого воздуха, который можно подвести только с помощью специальной пневматической сети или компрессора;
- относительно большие габариты;
- невысокий КПД, достигающий, в лучшем случае, 39 %, а чаще КПД не превышает 20 %;
- износ механических узлов, необходимость частой замены частей;
- требование защиты обслуживающего персонала от мощного акустического излучения.

Применение ультразвуковых излучателей ограничивают указанные недостатки. Они являются принципиально присущими описанному типу излучателей, поэтому не могут быть исключены дальнейшим улучшением конструкции газоструйных свистков и динамических сирен.

Использование электромеханических преобразователей, то есть, устройств, которые превращают электрическую энергию в энергию колебаний твердого тела, преобразуемую в дальнейшем в энергию акустических колебаний, является естественной альтернативой описанному выше аэродинамическому методу генерации ультразвука.

2.1.2 Электромеханические излучатели

Устройство преобразования энергии электрических колебаний в энергию механических колебаний называется электромеханическим излучателем (преобразователем).

Исходя из физической природы эффекта преобразования электромеханические излучатели делят на разные классы: электродинамические, электромагнитные, пьезоэлектрические, электростатические и магнитострикционные [63, 64].

Работа электромагнитных излучателей основана на принципе получения колебаний подвижной механической системы при воздействии электромагнита переменного тока. Возбуждение колебаний в электродинамическом источнике происходит из-за взаимодействия магнитного поля постоянного неподвижного магнита с катушкой, в которой течет ток. Акустические колебания в электростатическом источнике получают от взаимодействия мембраны с электрополем, создаваемым статором – металлическим листом с отверстиями (или натянутой проволокой).

Работа магнитострикционного преобразователя основана на принципе возбуждения колебаний из-за изменений геометрического размера стержня (пакета) из магнитострикционного материала, который помещен в переменное магнитное поле.

Генерация колебаний в пьезоэлектрическом источнике происходит за счет изменения размеров элемента, который обладает пьезоэлектрическими свойствами, под действием электрического поля. Пьезоэлектрические излучатели характеризуются более высоким КПД по электроакустике (55 %-60 %) по сравнению с магнитострикционными (КПД не более 35 % [54]).

В настоящее время электростатические и электродинамические источники широко распространены в бытовых акустических устройствах, предназначенных для генерации колебаний с частотами в пределах слышимости ухом. В ультразвуковой технике эти типы излучателей затруднительно использовать из-за

значительного падения интенсивности колебаний с повышением частоты звуковой волны в ультразвуковой области частот. Электромагнитные излучатели обладают тем же недостатком. Поэтому наибольшее распространение в УЗ-технологии получили пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели, поскольку они позволяют довольно эффективно излучать и преобразовывать в нагрузку энергию. Далее эти классы излучателей рассмотрены более подробно.

2.1.2.1 Электромеханические преобразователи с магнитострикционным активным элементом

Магнитострикционные излучатели – электромеханические преобразователи, как правило, состоящие из трех основных частей: активного элемента (собственно, магнитострикционного преобразователя) и пассивного элемента (акустического трансформатора упругих колебаний) и согласующих устройств [50]. Часто активный элемент излучателя используется непосредственно как источник УЗ-колебаний. Вторая часть излучателя – пассивный элемент выполняет различные вспомогательные функции технологического и конструкционного характера. Однако основное назначение пассивного элемента – передача в обрабатываемую среду упругих колебаний, создаваемых активным элементом.

Не вдаваясь в подробности конструкций, отметим, что магнитострикционные излучатели чаще всего имеют вид стержней, сплошных или полых, с обмоткой, обтекаемой переменным током нужной частоты. Для получения сильных магнитных полей, следовательно, и больших излучаемых мощностей нужен значительный ток при сравнительно малом напряжении. Часто для уменьшения потерь тело самого стержня набирается из тонких изолированных друг от друга пластин, подобно тому, как это делается в обычных трансформаторах [65].

Магнитострикционные излучатели обладают низким КПД, до 40 %, что является их очевидным недостатком. Это приводит к тому, что свободная энергия действует, собственно, на преобразователь, что приводит к повышению уровня паразитного шума. Помимо этого, излучатели магнитострикционного типа обладают малой частотой колебаний – от 2 до 20 кГц – и не вполне стабильной частотой колебаний. Их нецелесообразно изготавливать для получения более высоких частот, поскольку при повышении частоты колебаний существенно уменьшается длина стержня, что ведет к конструкционным трудностям. Другой недостаток излучателей такого типа – это сильный разогрев при работе в результате вихревых токов; для компенсации разогрева активного элемента магнитострикторов нужно использовать охлаждение с помощью жидкости – масляное или водное.

Для сравнения отметим, что для компенсации нагрева активного элемента пьезоэлектрических излучателей используется воздушное охлаждение, если это необходимо.

Так как упомянутые типы преобразователей обладают рядом недостатков, от которых свободны только пьезоэлектрики, далее подробнее рассмотрим только их.

2.1.2.2 Электромеханические преобразователи с пьезоэлектрическим активным элементом

Электромеханической преобразователь, состоящий из элемента, который обладает пьезоэлектрическими свойствами (способностью менять размеры под действием электрического поля – обратный пьезоэффект), называется пьезоэлектрическим излучателем. Такие излучатели обычно применяют в диапазоне акустических частот до десяти мегагерц.

Искусственные пьезокерамические материалы получили самое большое распространение в промышленности из-за их относительно небольшой стоимости, возможности легко изготовить из них пьезоэлементов различных форм,

разработки фокусирующих акустических излучателей. Современные пьезоизлучатели изготавливаются в различных формах, размерах и типах (рисунок 2.7) [66, 67].



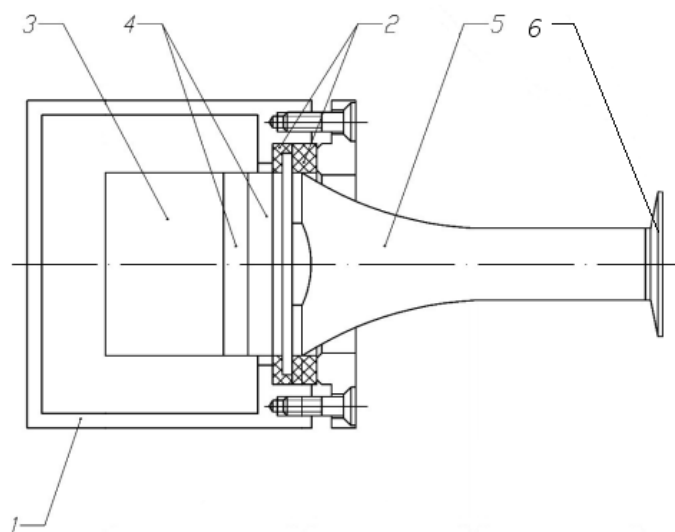
Рисунок 2.7 – Различные формы пьезоэлектрических излучателей

Пьезоэлектрическая пластинка будет осуществлять механические колебания, если к ее граням приложить непостоянное электрическое напряжение большой частоты, вслед за изменением электрического напряжения. Стороны пластины двигаются относительно друг друга, а в случае соприкосновения с другой средой, в которой могут действовать УЗ-волны, пластинка станет излучать ультразвук в эту среду. При совпадении собственной частоты колебаний пьезоэлемента с частотой переменного электрического поля создается наилучший эффект – это момент резонанса. Но даже в этом случае пьезопластина колеблется с амплитудой, не более 5-6 мкм. В случае колебаний такой амплитуды твердотельные излучающие элементы не обеспечивают нужного акустического воздействия.

Для увеличения амплитуды колебаний излучающего элемента пьезоэлектрического преобразователя простое увеличение диаметра пластины преобразователя не дает нужного эффекта, поскольку в этом случае сопротивление излучения, приведенное к электрической стороне, падает. Это затрудняет согласование пластины с генератором, что, в конце концов, ведет к потерям излучаемой мощности. Для компенсации этого эффекта применяют концентраторы, которые входят в состав ультразвуковой системы колебаний – это резонансные трансформаторы перемещения (скорости).

Ультразвуковая колебательная система (УЗКС) – это устройство, обеспечивающее изменение энергии электрических колебаний, которые поступают от

генератора, в упругие УЗ-колебания резонансной системы и введение созданных колебаний в обрабатываемые технологические среды (рисунок 2.8). УЗКС считается основным узлом каждого технологического аппарата: обеспечивает формирование и усиление УЗ-колебаний до величин, которые необходимы для реализации разных процессов с помощью резонансных концентраторов; обеспечивает ввод усиленных ультразвуковых колебаний в технологические среды через рабочие приборы, отличающиеся по форме и площади поверхности излучения [59].



1 – корпус; 2 – опора; 3 – отражающая накладка; 4 – пьезокерамический элемент; 5 – трансформатор колебательной скорости; 6 – рабочий инструмент

Рисунок 2.8 – Ультразвуковая колебательная система

Для случая технологического назначения УЗКС состоит из согласующего элемента, преобразователя, рабочего инструмента с излучающей поверхностью. В преобразователе (активный элемент ультразвуковой колебательной системы) формируется знакопеременная механическая сила. Согласующий пассивный элемент системы реализовывает соотношение сопротивления внешней механической нагрузки и внутреннего сопротивления колебательного элемента, а также трансформацию скоростей. Рабочий инструмент формирует ультразвуковое поле в рассматриваемом объекте или напрямую на него воздействует. Обычно коэффициент усиления концентратора, который можно определить как

отношение амплитуды продольных колебаний рабочего элемента к амплитуде колебаний пьезопластины, составляет 10-15 [68].

Для обеспечения протекания процессов в газах с нужной эффективностью недостаточно имеющейся амплитуды колебаний излучательного элемента твердотельного типа, которая получается при усилении колебаний пьезопластины с помощью концентратора. Эта амплитуда составляет, примерно, 50-70 мкм. Значительное отличие волнового сопротивления воздуха и металлов не дает возможности создавать в воздушной среде сферические или плоские волны с интенсивностью звука выше 130-140 дБ.

Пьезоэлектрические преобразователи, несмотря на существующие конструктивные недостатки, считаются наиболее перспективными в новых разработках технологических аппаратов ультразвукового типа. Имеются основания отказаться от дальнейшего совершенствования технологических схем с использованием динамических и статических сирен и магнитострикторов:

- невысокий КПД, требования по защите персонала от ультразвукового и звукового излучения широкого спектра – это существенные недостатки, принципиально не устранимые для динамических и статических сирен и их невозможно устранить улучшением конструктивной схемы;
- слишком маленький размер выходного отверстия газоструйных свистков, который требуется для создания высокочастотного акустического излучения, что не позволяет задать нужную интенсивность излучения;
- значительные конструкционные трудности при создании преобразователей магнитострикционного типа для генерации акустических волн с частотой выше 20 кГц, когда требуется слишком малая длина стержня;
- пьезоэлектрические преобразователи при использовании в их конструкции современных материалов имеют весьма высокий КПД – до 90 %.

2.2 Классификация способов распыления жидкостей

Для решения поставленной в работе задачи предложен способ

предварительного распыления нейтрализующего жидкокапельного аэрозоля. Поэтому для проведения экспериментальных исследований важно определиться с выбором распылительного устройства.

Для получения облака капель используются следующие основные методы непрерывного диспергирования жидкостей.

2.2.1 Гидравлическое распыление

Основным энергетическим фактором, который приводит к распадению жидкости на капли, считается давление нагнетания. Поток жидкости, проходя через распыляющее устройство, приобретает достаточно высокую скорость и преобразуется в форму, которая способствует эффективному и быстрому распаду (крупные частицы, пленка, струя – в зависимости от того, к какому классу принадлежит распылитель).

Наиболее удачным распылителем гидравлического типа является центробежная форсунка, широко используемая в разных областях техники и технологий для тонкого распыления жидкостей. Однако создаваемый распыл довольно неоднородный и грубый, затруднены регулирование расхода для заданного качества дробления, а также распыление высоковязких жидкостей. Гидравлическое распыление, несмотря на ряд недостатков, широко распространено вследствие относительной простоты способа [69].

2.2.2 Механическое распыление

В механическом распылении жидкость приобретает энергию благодаря трению о быстровращающийся рабочий элемент. Одновременно с рабочим элементом, приобретая вращательное движение, жидкость под действием центробежных сил, срываясь с распылителя (в виде струй или пленок), дробится на капли. Распыл, получаемый при этом, характеризуется более высокой монодисперсностью, чем при гидравлическом распылении.

При механическом распылении, также как и при гидравлическом, дроблению подвергается струя или пленка жидкости, исходя из устройства распыляемого механизма (конус, стакан, диск, и т. д.). Дробление жидкости в этом случае зависит существенно от ее расхода. Если расход жидкости маленький, то на кромке вращающегося диска появляется жидкий тор, который деформируется под действием центробежных сил. Вследствие чего возникают шаровидные узлы, которые отрываются в виде капель. В случае увеличения расхода жидкости узлы вытягиваются в тонкие нити и струи, число которых возрастает, достигая постоянной величины. В процессе увеличения расхода – всю жидкость из тора нити пропустить не могут; тор, сбрасываясь с кромки, образует пленку, которая тянется, при этом распадаясь на крупные капли и нити [69].

К достоинствам механического распыления следует отнести возможность распыления загрязненных и высоковязких сред, управление производительностью диспергатора без заметного изменения размеров капель.

К недостаткам способа можно причислить сложность в эксплуатации и изготовлении, энергоемкость, высокая стоимость вращающихся распылителей, и, кроме того, обладание вентиляционным эффектом. Главным образом, механическое распыление используют для дробления суспензий и вязких жидкостей [69].

2.2.3 Электростатическое распыление

В рассматриваемом способе распыления электростатический заряд сообщают жидкости до ее истечения (или в момент ее истечения). Под воздействием сил кулоновского взаимодействия пленка (струя) жидкости разделяется на частицы таких размеров, при которых силы их взаимного отталкивания становятся равными за счет сил поверхностного натяжения. Также жидкость можно подавать в область мощного электростатического поля, при этом осуществляется распределение давления по поверхности распыляемой среды, что вызывает изменение формы струи и распад ее на капли [70].

Недостатки рассматриваемого метода распыления жидкостей: необходимость в дорогом оборудовании, малая производительность, сложность обслуживания, высокая энергоемкость оборудования. Его применяют при окраске и в определенных распылительных сушилках.

2.2.4 Пневматическое распыление

При таком способе распыления к жидкости подводится энергия, главным образом, вследствие динамического взаимодействия ее с высокоскоростным газовым потоком. Благодаря немалой относительной скорости в потоках в распылителе или же вне его пределов сначала жидкость разделяется на отдельные слои, затем эти слои распадаются на отдельные капли. Примеры технической реализации – краскопульты, сопла Вентури и т.п.

Фактором, который определяет разрушение струи в пневматическом распылении, считается воздействие скоростного потока газа, выходящего из канала с немалой скоростью (50-300 м/с), тогда как скорость истечения струй жидкости относительно невелика. В случае большой относительной скорости потоков появляется трение между струями жидкости и газа, из-за этого струя жидкости, зафиксированная с одной стороны, истончается до отдельных тонких нитей.

Такие нити, распадаясь в местах утоньшения, достаточно быстро образуют мелкие капли (рисунок 2.9). Продолжительность существования формы в виде нитей (статистически неустойчивой) зависит от физических свойств жидкости и от относительной скорости газа. При большей относительной скорости нить тоньше, период существования нити меньше, распыл получается более дисперсный.

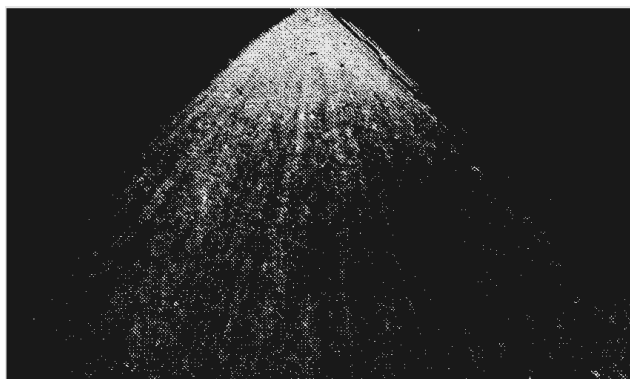


Рисунок 2.9 – Картина разрушения струи жидкости при пневматическом распылении

Достоинства пневматического способа: возможность распыления высоковязких жидкостей, надежность в эксплуатации, слабая зависимость качества распыления от объемного расхода жидкости. К недостаткам рассматриваемого способа распыления следует отнести повышенный расход энергии, необходимость в распыляемом агенте и в оборудовании для его подачи [69, 70].

2.2.5 Акустическое распыление

Акустическое распыление схоже во многом с пневматическим. Взаимодействуя с потоком воздуха жидкость получает энергию, при этом газу сообщаются акустические колебания звукового или ультразвукового диапазона, что обеспечивает более однородное и тонкое дробление [70, 71].

Рассматриваемый способ диспергирования более перспективен и энергетически выгоден, чем пневматическое распыление, но конструкции акустических источников аэрозолей относительно более сложны, чем у пневматических.

Выводы по второй главе

1. Проведен обзор существующих источников ультразвуковых колебаний и устройств распыления жидкости. Данный анализ позволил выбрать в качестве

источников ультразвукового воздействия – пьезоэлектрические преобразователи, а в качестве метода распыления – ультразвуковое распыление.

2. Обзор основных способов непрерывного диспергирования жидкостей показал, что распыление жидкостей ультразвуком имеет ряд преимуществ перед другими методами: оно позволяет получить туманы с более высокой концентрацией, также более узкий спектр размеров капель (близкий к монодисперсному), более экономичен и перспективен для решения поставленной задачи.

3 Физико-математическая модель эволюции аэрозоля

3.1 Физико-математическая постановка задачи

Несмотря на многочисленные исследования эволюции аэрозольных облаков, до настоящего времени не разработаны физико-математические модели, адекватно описывающие комплекс взаимосвязанных процессов, протекающих в аэрозоле: жидкокапельном или твердофазном. Это связано со сложностью описания кинетики мелкодисперсных облаков с учетом испарения капель вследствие теплообмена с окружающей средой, процессов коагуляции и осаждения. Физико-математическая модель, представленная в работе, позволяет учитывать эти процессы и рассчитывать изменение дисперсности аэрозоля во времени [72].

Предлагается математическая модель эволюции аэрозоля, основанная на использовании интегрального варианта уравнения Смолуховского [73-75]. Предположим, что дисперсная система пространственно однородна, в начальный момент времени в системе имеются частицы различного диаметра. Под действием броуновских колебаний частицы сталкиваются с некоторой вероятностью и слипаются. Учитывая только парные столкновения, образуются новые частицы с диаметром, равным сумме диаметров столкнувшихся частиц. Явлениями турбулентной, электростатической коагуляции пренебрегаем. Существенным является испарение (для жидкокапельного аэрозоля), в первую очередь, за счет кривизны поверхности капель (в силу их малого размера) [76, 77].

Модельный аэрозоль, полученный в лабораторных условиях, с унимодальной функцией распределения будем считать соответствующим гамма-распределению: $f_0(D) = aD^\alpha \cdot \exp(-bD^\beta)$, где D – диаметр частицы; b , α , β – параметры распределения, a – нормирующий множитель [9]. Известна связь массовой функции распределения по размерам со счетной функцией:

$g(D) = m/m_{10} f(D)$, где m_{10} – среднеарифметическая масса: $m_{10} \int_0^{\infty} m f(D) dD$,

m – масса отдельной частицы диаметра D .

Обозначим через I_1 уменьшение количества частиц диаметра D в единицу времени в единице объема из-за столкновения двух капель: с диаметрами D и D_1 , I_2 – увеличение количества частиц диаметра D за счет столкновения капель диаметрами D_1 и $D - D_1$. Пусть $K(D, D_1)$ – вероятность столкновений частиц. Тогда в соответствии с классическим уравнением Смолуховского эволюция распределения частиц в произвольном облаке по размерам частиц описывается соотношением:

$$\frac{\partial f(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2 + I_3, \quad (3.1)$$

$$I_1 = -f(D, t) \int_0^{D_{\max}(t)} K(D, D_1) f(D_1, t) dD_1,$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^D K(D - D_1, D_1) f(D_1, t) f(D - D_1, t) dD_1.$$

В качестве начального условия для (3.1) при $t = t_0$ возьмем начальное распределение частиц по размерам: $f(D, t_0) = f_0(D)$.

При классическом подходе считается, что все частицы, для которых масса превышает некоторое максимальное значение $D_{\max}$, выпадают из облака; в модели считаем величину $D_{\max}$, зависящей от времени и определяемой выражением:

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{9\eta H}{2g\rho_p t}}, \text{ где } \eta - \text{динамическая вязкость среды, } H - \text{высота облака, } g -$$

ускорение силы тяжести, ρ_p – плотность вещества частицы. Функция распределения частиц в некоторый момент времени t справа обрезается из-за седиментации относительно больших частиц. Постепенно граница смещается в сторону более мелких капель.

Член I_3 описывает испарение частиц, уменьшение их массы вследствие этого и их «уход» из рассматриваемой фракции распределения в сторону более мелких частиц.

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dD}{dt} f(D) \right). \quad (3.2)$$

Слагаемое I_3 применяется для жидкокапельного аэрозоля. Чем меньше размер капель аэрозоля, тем быстрее они испаряются за счет кривизны поверхности [78-80].

3.2 Испарение капель и его влияние на спектр частиц

Получим выражение для члена I_3 , учитывая модель испарения капель, изложенную в [81].

Изменение массы капли определяется разностью парциальных давлений паров воды над каплей p_{drop} и в окружающем воздухе p_{pl} согласно формуле:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{2\pi D_f M D (p_{drop} - p_{pl})}{RT}, \quad (3.3)$$

где постоянная R (универсальная газовая постоянная), температура среды обозначена T , характеристики вещества частицы следующие: D_f – коэффициент молекулярной диффузии, M – молекулярная масса. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса позволяет рассчитать парциальное давление насыщенного пара. Приближенный интеграл этого уравнения:

$$p_n = A e^{\frac{-MH_f}{RT}}, \quad (3.4)$$

где через A обозначена константа, H_f – это теплота фазового перехода вещества частицы. Найдём константу A при какой-либо температуре T , зная давление насыщенного пара p_n :

$$A = \ln p_n + \frac{MH_f}{RT}.$$

В аппроксимации (3.4) для воды используем выражение с константой A , вычисленной при температуре 293 К (20 °C): $p_n = p_t e^{\frac{2\sigma M}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)}$, где $p_t = 2338,8$ Па

Парциальное давление p_{drop} над каплей рассчитаем по формуле:

$$p_{drop} = e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_k D} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)} p_t e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right)}, \quad (3.5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, T_k – температура капли. При условии, что пар не является насыщенным в воздушной среде, вводится понятие влажности $\phi = p_{pl} / p_n$. Отсюда для давления пара в окружающем воздухе p_{pl} используем выражение:

$$p_{pl} = \phi p_n = \phi p_t e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)}. \quad (3.6)$$

Для получения выражения для скорости изменения массы капли подставим (3.5) и (3.6) в (3.3):

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{2\pi D_f M D}{RT} p_t \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_k D} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)} e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right)} - \phi e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right)} \right). \quad (3.7)$$

Учитывая, что $m = \frac{\pi D^3 \rho_p}{6}$, найдем уравнение для скорости изменения диаметра капли:

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{4D_f M}{\rho_p R T D} p_t \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_k D} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)} e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right)} - \phi e^{-\frac{M H_f}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{293} \right)} \right). \quad (3.8)$$

Расчеты, проведенные в работе [81], показали, что температура капли в процессе испарения меняется слабо, вплоть до последнего момента (режим с обострением), поэтому учет ее изменения имеет смысл только, если интересует детальное описание поведения отдельной капли. В противном случае температуру капли можно принять равной температуре окружающей среды. Температура окружающей среды для рассматриваемых концентраций аэрозоля не меняется

более, чем на 1-2 градуса, и этим изменением также можно пренебречь. При температуре среды, равной 293 К, (3.8) сводится к простому уравнению:

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{4D_f M}{\rho_p R T D} p_t \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_K D}} - \varphi \right). \quad (3.9)$$

С учетом (3.9) уравнение (3.2) запишется в виде:

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{dD}{dt} f(D) \right) = -\frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{4D_f M p_t}{\rho_p R T D} \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_K D}} - \varphi \right) f(D) \right). \quad (3.10)$$

Это уравнение описывает член (3.2), ответственный за эволюцию спектра частиц за счет испарения, с учетом влажности, при температуре среды, равной 293 К. При другой температуре следует использовать выражение (3.8) для подстановки в (3.2).

3.3 Модель коагуляции аэрозоля под действием ультразвука

В работах [40, 51] предложены физико-математические модели, применяющие балансовый подход Смолуховского в комплексе с гипотезами взаимодействия частиц: гидродинамической и ортокинетики.

Полученные в работах выражения по оптимальным частотам и амплитудам акустического воздействия не позволяют увидеть асимптотическое поведение и спрогнозировать процессы коагуляции аэрозолей. Приходится пользоваться, возможно, более наглядными, но теоретически не обоснованными интерполяционными формулами, описывающими экспериментальные результаты.

В модели Смолуховского, приведенной выше, для учета параметров воздействия (частоты и амплитуды акустических колебаний) необходимо внести соответствующие изменения.

Вероятность столкновений частиц – важнейший параметр, определяющий скорость коагуляции и осаждения аэрозоля. В отсутствии внешних полей эта величина определяется броуновским движением [73]. В базовой модели (3.1)

считалось, что вероятность столкновений пропорциональна площади сечения (то есть, квадрату диаметров) частиц с коэффициентом k_b :

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} (D^2 + D_1^2), \quad (3.11)$$

где k_b – коэффициент пропорциональности, n_0 – концентрация частиц, v – коэффициент кинематической вязкости среды.

Ультразвуковое воздействие повышает вероятность столкновений частиц, значит, выражение (3.11) должно измениться, включив в себя параметры, характеризующие УЗ-воздействие. Прежде всего, это амплитуда и частота ультразвукового поля.

В результате ультразвукового воздействия в звуковом поле возникают агрегаты частиц, в результате их взаимодействия в течении вокруг них [54]. Если линия тока в потоке, возникающем около одной частицы, увлекает другую, проходя в трубке диаметром, равным двойному диаметру этой частицы $2D$, можно рассчитать число встреч частиц в поле. Если dS – площадь сечения линии тока, U_0 – скорость частиц, то число встреч в единице длины для первой частицы в единицу времени равно $N = dS n_0 U_0$. Если уровни звукового давления невелики, то можно получить [82, 83] выражение для числа встреч, которое пропорционально квадрату диаметра частиц, квадрату скорости движения их (а это – величина, определяемая амплитудой излучения), концентрации частиц и коэффициенту обтекания $k_{обт}$:

$$N \approx \frac{U_0^2 n_0 k_{обт}^2 (D^2 + D_1^2)}{v}. \quad (3.12)$$

Под действием сил акустического поля частица вовлекается в колебания согласно ортокинетической гипотезе. Увлечение средой частицы может быть лучше или хуже в зависимости от характеристик этой среды и частицы и определяется величиной коэффициента увлечения $k_{увл}$ – амплитуда скорости частицы, отнесенная к амплитуде скорости газа. Поскольку частица в среде

испытывает силу Стокса, соотношение, определяющее коэффициент увлечения, запишется:

$$k_{увл} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}, \quad (3.13)$$

где $\tau = \rho_p D^2 / 18\eta$ – время стоксовой релаксации частицы, ω – частота УЗ-поля; η – коэффициент динамической вязкости газа.

Выражение (3.13) показывает, что частицы колеблются с амплитудой, отличающейся от амплитуды колебаний среды, и это отличие тем больше, чем больше плотность и диаметр этой частицы, а также чем больше частота акустического воздействия и ниже вязкость газа.

Выражение для коэффициента увлечения в акустическом поле показывает, что частица увлекается полем, вследствие чего повышается вероятность столкновений с заданной частицей в $k_{обт}^2 = k_a (1 - k_{увл})^2$ раз, где k_a – некоторый коэффициент, а вероятность столкновений двух частиц с диаметрами D и D_1 пропорциональна $N(1 - k_{увл})^2$. С учетом (3.11)–(3.13) получим:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} (D^2 + D_1^2) \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right). \quad (3.14)$$

Из анализа выражения 3.14, следует:

- вероятность столкновений в отсутствии УЗ-поля ($k_a U_0^2 = 0$) сводится к случаю броуновского движения (3.11);
- вероятность столкновений повышается при увеличении амплитуды акустического поля (скорость U_0);
- при относительно низких частотах воздействия ($\omega^2 \tau^2 \ll 1$) оно становится неэффективным ($k_{увл} \rightarrow 1, (1 - k_{увл}) \rightarrow 0$);
- существует определенная частота поля, соответствующая условию $\omega^2 \tau^2 \gg 1$; при дальнейшем повышении частоты колебаний увеличения вероятности столкновений не происходит. Таковую частоту можно назвать «оптимальной», при

которой коагуляция аэрозолей происходит наиболее эффективно ($k_{увл} \rightarrow 0, (1 - k_{увл}) \rightarrow 1$).

Такие выводы соответствуют данным других исследователей [83, 84]. Асимптотический анализ выражения (3.14) позволяет получить неэффективные (низкие) и наиболее эффективные (оптимальные) частоты ультразвукового воздействия:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{\tau} \sqrt{1 - \frac{1}{1 - 2o(1)}}, \quad (3.15)$$

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{1}{o(1)} - 1 \right]^{1/2}. \quad (3.16)$$

Если увеличение вероятности столкновений частиц при ультразвуковом воздействии, по сравнению с вероятностью столкновений без воздействия,

обозначить через K_1 : $K_1 = \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right)$, то этот коэффициент в

зависимости от частоты ведет себя так, как показано на рисунке 3.1 (водный аэрозоль, $k_a U_0^2 = 1$).

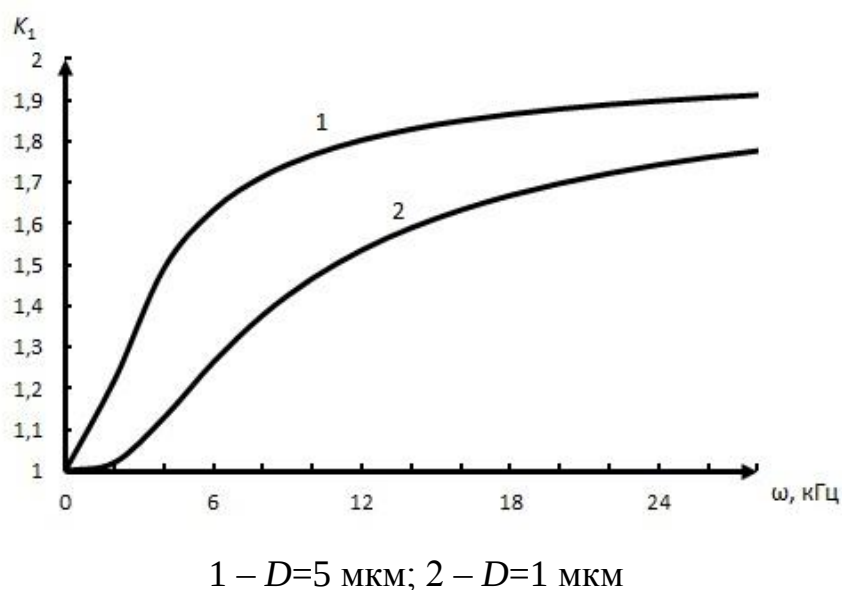


Рисунок 3.1 – Повышающий коэффициент K_1 в зависимости от частоты акустического воздействия (водный аэрозоль)

Величины оптимальной и минимальной частот воздействия, рассчитанные по формулам (3.15) и (3.16), сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Оптимальная и минимальная частоты для водного аэрозоля

D , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\omega_{\min}$, кГц	36	19	8	4,5	2,8	2	1,4	1,2	1	0,4
$\omega_{\max}$, кГц	132	71	52,5	37	26	18,1	13,3	10,1	8	6,5

По данным таблицы видно, что чем меньше размер частиц, тем более высокая частота акустического воздействия нужна для их осаждения. Таким образом, показано, что для коагуляции мелкодисперсных аэрозолей необходимо ультразвуковое излучение высокой частоты. Это было подтверждено и экспериментально [85].

3.4 Физико-математическая модель коагуляции в случае двухфазного аэрозоля

Как показывает выражение (3.14), внесение дополнительной дисперсной фазы в существующий аэрозоль увеличивает скорость коагуляции, следовательно, и осаждения частиц, повышая их концентрацию. Следует отметить, что лучший результат будет получен при более высокой дисперсности вводимого аэрозоля, поскольку будет больше количества частиц n_0 , выше число столкновений в единицу времени и удельная поверхность, соответственно, выше скорость коагуляции и осаждения.

Физико-математическую модель (3.1) рассмотрим для случая двухфазного аэрозоля (параметры с индексом 1 относятся к дополнительной дисперсной фазе). Дополним ее начальным условием вида:

$$f(D) = a \left((1 - \delta) D^\alpha \exp(-bD) + \delta D^{\alpha_1} \exp(-b_1 D) \right), \quad (3.17)$$

где δ – счетная доля частиц фазы с индексом 1. Необходимо помнить, что одна или обе дисперсные фазы могут испаряться, что влияет на убыль массы аэрозоля.

Счетная доля δ связана известным соотношением с массовой долей w фазы с индексом 1:

$$\delta = w / \left(w + (1 - w) \left[\frac{D_{32}}{(D_{32})_1} \right]^3 \frac{\rho_1}{\rho} \right).$$

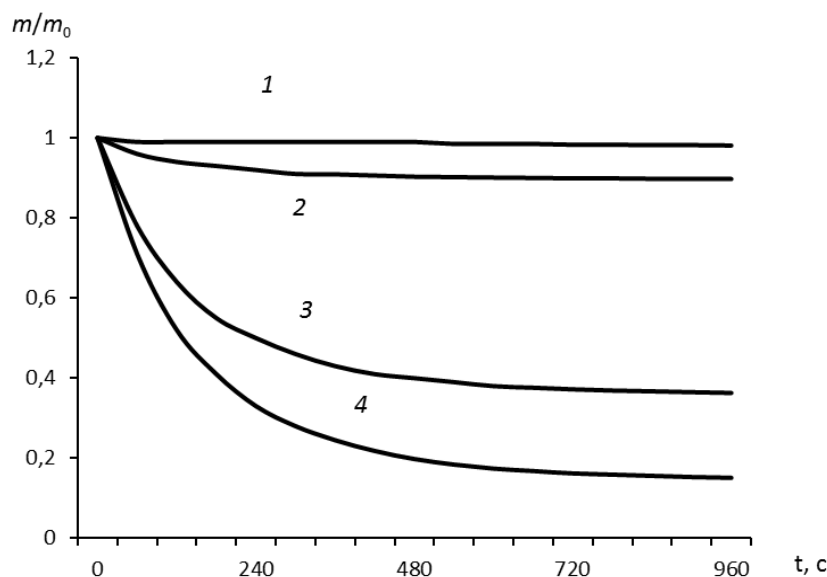
При внесении дополнительной дисперсной фазы повышается вероятность столкновений частиц на $(1 + \delta / (1 - \delta))$:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} \left(1 + \frac{\delta}{1 - \delta} \right) (D^2 + D_1^2).$$

При исследовании влияния дополнительной фазы важным вопросом является ее дисперсность: сопоставима ли она с дисперсностью основного аэрозоля (рассматривается мелкодисперсный основной аэрозоль) или дополнительный аэрозоль имеет частицы более крупных размеров. Для проведения численных расчетов выбраны следующие параметры начального распределения (3.16): $\alpha=0,1$, $b=1$ ($D_{32}=3,1$ мкм) для основного аэрозоля (дым), $\alpha_1=0,1$, $b_1=0,5$ ($(D_{32})_1=6,2$ мкм – «мелкий») и $\alpha_1=0,3$, $b_1=0,1$ ($(D_{32})_1=33$ мкм, «крупный») для дополнительной дисперсной фазы; в качестве дополнительной фазы возьмем воду. На практике такая задача может встречаться, например, в шахтах или при тушении пожаров, при осаждении пыли в производственных помещениях с помощью установок дождевания и т.п.

Динамика относительной массы аэрозоля при введении дополнительной дисперсной фазы (5 %) показана на рисунке 3.2: кривая 2 – «крупный» дополнительный аэрозоль, кривая 3 – «мелкий», без ультразвукового воздействия, кривая 4 – при воздействии ультразвуком. При этом на кривой 1 показано осаждение аэрозоля без внесения дополнения дисперсной фазы и без воздействия. Параметры исходного распределения частиц по размерам $\alpha=0,1$, $b=1$. Из рисунка видно, что время осаждения такого мелкодисперсного аэрозоля велико; внесение дополнительной фазы с относительно крупными частицами лишь немного уменьшает время осаждения, так как при этом количество частиц и, следовательно, вероятность их столкновений увеличивается незначительно. А вот

мелкодисперсная дополнительная фаза, даже в небольшом количестве (пять процентов по массе от исходного аэрозоля) существенно ускоряет осаждение, при этом УЗ-воздействие увеличивает скорость осаждения еще больше. Экспериментальные результаты приведены в работах [86, 87].



- 1 – без ультразвукового воздействия и доп. дисперсной фазы;
 2 – доп. дисперсная фаза ($w=5\%$), параметры распределения: $\alpha_1=0,3$, $b_1=0,1$;
 3 – доп. дисперсная фаза ($w=5\%$), параметры распределения $\alpha_1=0,1$, $b_1=0,5$, без воздействия ультразвуком; 4 – доп. дисперсная фаза ($w=5\%$), параметры распределения: $\alpha_1=0,1$, $b_1=0,5$, под действием ультразвука

Рисунок 3.2 – Зависимость от времени относительной массы аэрозоля

Расчетные данные, приведенные в п. 3.4, экспериментально подтверждены, что будет представлено в главе 4.

3.5 Учет радиационного давления в модели. Изменение массы аэрозоля

Помимо коагуляции частиц на скорость их движения в акустическом поле влияет радиационное давление («звуковой ветер»), причем, чем меньше размер частицы, тем, очевидно, больше это влияние [88, 89]. Скорость коагуляции, при этом, может не отличаться от броуновской – осаждение будет обусловлено

именно звуковым ветром, а не укрупнением частиц и их движением в гравитационном поле.

Рассмотрим силы, действующие на частицу диаметра D . Это сила тяжести, сила сопротивления воздуха и сила радиационного давления (рисунок 3.3). Будем считать радиационное давление сонаправленным силе тяжести (источник расположен выше аэрозольного облака). Здесь U – скорость дрейфа частицы, g – ускорение свободного падения, P – давление звукового излучения. Сила радиационного давления $F_r = \pi \frac{D^2}{4} P$, сила тяжести $F_g = \pi \frac{D^3}{6} g$, сила Стокса $F_s = 3\pi D\eta U$.

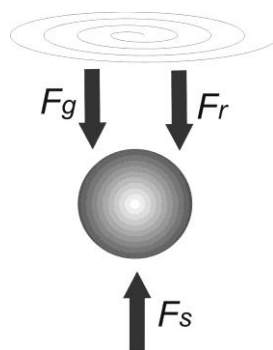


Рисунок 3.3 – Силы, действующие на частицу аэрозоля в звуковом поле

Решая уравнение движения частицы под действием указанных сил, несложно получить выражение для скорости дрейфа частицы, складывающейся из скорости стоксовой седиментации V_s и скорости звукового ветра V_w :

$$U = V_s + V_w = \frac{D^2 \rho g}{18\eta} + \frac{PD}{12\eta}, \quad (3.18)$$

Давление звукового излучения P в бегущей волне связано со звуковым давлением p следующим соотношением: $P = \frac{2p^2}{\rho_g c^2}$, где c – скорость звука, ρ_g – плотность газа.

Ведущим механизмом осаждения при этом будет тот, скорость которого будет выше для данного размера частиц. На рисунке 3.4 приведены отношения

скоростей стоксовой седиментации и звукового ветра для различных диаметров капель воды в воздухе при уровне громкости звука 125 дБ (что соответствует звуковому давлению $p=35,6$ Па).

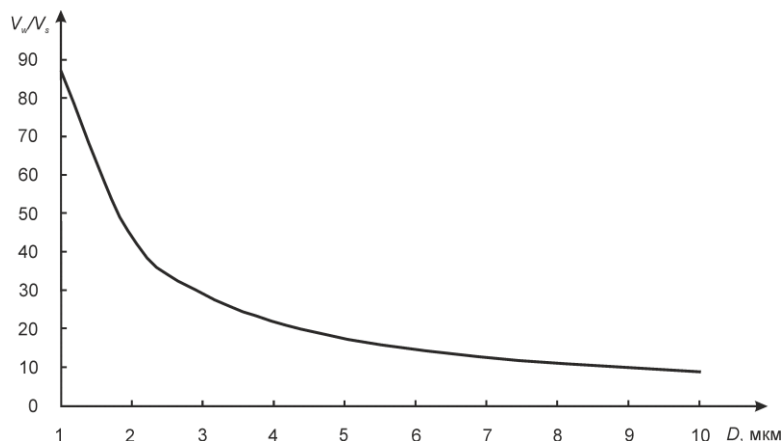


Рисунок 3.4 – Зависимость отношений скоростей стоксовой седиментации и звукового ветра от диаметра частиц водного аэрозоля в воздухе (уровень громкости звука 125 дБ)

Для частиц диаметром 4 мкм скорости стоксовой седиментации и осаждения за счет звукового ветра равны. При увеличении размеров частиц ведущим становится стоксовое осаждение, а значит, масса частиц имеет решающее значение. Коагуляция, приводящая к увеличению массы капель воды при их диаметре, больше 4 мкм, ускоряется с помощью ультразвука по описанному выше механизму, и они осаждаются быстрее в результате более частых столкновений и коагуляции. Но для частиц, меньше 4 мкм в диаметре, скорость звукового ветра становится более значительной. Поэтому их укрупнение за счет коагуляции уже не столь важно – их, в любом случае, быстрее «сдует» вниз звуковым ветром, чем они успеют коагулировать и впасть в осадок под действием силы тяжести. Кроме того, для ускорения коагуляции частиц с диаметром, меньше 4 мкм, как было отмечено выше, требуются такие высокие частоты ультразвукового воздействия, которые не достижимы на практике в существующих излучателях для газовых сред. Таким образом, критерием перехода от одного к другому ведущему механизму ультразвукового осаждения

мелкодисперсных аэрозолей следует считать отношение скоростей стоксовой и радиационной седиментации:

$$\frac{V_s}{V_w} = \frac{2D_{cr}\rho_p g}{3P} = 1.$$

Зависимость критического диаметра перехода от механизма стоксовой седиментации к радиационной от уровня громкости звука приведена на рисунке 3.5. Чем выше уровень громкости (звуковое давление), тем больше критический диаметр. Так, ультразвук с уровнем громкости 140 дБ увлекает частицу диаметром 50 мкм и более за счет радиационного давления быстрее, чем в аэрозоле могут пройти процессы коагуляции и гравитационного осаждения, а для уровня громкости 110 дБ диаметр такой частицы только 1,5 мкм.

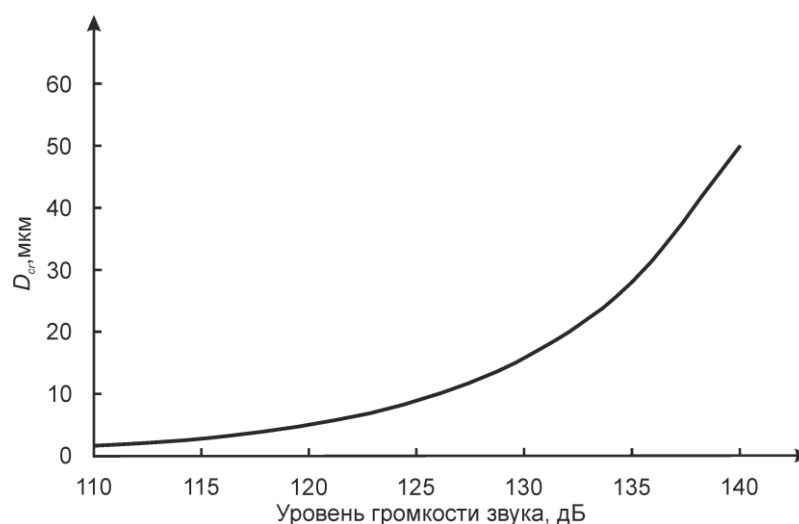


Рисунок 3.5 – Зависимость критического диаметра частиц водного аэрозоля в воздухе от уровня громкости звука

Уравнение (3.1) описывает изменение функции распределения частиц аэрозоля по размерам во времени, на которое влияют процессы осаждения и испарения. Второй вопрос, который нужно решить для описания процесса эволюции аэрозоля – это изменение его массы. Изменение массы аэрозоля определяется испарением частиц (для жидких капель) и осаждением:

$$\frac{dm}{dt} = \int_0^{\infty} \left(\frac{2\pi D_f M p_t D}{RT} \left(e^{\frac{4\sigma M}{\rho_p R T_k D}} - \phi \right) + \frac{Um(t)}{H} \right) f(D, t) dD, \quad (3.19)$$

где D_f – коэффициент диффузии паров, M – молекулярная масса, $p_t=2338,8$ Па, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, σ – коэффициент поверхностного натяжения, T_k – температура капли, ϕ – влажность, m – масса аэрозоля, H – высота облака. Скорость дрейфа частицы U определяется выражением (3.18), а функция распределения частиц по размерам $f(D, t)$ – выражением (3.1). Диаметр частиц $D_{\max}(t)$ – это такая величина, что частицы с диаметром $D > D_{\max}$ на момент времени t выпадут в осадок. Учитывая, что $H=Ut$, из уравнения (3.18) получим:

$$D_{\max} = \frac{9\eta}{\rho_p g} \left[\sqrt{\left(\frac{P}{12\eta} \right)^2 + \frac{2H\rho_p g}{9t\eta}} - \frac{P}{12\eta} \right]. \quad (3.20)$$

Таким образом, уравнения (3.1)-(3.20) описывают изменение массы и функции распределения частиц аэрозоля по размерам от времени.

Выводы по третьей главе

1. Предложена физико-математическая модель коагуляции аэрозоля при акустическом воздействии на основе интегрального уравнения Смолуховского с учетом возможности коагуляции двухфазного аэрозоля. При этом зависимость от интенсивности и частоты ультразвукового воздействия включена в выражение, описывающее вероятность столкновений частиц. Получены зависимости эффективности осаждения от частоты и амплитуды ультразвука. С помощью асимптотического анализа получены выражения для оптимальной частоты акустического воздействия. Показано, что с уменьшением размеров частиц оптимальная частота воздействия (с точки зрения коагуляции частиц) увеличивается.

2. При исследовании модели показано, что основными механизмами уменьшения массы аэрозоля являются испарение капель, коагуляция и

седиментация. Интенсивность этих процессов зависит от диаметра частиц аэрозоля, (который зависит, в свою очередь, от скорости коагуляции), физико-химических свойств частиц и параметров внешней среды. Теоретически показано, что скорость коагуляции возрастает при наложении акустического поля и при введении дополнительной дисперсной фазы, причем, чем выше дисперсность дополнительной фазы, тем больше эффект. Другой механизм воздействия ультразвука на аэрозольное облако – это радиационное давление, которое также способствует ускорению седиментации. Этот механизм становится ведущим при уменьшении размеров частиц.

4 Экспериментальная часть

4.1 Способы и устройства для экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в герметичной аэрозольной камере объемом 1 м^3 (рисунок 4.1). Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.2. Воздействующее на аэрозоль акустическое поле создавалось с помощью нескольких звуковых источников: двух ультразвуковых дисковых излучателей с рабочими частотами 22 кГц и 28 кГц [90], с уровнем звукового давления не менее 144 дБ (рисунок 4.3) и звуковой сирены РМА 121 с частотой колебаний 2,4 кГц (уровень звукового давления не менее 121 дБ) (рисунок 4.4) [40, 91]. Отверстие для присоединения акустического источника расположено в верхней части камеры; излучающая поверхность расположена на расстоянии 0,3 м от потолка.



Рисунок 4.1 – Внешний вид экспериментальной установки

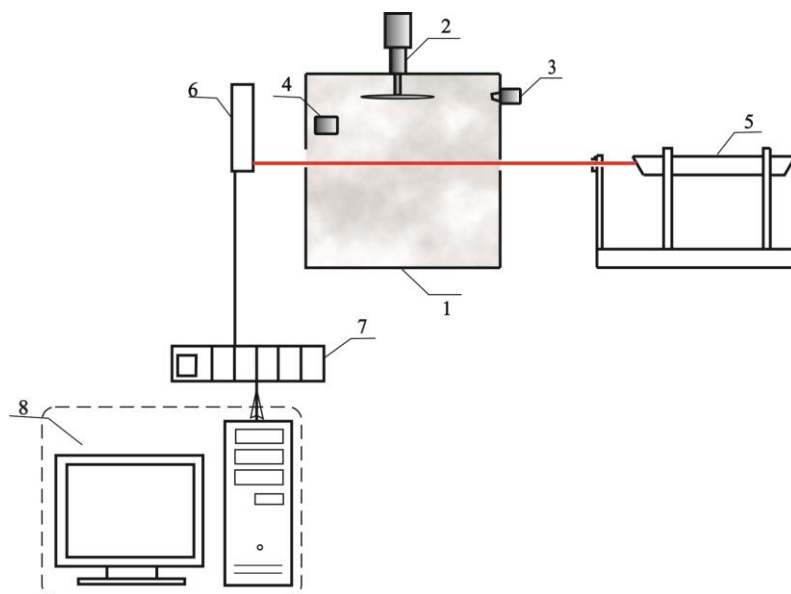


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки: 1 – аэрозольная камера, 2 – УЗ-излучатель, 3 – распылитель основного аэрозоля, 4 – распылитель дополнительной жидкокапельной фазы, 5 – лазер, 6 – фотоприемник, 7 – многоканальный усилитель, 8 – система сбора и обработки данных

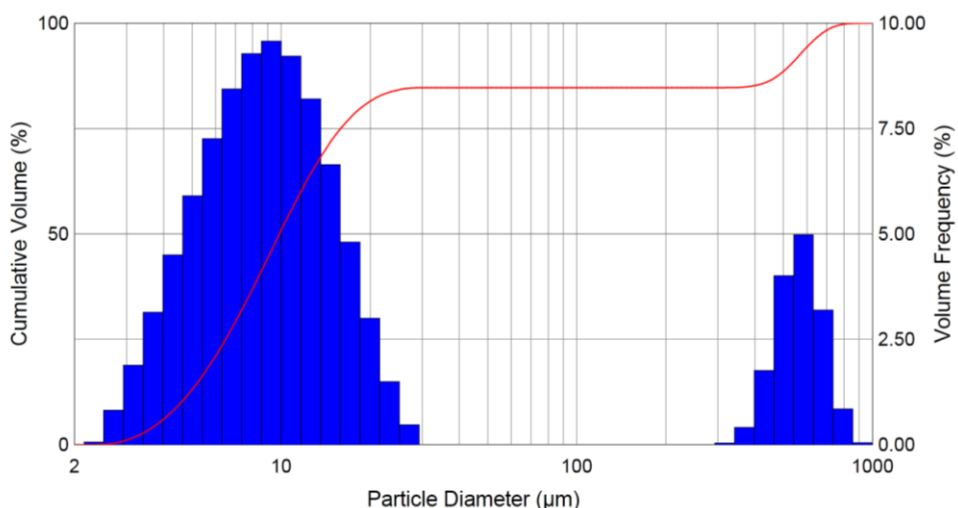


Рисунок 4.3 – Ультразвуковой технологический аппарат «Соловей»



Рисунок 4.4 – Сирена РМА 121

Для создания жидкокапельного аэрозоля использовался краскопульт КРАТОН LVLP-02S. На анализаторе размеров частиц Spraytec было проведено исследование начального распределения частиц в струе краскопульта. Краскопульт был настроен на минимальный расход жидкости, что позволило получить дисперсность до 15 мкм – 75 % частиц по массе. На рисунке 4.5. приведена гистограмма начального распределения.



Size (μm)	% V <	% V	Size (μm)	% V <	% V	Size (μm)	% V <	% V
0.117	0.00	0.00	2.51	0.06	0.06	54.12	84.71	0.00
0.136	0.00	0.00	2.93	0.88	0.82	63.10	84.71	0.00
0.158	0.00	0.00	3.41	2.77	1.89	73.56	84.71	0.00
0.185	0.00	0.00	3.98	5.91	3.14	85.77	84.71	0.00
0.215	0.00	0.00	4.64	10.41	4.50	100.00	84.71	0.00
0.251	0.00	0.00	5.41	16.32	5.91	116.59	84.71	0.00
0.293	0.00	0.00	6.31	23.58	7.26	135.94	84.71	0.00
0.341	0.00	0.00	7.36	32.02	8.44	158.49	84.71	0.00
0.398	0.00	0.00	8.58	41.29	9.28	184.79	84.71	0.00
0.464	0.00	0.00	10.00	50.87	9.58	215.44	84.71	0.00
0.541	0.00	0.00	11.66	60.09	9.22	251.19	84.71	0.00
0.631	0.00	0.00	13.59	68.30	8.20	292.87	84.71	0.00
0.736	0.00	0.00	15.85	74.94	6.65	341.46	84.76	0.04
0.858	0.00	0.00	18.48	79.75	4.81	398.11	85.16	0.41
1.00	0.00	0.00	21.54	82.75	3.00	464.16	86.92	1.76
1.17	0.00	0.00	25.12	84.24	1.50	541.17	90.93	4.01
1.36	0.00	0.00	29.29	84.71	0.47	630.96	95.91	4.98
1.58	0.00	0.00	34.15	84.71	0.00	735.64	99.11	3.20
1.85	0.00	0.00	39.81	84.71	0.00	857.70	99.96	0.85
2.15	0.00	0.00	46.42	84.71	0.00	1000.00	100.00	0.04

Рисунок 4.5 – Начальное распределение частиц по размерам в факеле краскопульта в виде гистограммы и таблицы

Твердофазный аэрозоль создавался с помощью пескоструйного пистолета КРАТОН SBG-01 3 01 02 033. В качестве источника газа использовался баллон ГОСТ 949-73 и ТУ 14-3Р-94. Рабочее давление ~0,4 МПа создавалось редуктором DINOX.

Введение дополнительной фазы в полученное облако аэрозоля осуществляли с помощью ультразвукового ингалятора «Муссон-2» ($D_{32} = (1 \div 5)$ мкм, производительность – 1,2 мл/мин) (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Ультразвуковой ингалятор «Муссон-2»

Экспериментальные исследования влияния температуры и влажности дисперсионной среды на эволюцию параметров жидкокапельного аэрозоля проводилось в испытательной климатической камере.

Климатическая камера КТХВ-10 (рисунок 4.7) состоит из следующих основных элементов:

- промышленной сборной низкотемпературной холодильной камеры внутренним объемом 10 м^3 из трехслойных сэндвич-панелей с наполнителем из пенополиуретана с соединением панелей с помощью пластиковых боковых профилей типа «шип-паз»;
- низкотемпературной холодильной Сплит-системы Ариада KLS200/330N с компрессорно-конденсаторным агрегатом;
- системы нагрева и вентиляции на базе электрического калорифера NAD KEA 160/4.5 и вентилятора ВАНСИВАН 160А;
- системы увлажнения на базе парового увлажнителя NORDMANN Engineering AT 300;

– блока управления систем вентиляции и кондиционирования NAD ACE222 с контроллером Siemens RLU2xx.

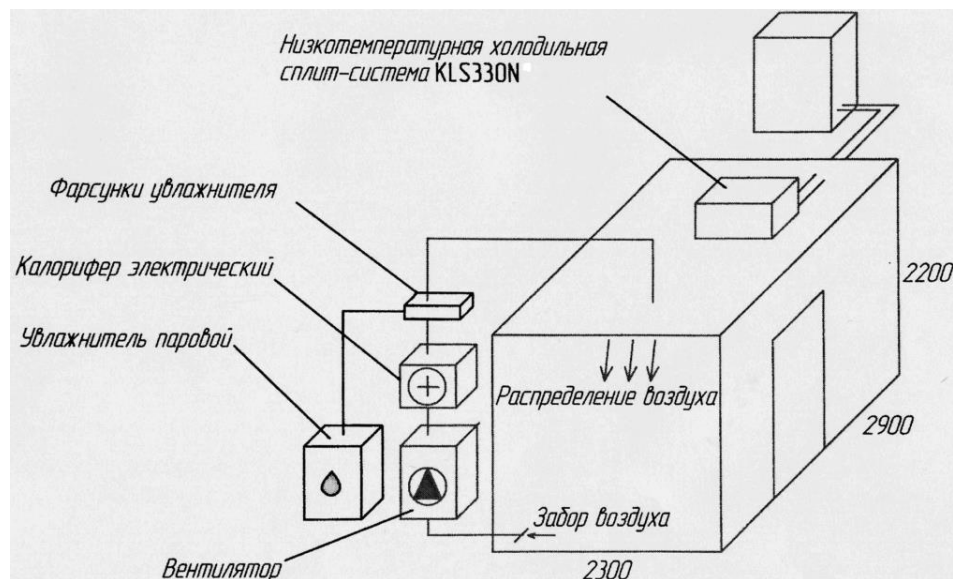


Рисунок 4.7 – Блок-схема климатической испытательной камеры (размеры на рисунке приведены в миллиметрах, мм)

Создание положительной избыточной температуры в камере осуществляется при помощи нагрева и вентиляции. В качестве нагревательного элемента выступает электрический калорифер мощностью 4,5 Вт. Воздухообмен в камере осуществляется системой вентиляции на базе канального вентилятора с производительностью $400 \text{ м}^3/\text{ч}$, а также при помощи испарителя системы охлаждения. Измерение и регулирование температуры осуществляется блоком управления систем вентиляции и кондиционирования NED ACE222 с контроллером Siemens RLU2xx. Измерительные датчики расположены в трех точках климатической камеры: на входе и выходе системы вентиляции и на корпусе испарителя системы охлаждения.

Для измерения спектра размеров частиц использовался метод малых углов (модифицированный в части алгоритмов расчёта), который основан на определении функции распределения по размерам частиц аэрозоля с помощью решения серии прямых задач оптики аэрозолей [92, 93]. Суть метода: определение спектра размеров частиц аэрозоля при измерении индикатрисы рассеяния

излучения на малых углах и сравнения ее значений с расчетными. Метод позволяет определять концентрацию аэрозоля в рассматриваемом объеме и функцию распределения по размерам частиц аэрозоля в диапазоне величин диаметра 1-100 мкм [94-96]

Лазерный измерительный комплекс ЛИД-2М [94, 97], реализующий данный метод измерения, состоит из фотоприемного блока, излучателя, блока регистрирующей аппаратуры (рисунок 4.8). Гелий-неоновый лазер используется в качестве излучателя (длина волны излучения 0,63 мкм). Данная установка дает возможность регистрировать рассеяние излучения в интервале углов $\Theta=(0\div15)^\circ$. Для регистрации рассеянного излучения использовались кремниевые фотодиоды, из которых была сформирована фотодиодная линейка.

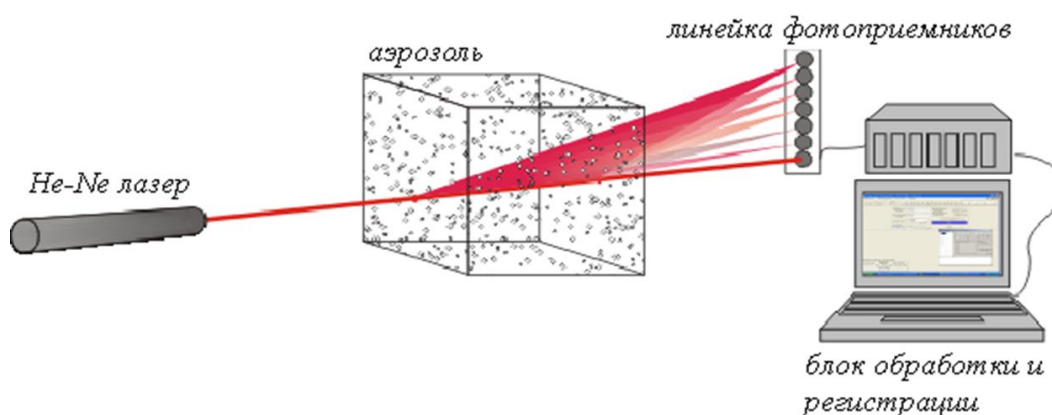


Рисунок 4.8 – Схема взаимодействия излучения с аэрозолем

Эксперименты проводились как с твердофазными, так и с жидкокапельными аэрозолями. Объясняется это тем, что промышленные аэрозоли могут представлять и ту и другую фазы, например, при дроблении, размоле, трении, шлифовке, горении, взрывах и при многих других процессах образуются твердофазные вещества, а масляный туман, пары летучих веществ в воздухе – примеры аэрозолей с жидкой дисперсной фазой.

Модельные среды были выбраны исходя из цели работы – осаждение мелкодисперсных аэрозолей. Дисперсность жидкокапельных аэрозолей задается настройкой распылительного устройства. Среда с жидкой дисперсной фазой выбирались с разными физико-химическими свойствами веществ для создания

туманов. Например, подсолнечное масло моделирует конкретную ситуацию с возможными промышленными выбросами. Для экспериментов с твердофазными аэрозолями был выбран дым, содержащий частицы сажи, и достаточно типичные промышленные аэрозоли – просеянная угольная и мучная пыль. В таблице 4.1 приведены выбранные модельные среды и их характеристики.

Таблица 4.1 – Модельные среды, используемые в экспериментах

Вещество	Плотность ρ , кг/м ³	Вязкость η , мПа·с	Размер частиц D_{32} , мкм
<u>Твердофазные</u>			
дым	1450-2020	–	2-4
мучная пыль	1330	–	20-30
угольная пыль	1450	–	20-30
<u>Жидкокапельные</u>			
дистиллированная вода	1000	1,000	10-15
18 %-ный водный раствор глицерина	1044	1,769	
70 %-ный водный раствор глицерина	1185	22,940	
подсолнечное масло	920	60,000	

Выбор данных аэрозолей также определен сравнительной простотой их создания.

4.2 Эволюция жидкокапельных аэрозолей

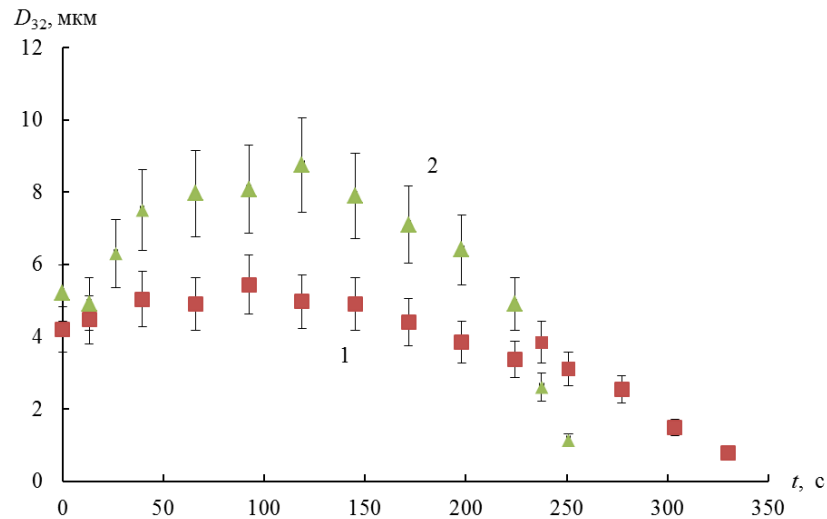
4.2.1 Осаждение водного аэрозоля ультразвуковым воздействием

В серии опытов в качестве распыляемого вещества для создания жидкокапельного аэрозоля использовалась дистиллированная вода [98].

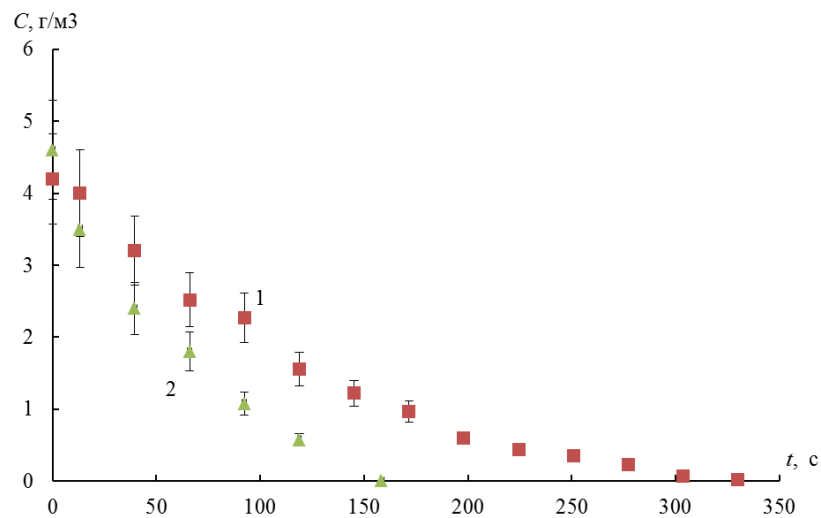
В течение 20 минут экспериментальная камера заполнялась водным аэрозолем, масса распылённой воды составила 48 г. Затем в течение 16 минут аэрозоль подвергался воздействию УЗ-излучения (частота механических колебаний – 28 кГц, уровень звукового давления – 144 дБ). Для осуществления

сравнительного анализа аналогичные опыты проводились без воздействия ультразвука.

По результатам экспериментов получены данные о дисперсности и концентрации частиц в облаке (рисунок 4.9).



а)



б)

Рисунок 4.9 – График изменения D_{32} (а) и концентрации частиц (б) водного аэрозоля со временем без УЗ-воздействия (1) и при воздействии ультразвука (2); температура среды 25 °С

Анализ экспериментальной информации свидетельствует о следующем. Под воздействием ультразвука время осаждения жидкокапельного аэрозоля

сокращается в ~ 2 раза. При этом средний объемно-поверхностный диаметр увеличивается по сравнению с исходным (в течение ~ 2 мин), а затем уменьшается. Этот эффект можно объяснить протеканием процессов коагуляции и испарения при осаждении жидкокапельного аэрозоля под УЗ-воздействием.

На рисунке 4.10 приведены данные о дисперсности и концентрации частиц, полученные для водного аэрозоля при более низкой температуре окружающей среды.

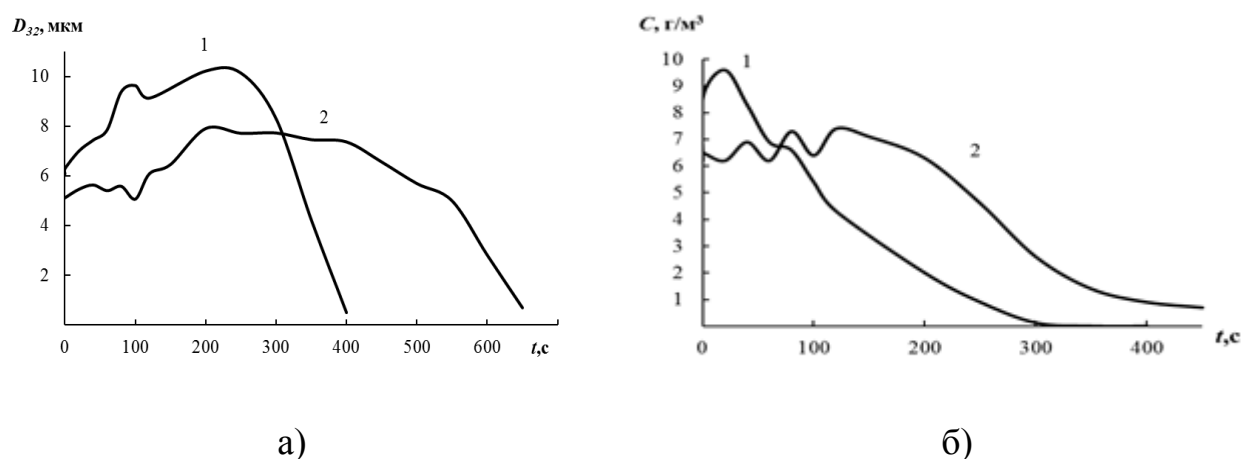


Рисунок 4.10 – График изменения D_{32} (а) и концентрации частиц (б) водного аэрозоля со временем без УЗ-воздействия (1) и при воздействии ультразвука (2); температура среды 16 °С

Анализ полученных данных показал, что даже незначительное снижение температуры (на 9 °С) увеличивает время осаждения водного аэрозоля в ~ 2 раза. При этом, как и при температуре среды 25 °С, скорость осаждения при применении ультразвука также увеличилась в ~ 2 раза.

4.2.2 Ультразвуковое осаждение трудноиспаряемых жидкостей

Распыляемое вещество для создания трудноиспаряемого жидкокапельного аэрозоля – подсолнечное масло, 18 %-ный и 70 %-ный водный раствор глицерина.

Вначале эксперимента камера заполняется аэрозолем, за 1 минуту распылено 9 г жидкости. Дополнительная фаза (водный аэрозоль с параметрами функции распределения $\alpha=2,1$, $b=0,9$, 7 г) генерировалась УЗ-распылителем

«Муссон-2». Акустическое поле, воздействующее на аэрозоль, создавалось с помощью УЗ-излучателя с рабочей частотой 28 кГц, с уровнем звукового давления – не менее 144 дБ.

При расчете параметров аэрозоля растворов, содержащих слабоиспаряемое вещество (например, глицерин) и быстроиспаряемые вещества, необходимо учитывать изменение коэффициента диффузии молекул при изменении концентрации этих веществ в растворе по мере испарения летучих веществ. В первую очередь из раствора испаряется вода и летучие примеси, постепенно уменьшая коэффициент диффузии вещества частицы:

$$D_f = D_{fw} \frac{C_{evp}}{1 - C_g} + D_{fg} \left(1 - \frac{C_{evp}}{1 - C_g} \right), \quad (4.1)$$

где D_{fw} – коэффициент диффузии молекул воды, D_{fg} – коэффициент диффузии молекул слабоиспаряемого вещества в воздухе, C_{evp} – массовая доля испарившегося вещества, C_g – начальная массовая доля слабоиспаряемого вещества в растворе.

Данные рассматриваемые модельные среды отличаются, прежде всего, коэффициентом диффузии молекул (для масла и глицерина коэффициент диффузии на 4-5 порядков меньше, чем для воды). Слабоиспаряемые вещества: подсолнечное масло и глицерин – образуют аэрозоль, динамика которого обусловлена, в основном, коагуляцией и осаждением. Подсолнечное масло в соответствии с ГОСТ Р 52465-2005 содержит влагу и летучие вещества от 10 % до 30 %. В расчетах доля быстроиспаряемых веществ в масле была принята, равной 15 %.

На рисунке 4.11 приведена зависимость относительной массы аэрозоля подсолнечного масла m/m_0 (где m_0 – начальная масса частиц аэрозоля), рассчитанная по приведенной выше модели (кривые) и измеренные экспериментально (точки), в зависимости от времени при УЗ-воздействии (кривая 2) и без него (кривая 1). Перегиб кривой в области, около 100 секунд, обусловлен испарением воды и летучих веществ из капель масла. Дальнейшая

эволюция аэрозоля определена коагуляцией капель, радиационным давлением на облако и осаджением частиц.

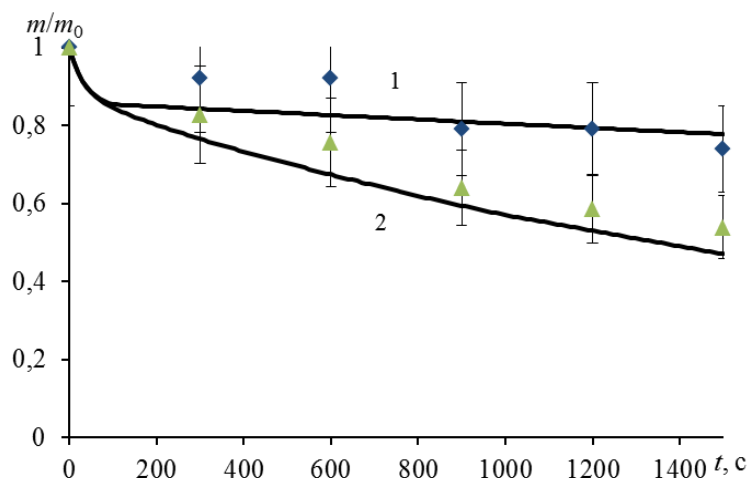


Рисунок 4.11 – Динамика относительной массовой концентрации частиц аэрозоля подсолнечного масла: 1 – без УЗ-воздействия;
2 – под УЗ-воздействием

Рисунок 4.12 показывает зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра частиц от времени для масляного аэрозоля в случае с УЗ-воздействием и без УЗ-воздействия. Распределение частиц от времени деформируется слабо, но несколько сильнее при наложении акустического поля, что связано с ускоренной коагуляцией частиц.

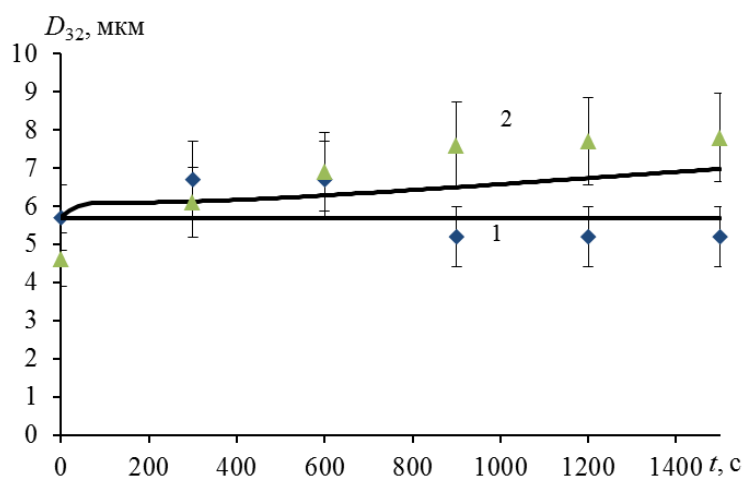
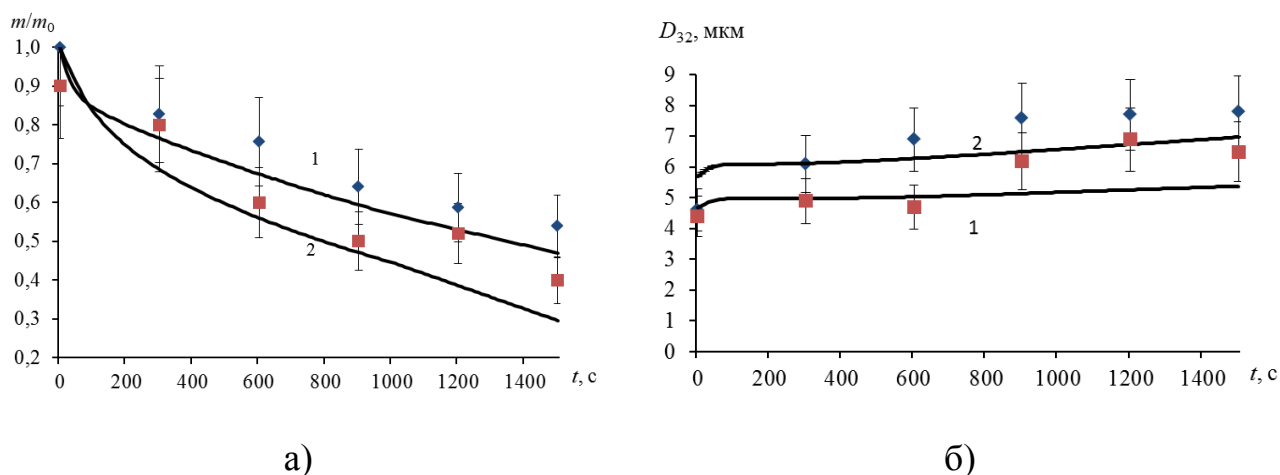


Рисунок 4.12 – Динамика среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля подсолнечного масла: 1 – под УЗ-воздействием;
2 – без УЗ-воздействия

На рисунке 4.13 показана зависимость относительной массы (а) и среднего объемно-поверхностного диаметра (б) частиц аэрозоля подсолнечного масла от времени при УЗ-воздействии с использованием дополнительной фазы (водного аэрозоля, кривая 2) и без нее (кривая 1). Как предсказывала теория, введение в аэрозоль дополнительной фазы ускоряет осаждение аэрозоля, способствуя коагуляции.



а) б)
Рисунок 4.13 – Динамика относительной массы (а) и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц (б) аэрозоля подсолнечного масла при УЗ-воздействии с дополнительной фазой водного аэрозоля (2) и без дополнительной фазы (1)

Рисунок 4.14 иллюстрирует эффект воздействия дополнительной фазы водного аэрозоля на осаждение подсолнечного масла без наложения акустического поля. Более глубокое снижение концентрации аэрозоля обусловлено испарением дополнительной фазы водных капель; затем снижение концентрации происходит с той же скоростью, что и у исходного масляного тумана без введения дополнительной фазы.

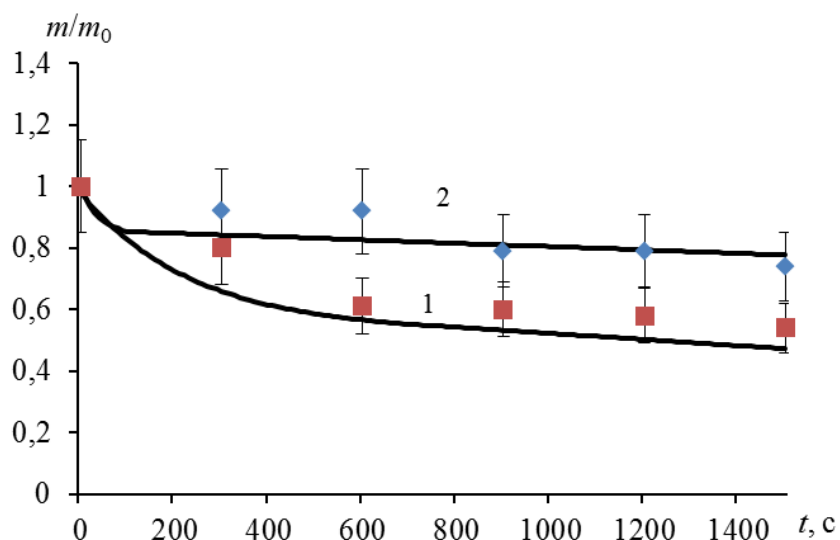


Рисунок 4.14 – Динамика относительной массовой концентрации частиц аэрозоля подсолнечного масла без УЗ-воздействия: 1 – с введением 5 г водного аэрозоля дополнительно; 2 – без введения дополнительного аэрозоля

В таблице 4.2 приведено расчетное время осаждения масляного аэрозоля для четырех случаев: без какого-либо воздействия; с УЗ-воздействием; под воздействием ультразвука и дополнительным введением водного аэрозоля; только с водным аэрозолем, без УЗ-воздействия.

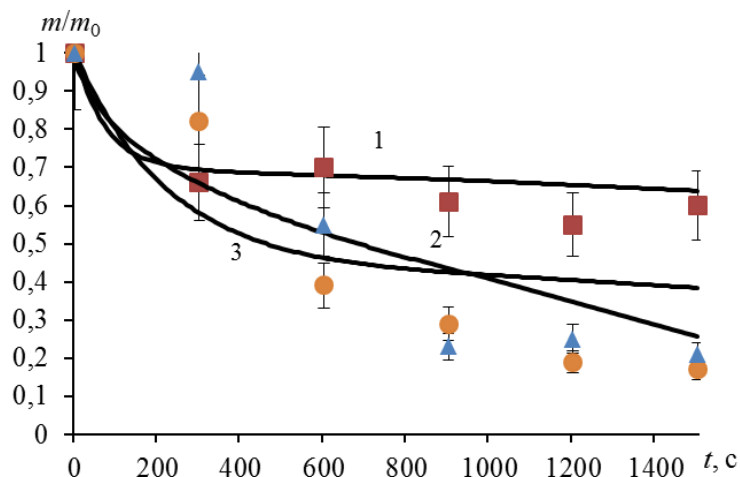
Таблица 4.2 – Время полного осаждения масляного аэрозоля при разных видах воздействия

Вид воздействия	Время осаждения, ч
Без воздействия	4,41
Ультразвуковое воздействие, 28 кГц, 140 Дб	1,07
Введение дополнительно водного аэрозоля ($D_{32} \sim 5$ мкм)	4,38
УЗ-воздействие + дополнительный водный аэрозоль	0,69

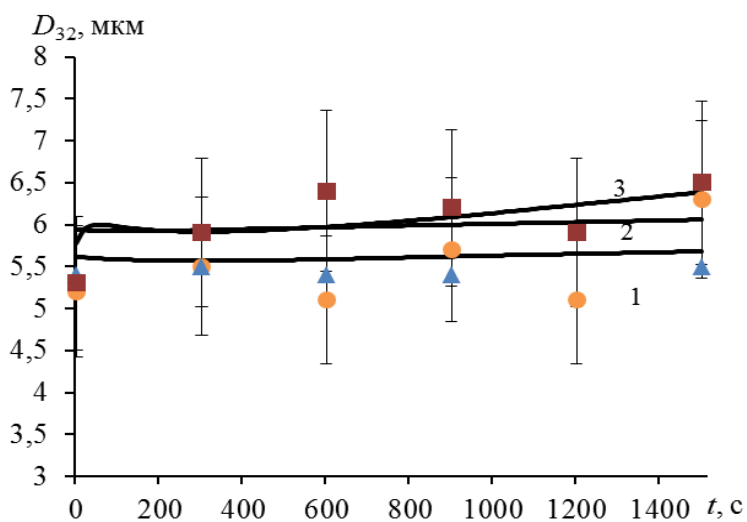
Как видно из таблицы 4.2, совместное использование УЗ-воздействия и дополнительной фазы (водного аэрозоля) существенно: более, чем в 6 раз, ускоряет осаждение масляного тумана [99].

На рисунке 4.15 представлены графики изменения относительной массы (а) и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц (б) аэрозоля 70 %-ного

водного раствора глицерина со временем с аналогичными видами воздействий. В таблице 4.3 приведено расчетное время осаждения аэрозоля 70 %-ного водного раствора глицерина в этих случаях.



а)



б)

Рисунок 4.15 – Динамика относительной массы (а) и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц (б) аэрозоля 70 %-ного водного раствора глицерина без воздействия (1), при УЗ-воздействии (2) и при УЗ-воздействии с дополнительной фазой водного аэрозоля (3)

Таблица 4.3 – Время полного осаждения аэрозоля 70 % раствора глицерина при разных видах воздействия

Вид воздействия	Время осаждения, ч
Без воздействия	3,97
Ультразвуковое воздействие, 28 кГц, 140 Дб	1,98
УЗ-воздействие + дополнительный водный аэрозоль	0,65

Как видно из проведенных расчетов, УЗ-воздействие и введение дополнительного мелкодисперсного водного аэрозоля позволяет существенно снизить время осаждения исходного (слабоиспаряемого) аэрозоля. Эксперименты подтверждают этот вывод. Предложенная математическая модель, с учетом испарения (уравнения Максвелла, Томсона), ускорения коагуляции и осаждения облака за счет ультразвукового воздействия, в том числе облака двухфазного аэрозоля, удовлетворительно описывает экспериментальные данные [100].

4.2.3 Ультразвуковое осаждение мелкодисперсных аэрозолей трудноиспаряемых жидкостей в условиях высокой влажности

Эксперимент ставился, как описано в п. 4.2.2, но в климатической камере создавались начальные условия влажности, равной 90 %. При этом мелкие капли аэрозоля не только не испаряются, но наоборот, являются центрами конденсации. Таким образом, эффективное массовое содержание трудноиспаряемой примеси в капле уменьшается, по сравнению с первоначальным, а влажность, соответственно, падает. Можно оценить относительное уменьшение доли примеси, исходя из измеренного падения влажности в камере. Так, при уменьшении относительной влажности с 0,9 до 0,84 в объеме 10 м^3 (климатическая камера) на центрах конденсации выпадет $17,3(0,9-0,84)=19,3 \text{ г}$ воды (максимальная абсолютная влажность при 20°C составляет $17,3 \text{ г/м}^3$), увеличив массу капель в 2,1 раза, что соответствует уменьшению массовой доли глицерина в капле с 70 % до 33 %. Процесс конденсации происходит очень быстро, за доли секунды после распыления. Поэтому наблюдаемые в

эксперименте значительно более медленные (по сравнению с конденсацией пересыщенного пара) процессы испарения и седиментации происходят с каплями, состоящими из менее концентрированного раствора глицерина. Для капель, с характерным размером около 4 мкм, влияние УЗ-излучения с частотой 28 кГц на коагуляцию незначительно (эффект достигается лишь за счет звукового давления). Добавка водного аэрозоля также не приносит ощутимого результата. В опыте распылялось 10 г 70 %-ного раствора глицерина в камере общим объемом 10 м³; дополнительный аэрозоль (дистиллированная вода) с характерным диаметром частиц, порядка 4 мкм, распылялся в количестве 7 г. Концентрация частиц такова, что за рассматриваемое время (десятки минут) процессами коагуляции можно пренебречь. Результаты расчета и экспериментов приведены на рисунке 4.16.

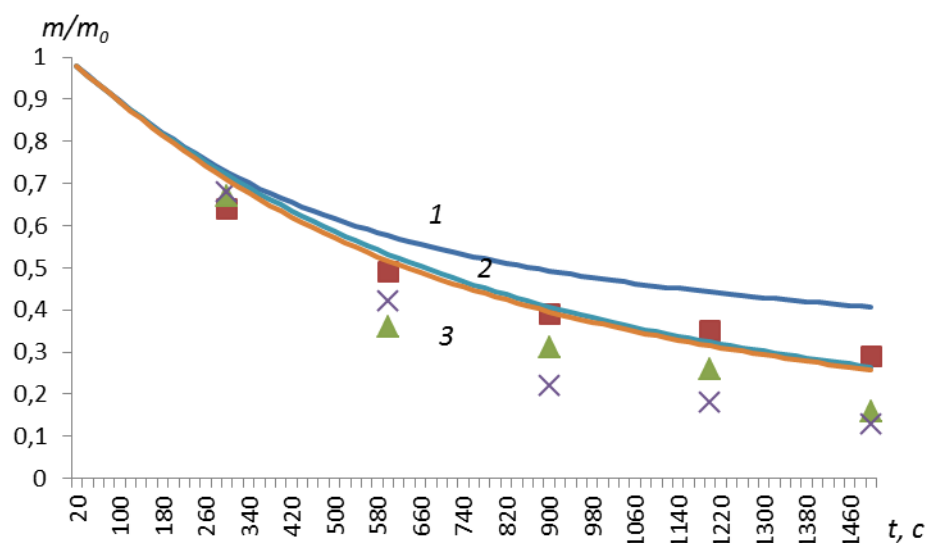


Рисунок 4.16 – Относительная масса аэрозоля в зависимости от времени при влажности 90 %: 1 – без УЗ-воздействия и дополнительной фазы; 2 – под УЗ-воздействием (28 кГц, 140 дБ); 3 – под УЗ-воздействием и введением 7 г водного аэрозоля

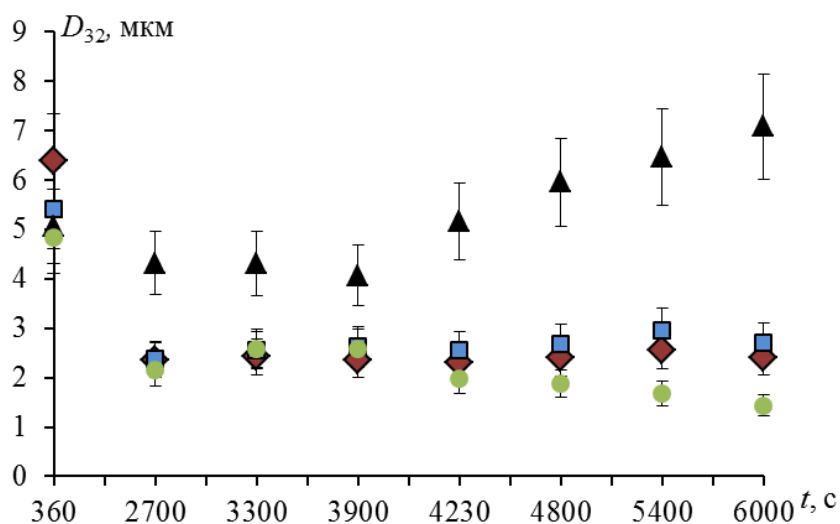
При таких малых размерах частиц, даже с учетом большой влажности, главный вклад в уменьшение массы аэрозоля вносит именно испарение, а не коагуляция. Поэтому все воздействия, направленные на ускорение коагуляции (в

данном опыте – внесение дополнительного аэрозоля), не приносят желаемого эффекта. Однако, если малые частицы трудноиспаряемы (твердая фаза или чистый глицерин, масло), то ультразвуковое воздействие и внесение дополнительной фазы сыграет свою роль, но через больший промежуток времени.

4.2.4 Влияние частоты акустических источников на осаждение аэрозоля

В качестве модельной среды для исследования влияния частоты акустических источников выбран 18 %-ный водный раствор глицерина. Испарение воды из капель аэрозоля завершается, приблизительно, спустя 30-40 минут после распыления. В воздухе остаются мелкие частички глицерина, которые чрезвычайно сложно осадить.

Спустя 40 минут после распыления 18 %-ного водного раствора глицерина в экспериментах включали источник акустического излучения с частотами 22, 28 и 2,4 кГц. График зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц от времени представлен на рисунке 4.17.

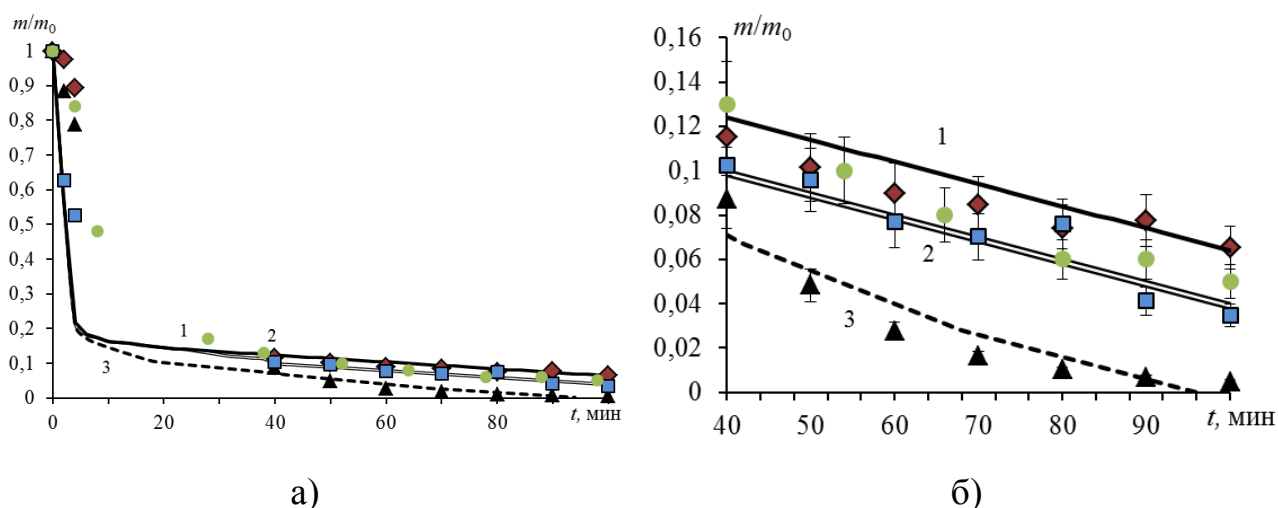


Экспериментальные точки: $\blacklozenge$ – без воздействия; $\bullet$ – воздействие с частотой 2,4 кГц; $\blacksquare$ – воздействие с частотой 22 кГц; $\blacktriangle$ – воздействие с частотой 28 кГц

Рисунок 4.17 – Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} частиц аэрозоля 18 %-ного водного раствора глицерина от времени при воздействии акустического излучения различной частоты

Экспериментальные исследования эволюции аэрозоля при воздействии излучения с частотой 22 кГц показали, что воздействие ультразвука практически не меняет зависимость среднего диаметра от времени (рисунок 4.17), следовательно, если УЗ-воздействие и играет роль, то не за счет ускорения коагуляции (что для таких размеров частиц справедливо), а за счет механизма радиационного давления. Ультразвук с частотой 28 кГц способствует коагуляции частиц (рисунок 4.17, ▲).

Результаты по изменению концентрации аэрозоля приведены на рисунке 4.18.



Расчетные кривые: 1 – без воздействия; 2 – воздействие с частотой 22 кГц; 3 – воздействие с частотой 28 кГц. Экспериментальные точки: ◆ – без воздействия; ● – воздействие с частотой 2,4 кГц; ■ – воздействие с частотой 22 кГц; ▲ – воздействие с частотой 28 кГц

Рисунок 4.18 – Зависимость относительной концентрации аэрозоля 18 %-ного водного раствора глицерина от времени при воздействии акустического излучения различной частоты: а) $t = (0 \div 100)$ мин; б) $t = (40 \div 100)$ мин

Воздействие акустического излучения с частотой 22 кГц не приводит к заметному ускорению осаждения мелкодисперсного аэрозоля 18 %-ного водного раствора глицерина. Применение излучателя с частотой 28 кГц сокращает время осаждения, приблизительно, в 1,8 раза. Звуковая частота 2,4 кГц вообще не

сказывается на динамике концентрации аэрозоля, что следует как из эксперимента, так и из расчетов.

4.3 Эволюция твердофазных аэрозолей

4.3.1 Осаждение мучной пыли ультразвуковым воздействием

Экспериментальные исследования проводились при нормальных условиях окружающей среды, при частоте механических колебаний УЗ-излучателя – 28 кГц [83].

Аналогичные зависимости получены в экспериментах с распылением муки (рисунок 4.19). Рисунок 4.19 демонстрирует резкое (в два с половиной раза) увеличение характерного диаметра частиц на начальном этапе воздействия ультразвуком. При этом также быстро, за время 150 с, в два раза (от $0,8 \text{ г/м}^3$ до $0,4 \text{ г/м}^3$) уменьшается концентрация аэрозоля (рисунок 4.19 б). В контрольном эксперименте без акустического воздействия падение концентрации происходит гораздо менее значительно, всего на $0,1 \text{ г/м}^3$ (от $0,5 \text{ г/м}^3$ до $0,4 \text{ г/м}^3$) за это же время. Спустя 150 секунд влияние ультразвукового воздействия уменьшается и увеличение диаметра частиц составляет только 10-30 %. Очевидно, это связано с низкой концентрацией аэрозоля, менее $0,4 \text{ г/м}^3$.

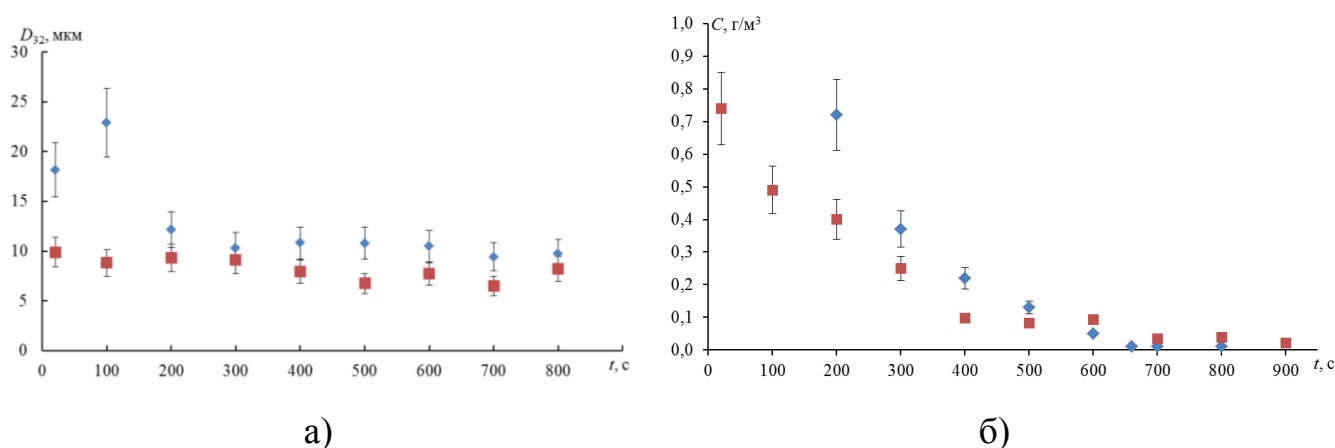


Рисунок 4.19 – Динамика изменения среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и концентрации частиц (б) мучной пыли со временем без УЗ-воздействия (■) и под действием ультразвука (◆)

По графику (рисунок 4.19 б) видно, что под действием ультразвука аэрозоль осаждается через 10,5 минут, без УЗ-воздействия – спустя 15 минут. Таким образом, в экспериментах установлено, что ультразвуковые колебания воздействуют на твердофазные аэрозоли наиболее эффективно при концентрациях частиц более $0,4 \text{ г/м}^3$.

По сравнению с исходной массой распыленной муки при измерении наблюдается меньшая концентрация, объясняется это тем, что в процессе распыления большая часть мучной пыли сразу же оседает на дне и стенках экспериментальной камеры.

По окончании эксперимента с ультразвуком были сделаны фотографии внутренних стенок камеры (рисунке 4.20).



Рисунок 4.20 – Фотографии стенки экспериментальной камеры после воздействия ультразвуком на распыленную мучная пыль

Хорошо заметно, что распыленная мука оседает на стенках экспериментального объема в виде полос в местах пучности стоячей волны, где и наблюдается максимальная плотность осевшей мучной пыли.

4.3.2 Осаждение дыма ультразвуковым воздействием

Приведем результаты экспериментальных исследований твердофазного аэрозоля с частицами сажи (дым). Дым создавался с помощью ароматических палочек. В опытах варьировался характерный диаметр частиц конденсированной

фазы, $D_{32} = (2 \div 4)$ мкм. Технология проведения опытов аналогична технологии, использованной в опытах с жидкокапельным аэрозолем. В эксперименте включали УЗ-излучатель с частотой 28 кГц.

Рассмотрим результаты типичного опыта с частицами сажи (дым). Зависимости размеров и концентрации частиц от времени приведены на рисунке 4.21. Анализ результатов показал, что скорость осаждения аэрозоля при УЗ-воздействии незначительно увеличивается (рисунок 4.21 б), что удовлетворительно согласуется с экспериментальными и теоретическими данными других авторов [36, 40, 51].

Средний объемно-поверхностный диаметр частиц дыма под действием ультразвука имеет направленность к увеличению (рисунок 4.21 а), но для частиц дыма этот эффект не так явно выражен, как для более крупнодисперсных аэрозолей муки и воды в аналогичных опытах.

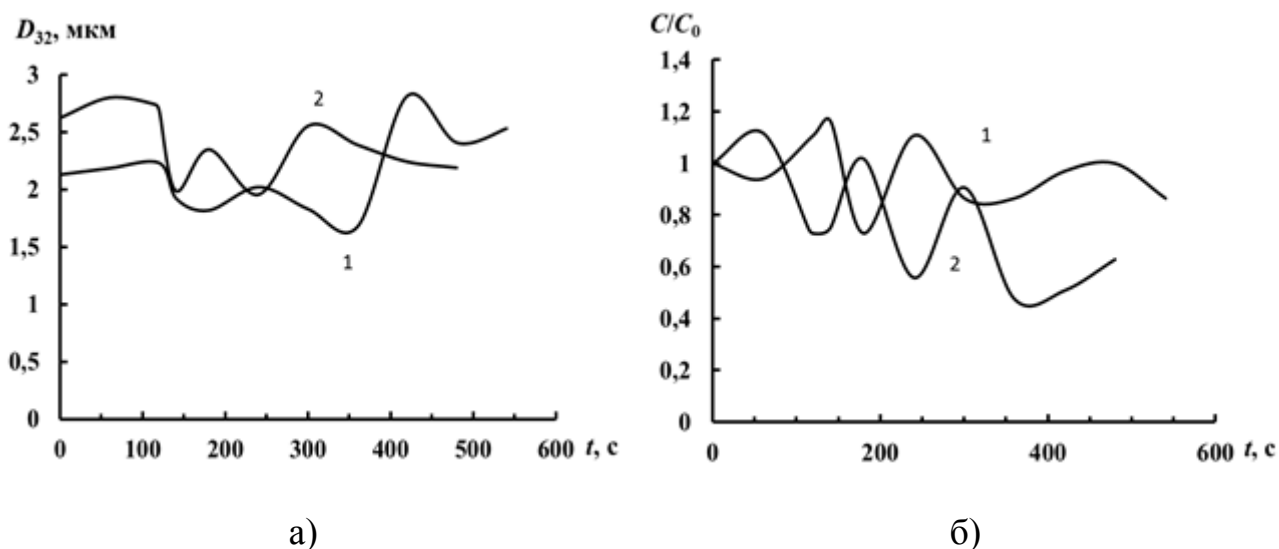


Рисунок 4.21 – Динамика изменения среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и концентрации частиц (б) дыма со временем без УЗ-воздействия (1) и под действием ультразвука (2)

Отмеченные в опытах осцилляции размеров и концентрации частиц твердой фазы обусловлены неравномерностью распределения дыма по объему аэрозольной камеры (в виде слоистых структур), а также процессами коагуляции.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что для увеличения скорости осаждения дымов необходимо применять другие способы, в том числе в сочетании с УЗ-воздействием. Способом интенсификации осаждения является введение дополнительной жидкой фазы в твердофазный аэрозоль – «орошение» с помощью мелкодисперсного жидкокапельного аэрозоля. Анализ указанного способа и выбор оптимальной дисперсности дополнительной фазы осуществлен по результатам серии экспериментов [101].

4.4 Взаимодействие жидкокапельных и твердофазных частиц в аэрозоле

4.4.1 Осаждение дыма при введении дополнительной фазы

Способ интенсификации осаждения путем введения в твердофазный аэрозоль жидкой фазы исследовался при следующих условиях. Масса дыма в экспериментах составила ~ 20 г. Создавался дым, как было описано в п. 4.3.2. В аэрозольную камеру с помощью ультразвуковых ингаляторов «Муссон-2» или пульверизатора дополнительно инжесктировалась вода, масса воды составила 6 г. В случае ингаляции воды размер капель варьировался в диапазоне $D_{32} = (1 \div 5)$ мкм; в случае пульверизации $D_{32} = (30 \div 40)$ мкм.

На рисунке 4.22 показаны зависимости от времени относительной концентрации дыма при отсутствии (кривая 1) и с введением дополнительной фазы (водного аэрозоля) различной дисперсности (кривые 2-4), в том числе при УЗ-воздействии (кривая 4). Выявлено, что крупнодисперсные водные капли не интенсифицируют процесс осаждения дыма. Капли мелкодисперсного размера, наоборот, очень ускоряют осаждение. Наибольший эффект интенсификации осаждения смеси аэрозолей отмечен при воздействии ультразвуком.

Полученный результат удовлетворительно согласуется с данными, приведенными в [102], где указано, что частицы с размером порядка десятков нанометров стремятся к агрегации и отличаются высоким поверхностным натяжением (поверхностной активностью).

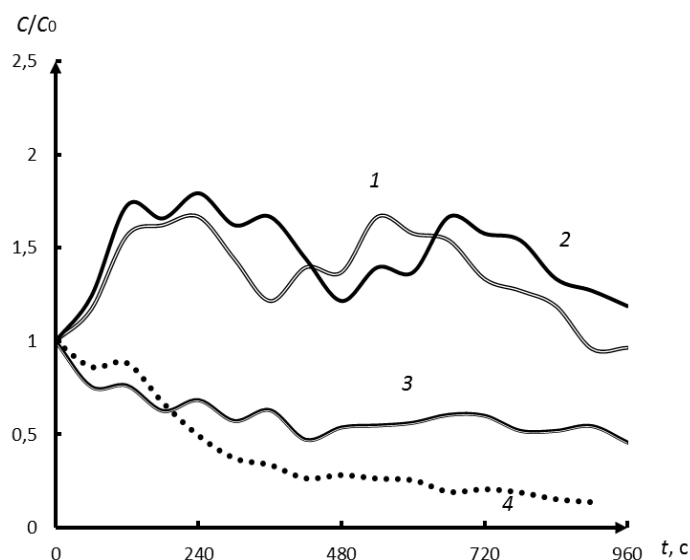


Рисунок 4.22 – График зависимости относительной концентрации дыма от времени с предварительным введением водного аэрозоля различной дисперсности и ультразвуковым воздействием: 1 – дым без воздействий; 2 – дым и крупнодисперсный водный аэрозоль; 3 – дым и мелкодисперсный водный аэрозоль; 4 – дым и мелкодисперсный водный аэрозоль под действием ультразвука

Эффект интенсификации осаждения мелкодисперсного аэрозоля можно объяснить тем, что введение дополнительной мелкодисперсной фазы существенно увеличивает счетную концентрацию частиц, чего не выявлено при введении крупнодисперсной дополнительной фазы с аэрозолем той же массы. Прямая пропорциональная зависимость связывает вероятность столкновения $K(D, D_1)$ частиц аэрозоля и счетную концентрацию этих частиц, следовательно, с увеличением количества частиц в единице объема коагуляция и осаждение аэрозоля ускоряется. «Орошение» твердофазного аэрозоля с помощью дополнительного жидкокапельного аэрозоля приводит к увеличению числа частиц, что и способствует интенсификации осаждения.

На рисунке 4.23 показаны экспериментальные и теоретические данные, рассчитанные по модели, представленной в главе 3.

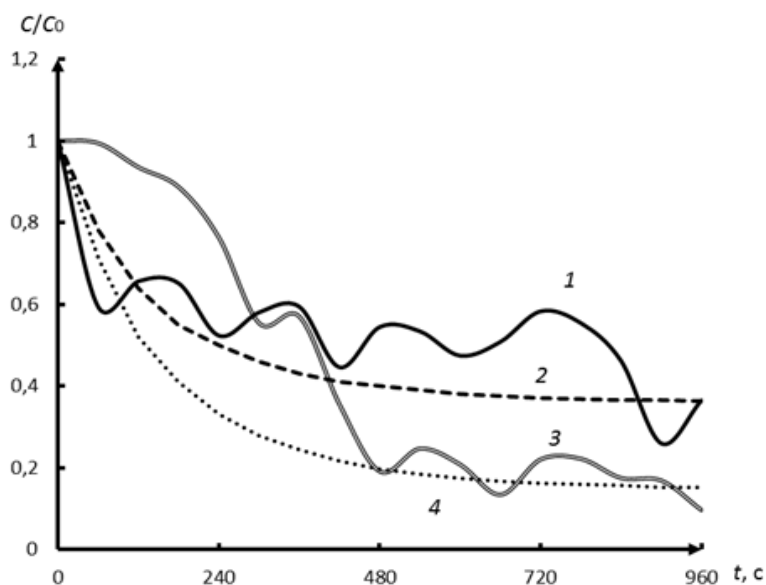


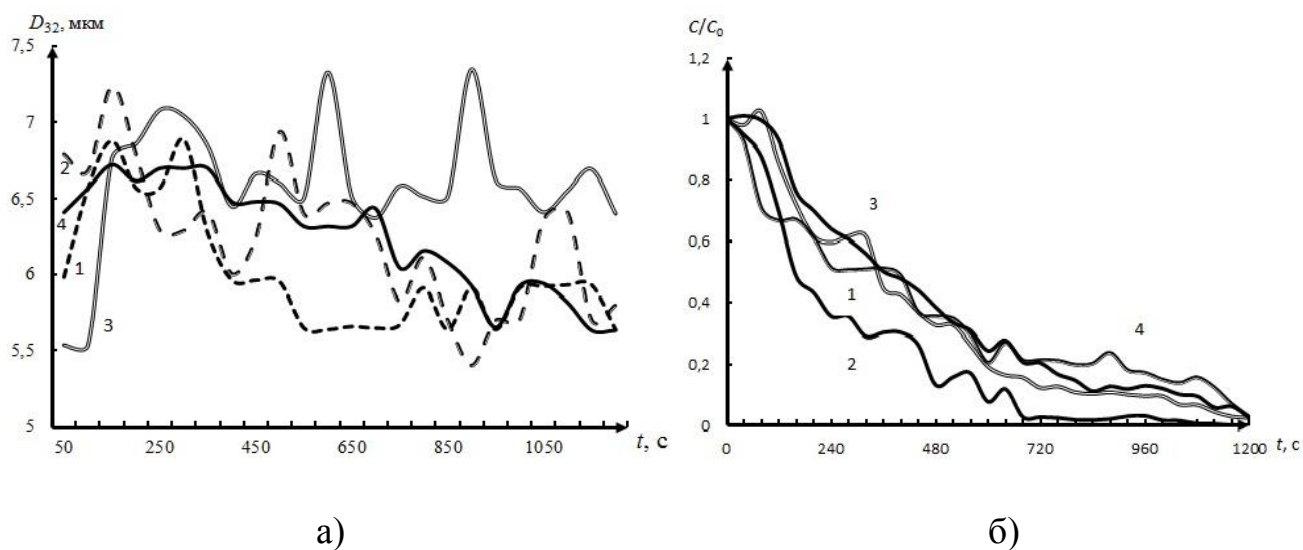
Рисунок 4.23 – График зависимости относительной концентрации дыма от времени с предварительным введением мелкодисперсного (2-4 мкм) водного аэрозоля без УЗ-воздействия (1, 2) и под действием ультразвука (3, 4): кривые 1, 3 – экспериментальные данные; линии 2, 4 – расчетные данные

Экспериментальные исследования показывают, что ультразвук незначительно влияет на процесс осаждения дыма, но введение в аэрозоль дополнительной мелкодисперсной фазы ускоряет осаждение аэрозоля, способствуя коагуляции, что подтверждается результатами расчетов. Полученный результат имеет практическое значение для разработки технологий, предназначенных для очистки производственных и жилых сооружений от дыма.

4.4.2 Осаждение угольной пыли при введении дополнительной фазы

Экспериментальные исследования с угольной пылью проводились аналогично предыдущим экспериментам. Акустическое поле, воздействующее на аэрозоль, создавалось с помощью УЗ-излучателя с рабочей частотой 28 кГц, с уровнем звукового давления – не менее 144 дБ. На рисунке 4.24 представлены зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации (б) частиц угольной пыли от времени с введением дополнительной

жидкокапельной фазы разной дисперсности. Из рисунка 4.24 а видно, что диаметр частиц за все время эксперимента существенно не меняется. Дополнительное введение жидкокапельного аэрозоля в облако угольной пыли практически не влияет на процесс осаждения, правда в начальный момент времени в случае введения крупнодисперсной воды заметен всплеск концентрации (рисунки 4.24 б, кривая 3).



1 – без воздействий; 2 – под действием ультразвука;

3 – введение крупнодисперсного водного аэрозоля (30-40 мкм);

4 – введение мелкодисперсного водного аэрозоля (2-4 мкм)

Рисунок 4.24 – Зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра (а) и относительной концентрации (б) угольной пыли от времени при добавлении водного аэрозоля разной дисперсности

Экспериментальные исследования с угольной пылью показали, что средний объемно-поверхностный диаметр частиц за все время наблюдения практически не менялся, составлял около 6-7 мкм (как и в исходном состоянии), что подтверждает отсутствие коагуляции частиц. Осаждение угольной пыли происходит через 20-30 минут, что характерно для частиц такой плотности и диаметра, которые оседают под действием гравитационных сил. Скорость осаждения угольной пыли увеличивается примерно в два раза под действием

ультразвука с частотой, как было замечено в экспериментах с дистиллированной водой.

Установлено, что введение мелкодисперсного водного аэрозоля не влияет на процесс осаждения тяжелых и более крупных частиц угольной пыли, что подтверждается результатами теоретических расчетов.

4.5 Рекомендации по размещению в помещении ультразвуковых излучателей в целях осаждения аэрозоля

Как было показано в главе 3, ведущим механизмом при осаждении мелкодисперсных аэрозолей, особенно при невысоких концентрациях, является радиационное давление (а не коагуляция). Поэтому располагаться излучатели должны по направлению вниз, либо под углом, но так, чтобы одна из проекций вектора УЗ-воздействия совпадала с вектором силы тяжести.

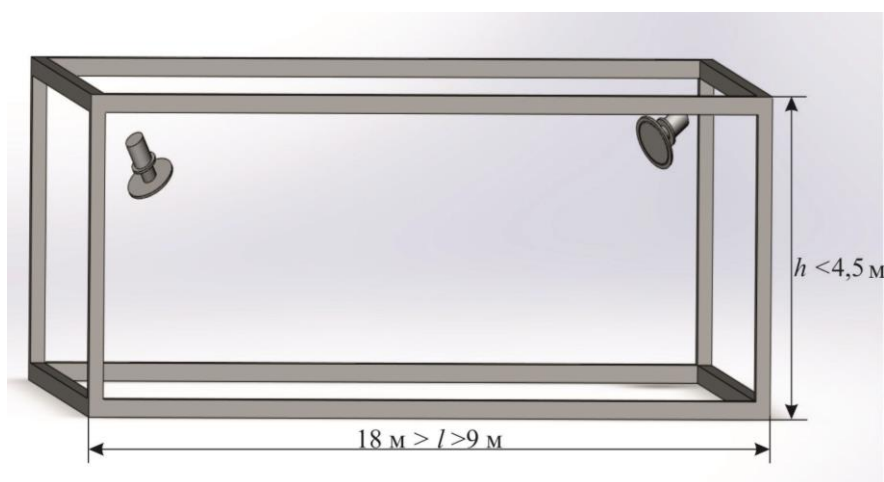
Необходимо учитывать: диаметр охвата пространства УЗ-воздействием составляет, приблизительно, 4,5 м (с интенсивностью 120 дБ и более) [103].

Поскольку особенностью конструкции используемых в работе дисковых излучателей является двухстороннее излучение УЗ-колебаний, зона над диском также охватывается воздействием. При расположении диска близко к потолку помещения верхняя часть акустического поля будет отражаться от потолка и перенаправляться вниз. Процессы отражения и переотражения неизбежно будут присутствовать в помещении, но для целей осаждения аэрозолей это положительное явление: формируемое в результате акустическое поле будет более равномерное по амплитуде. Следует учитывать, что при этом часть аэрозоля будет осаждаться не на полу, а на стенах помещения (за счет радиационного давления, которое в случае переотражения будет частично направлено не вниз, а к стенкам).

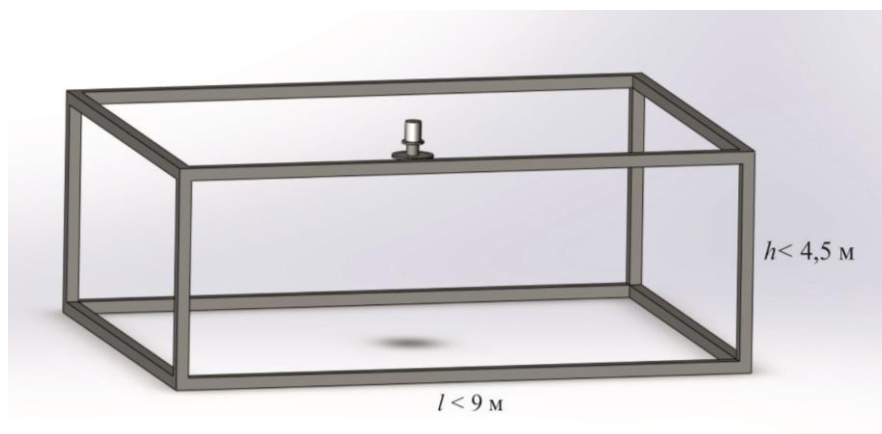
При осаждении аэрозолей с характерным диаметром частиц, менее 10 мкм, следует отдать предпочтение УЗ-излучателям с частотой 32 кГц (максимальная частота из серии разработанных излучателей с требуемым уровнем амплитуды из

имеющихся на рынке). Излучатели, работающие на более низких частотах, в том числе, на звуковых, также производят эффект за счет радиационного давления, но эффектов ускорения коагуляции в этом случае не будет наблюдаться, кроме того, их использование (амплитуда 120 дБ и выше) небезопасно для людей и животных, в отличие от ультразвука, не слышимого ухом.

Учитывая вышесказанное, предлагаемые схемы размещения излучателей (рисунок 4.25) будут зависеть от размеров помещения. Основной принцип – размещение на расстоянии не более 9 м, направление – вниз (или под углом вниз) под потолком. Для небольшого помещения (рисунок 4.25 а) достаточно одного излучателя. В большом помещении (длина/ширина > 9 м, рисунок 4.25 б) излучатели целесообразно поставить под углом ($\sim 45^\circ$) в ребрах на потолке. При этом серия переотражений приведет к созданию более равномерного акустического поля внутри помещения с рабочей амплитудой, не менее 120 дБ. Если высота помещения превышает 4,5 метра, амплитуда поля на расстоянии, превышающем эту высоту, будет ниже 120 дБ и эффективность воздействия снижается. Тем не менее при размещении излучателей на потолке радиационное давление достаточно быстро прижмет аэрозоль к полу, способствуя гравитационному осаждению. В любом случае, излучение с максимально высокой частотой будет способствовать коагуляции частиц аэрозоля (при любом размещении излучателя).



а)



б)

а) длина (ширина) помещения не более 9 м, высота не более 4,5 м; б) длина (ширина) помещения более 9 м, но менее 18 м, высота не более 4,5 м

Рисунок 4.25 – Примерные схемы размещения излучателей

4.6 Рекомендации по использованию распылителей дополнительной дисперсной фазы в целях осаждения аэрозоля

При низких концентрациях и малых размерах частиц ($D_{32} < 10 \text{ мкм}$) аэрозоля, который требуется осадить, как было показано в главе 3, использование мелкодисперсной дополнительной фазы способствует более быстрому осаждению. При этом, чем выше дисперсность дополнительной фазы и чем выше расположен распылитель, тем лучше эффект. О влиянии дисперсности дополнительной фазы было подробно сказано в главе 3: главная идея заключается в увеличении количества центров коагуляции, а их (при одной и той же массе распыляемого вещества) тем больше, чем выше дисперсность. Второе достоинство малых размеров частиц дополнительной фазы – легкость их распространения в пространстве за счет эффектов конвективной диффузии. Крупные частицы быстро увлекаются гравитационным полем вниз, но мелкие (10 мкм и меньше) – могут распространяться, в том числе, и вверх. В любом случае, следует размещать распылитель выше, ближе к потолку помещения. Если распылитель помещен рядом с УЗ-излучателем, то совместное действие второй фазы и акустического поля наиболее эффективно. Поэтому при проектировании

размещения распылителей можно следовать тем же рекомендациям, которые были сделаны для размещения излучателей (п. 4.5).

Выводы по четвертой главе

1. Используя оптические методы измерения характеристик дисперсности и концентрации аэрозолей во времени, установлено, что воздействие ультразвуком увеличивает скорость коагуляции и осаждения частиц как твердофазных, так и жидкофазных аэрозолей. При этом существенно увеличивается время седиментации аэрозоля воды даже незначительном снижении температуры (на десять градусов).

2. Влияние акустического излучения гораздо менее значительно на дымы с диаметром частиц около 2-4 мкм, в отличие от аэрозолей с более крупными частицами. Поэтому нужно рассматривать иные способы осаждения дыма. В качестве такого способа предложено внесение дополнительной дисперсной фазы аэрозоля.

3. Экспериментально определена минимальная концентрация аэрозоля (таблица 3.1), при которой воздействие ультразвуком целесообразно. Полученные результаты (зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра частиц и концентрация частиц аэрозоля в процессе воздействия ультразвуком от времени) могут быть применены для проектирования оборудования газоочистки, в котором используется процесс коагуляции с помощью ультразвука высокой интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги выполненного исследования можно сформулировать основные достижения, полученные в ходе выполнения данной работы:

1. Предложена физико-математическая модель эволюции аэрозольного облака, в том числе состоящего из двух фаз, с учетом испарения мелких капель, коагуляции и осаждения; выявлены ведущие механизмы уменьшения массы аэрозоля под действием акустического излучения.

2. Рассмотрены механизмы осаждения мелкодисперсных аэрозолей под действием ультразвука: за счет коагуляции и за счет радиационного давления. Определен критерий смены ведущего механизма осаждения. Показано, что для аэрозолей с характерным диаметром частиц, менее 10 мкм, ведущим механизмом ультразвукового осаждения является радиационное давление.

3. Определены оптимальная и минимальная (неэффективная) частоты воздействия звукового поля в зависимости от характерного диаметра частиц аэрозоля с точки зрения повышения скорости коагуляции и осаждения. Показано, что звуковые частоты неэффективны при осаждении аэрозолей с характерным диаметром частиц, менее 10 мкм (оптимальная частота воздействия, порядка 30 кГц и более).

4. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена эффективность предварительного введения мелкодисперсного (с диаметром частиц около 2-4 мкм) водного аэрозоля и применения УЗ-воздействия для коагуляции аэрозолей.

5. Предложены рекомендации по оптимальному размещению в помещении источников акустического излучения и мелкодисперсного водного аэрозоля с целью эффективного осаждения вредных пылей и дымов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. –Л.: Гидрометеиздат. – 1985. – 272 с.
2. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 01.01.77. – М.: Стандартиформ, 2007. – 6 с.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 351 с.
4. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. – 158 с.
5. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1972. – 428 с.
6. Пискунов В.Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей [Текст]: монография. – Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. – 209 с.
7. Ивлев Л.С., Довгало Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
8. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей: курс лекций. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 227 с.
9. Архипов В.А., Шереметьева У.М. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность [Текст]: учеб. пособие. – Томск: ГТПУ, 2007. – 136 с.
10. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: пер с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
11. Кича Д.И., Гурова А.И., Дрожжина Н.А., Максименко Л.В. Гигиена труда и профилактика профессиональных заболеваний в отдельных отраслях промышленности: учеб. пособие. – М.: Изд-во РУДН, 1999. – 95 с. – ISBN 5-209-01004-X.
12. Виноградов М.И. Физиология трудовых процессов. – М.: Медицина, 1966. – 368 с.

13. Целуйко И.Г., Ермакова В.М. Условия труда рабочих, занятых первичной переработкой льняной тресты // Гигиена труда и охрана здоровья населения. – Минск. – 1974. – С. 129-131.

14. Кречковский Е.А. Гигиеническая оценка условий труда на льнокомбинатах // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – 1969. – № 12. – С. 5-8.

15. Красильщиков М.И., Филатов И.П., Щупакас Д.Е. Гигиена труда в легкой промышленности: справ. пособие. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 184 с.

16. Маленький В.П. К гигиенической характеристике условий труда и состояния здоровья работающих, перерабатывающих лен // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – 1969. – № 2. – С. 47-49.

17. Балиткова А.А. Влияние трехсменной работы на состояние некоторых физиологических функций организма текстильщиц // Гигиена, физиология и научная организация труда в текстильной промышленности. – Иваново. – 1967. – С. 12-15.

18. Объединенный комитет МОТ/ВОЗ по профессиональной гигиене. Серия тех. докладов ВОЗ № 354. – Женева: ВОЗ, 1969.

19. Величковский Б.Т. Фиброгенные пыли. Особенности строения и механизма биологического воздействия [Текст]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд. – 1980. – 159 с.

20. Летавет А.А., Хухрина Е.В. Борьба с пылеобразованием на производстве. – М.: Медицина, 1964. – 271 с.

21. Павленко А.А., Кудряшова О.Б., Барышникова Е.В., Титов С.С. Математическая модель влияния физических процессов в угольной пыли и влажности воздуха на ослабление оптического излучения // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая. – 2010. – Т. 276. – С. 136-142.

22. Гриф Б.В., Горчаков С.П. Охрана труда в угольной промышленности. – М.: Недра, 1988. – 351 с.

23. Рощин А.В. Промышленная пыль и ее гигиеническая характеристика. – М.: Медицина, 1976.
24. Руководство по профессиональным заболеваниям / Отв. ред. Н.Ф. Измерова. – М.: Медицина, 1983. – Т. 2. – 382 с.
25. Хухрина Е.В. Пневмокониозы и их профилактика [Текст] / Хухрина Е.В. Ткачев В.В. – М.: – 1968. – 408 с.
26. Бутковский В.А. Мельников Е.М. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производства (с основами экологии). – М.: Агропромиздат, 1989. – 464 с.
27. Гафнер Л.А. Организация мукомольного производства. – М.: Колос, 1984. – 159 с.
28. Ушков С.А., Шевляков В.В., Эрм Г.И., Чернышова Е.В., Буйницкая А.А., Козловская Т.В. Состояние иммунологической реактивности и аллергизации организма работников, подвергающихся воздействию мучной пыли // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. тр. – Минск: ГУ РНМБ, 2010. – Вып. 16. – С. 240-247.
29. Ушков С.А., Шевляков В.В., Эрм Г.И., Чернышова Е.В., Буйницкая А.А., Козловская Т.В. Характерные нарушения здоровья работников мукомольного производства // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. тр. – Минск: ГУ РНМБ, 2010. – Вып. 16. – С. 248-256.
30. Ушков С.А., Шевляков В.В., Эрм Г.И., Новицкая Т.В., Арбузов И.В., Буйницкая А.В., Чернышова Е.В., Козловская Т.В., Студеничник Т.С., Щурская Н.А. Гигиеническая оценка условий труда работников производства овсяной крупяной продукции // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. тр. – Минск: ГУ РНМБ, 2011. – Вып. 18. – С. 51-56.
31. Ужов В.Н. Борьба с пылью в промышленности. – М.: Госхимиздат, 1962. – 184 с.
32. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.

33. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 312 с.
34. H.S. Patterson, W. Cawood Phenomena in a Sounding Tube // Nature. – 1931. – V. 127, № 3209. – P. 667.
35. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 264 с.
36. Хмелев В.Н., Шалунова К.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – 228 с.
37. Чернов Н.Н. Акустические способы и средства осаждения взвешенных частиц промышленных дымов: дис ... докт. техн. наук. – Таганрог, 2004. – 308 с.
38. Чернов Н.Н. О сближении аэрозольных частиц за счёт сил гидродинамического взаимодействия в акустических полях // Известия ТРТУ. – 2002. – № 6. – С. 78-80.
39. Тимошенко В.И. К вопросу о расчете скорости взаимного гидродинамического дрейфа аэрозольных частиц в мощном звуковом поле // Акуст. ж. АН СССР. – 1971. – Т. 17, вып. 1. – С. 133-137.
40. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 303–309.
41. König W. Hydrodynamisch-akustische Untersuchungen. Über die Kräfte zwischen zwei Kugeln in einer schwingenden Flüssigkeit und über die Entstehung der Kundtschen Staubfiguren // Annalen der Physik und Chemie. – 1891. – Vol. 42, № 4. – P. 549-563.
42. O. Brandt, H. Freund, E. Hiedemann. Zur Theorie der akustischen Koagulation. – Kolloid.-Z. – 1936. – Vol. 77, № 1. – P. 103.
43. Clair H. W. St. Agglomeration of smoke, fog or dust particles by sonic waves // Industrial and engineering chemistry. – 1949. – Vol. 41, № 11. – P. 2434-2438.

44. Денисов А.С., Подольский А.А., Турубаров В.И. Об увлечении аэрозольных частиц в звуковом поле при числах Рейнольдса ≤ 1 // Акустический журнал. – 1965. – № 11, вып.1. – С. 146-155.
45. Тимошенко В.И. Исследование взаимодействия аэрозольных частиц в акустическом поле: дис ... докт. техн. наук. – Л., 1964. – 154 с.
46. Oseen C.W. The theory of liquid crystals // Trans. Faraday Soc. – 1933. – № 29. – P. 883-889.
47. Подольский А.А., Турубаров В.И. К теории сближения аэрозольных частиц в звуковом поле в стоксовском режиме обтекания // Акустический журнал. – 1966. – № 12, вып. 2. – С. 292.
48. Подольский А.А., Турубаров В.И. Расчет гидродинамического сближения аэрозольных частиц в звуковом поле в осееновском режиме обтекания // Акустический журнал. – 1967. – № 13, вып. 3. – С. 367-368.
49. King L.V. On the Acoustic Radiation Pressure on Shperes // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences. – 1934. – Vol. 147. – P. 212-240.
50. Борисов Ю.Я., Статников Ю.Г. К вопросу о потоках, возникающих в стоячей волне // Акустический журнал. – 1965. – № 11, вып. 1. – С. 35.
51. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Шалунова К.В. Теоретическое исследование процесса акустической коагуляции газодисперсных систем // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции, г. Бийск, БТИ АлтГТУ, 6-7 октября 2010 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. универ., 2010. – С. 222–227.
52. Пат. РФ 2069576 A62C2/00. Способ осаждения дыма / М.Н. Акимов, В.С. Звонов, С.В. Остах (С-Петербургский ун-т Гос. противопожарной службы). – № 5064421/12; заявлено 05.10.92; опубл. 27.11.1996.
53. Шалунова К.В. Повышение эффективности процесса коагуляции газодисперсных систем наложением ультразвуковых полей: дис ... канд. техн. наук. – Бийск, 2010. – 153 с.

54. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.
55. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука: монография в 3 томах. – Т. 1. Источники мощного ультразвука [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1967. – 379 с.
56. Агранат Б.А., Дубровин М.Н. Основы физики и техники ультразвука [Текст]. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
57. Efimov V.G. Gas-jet ultrasonic generators for NDT [Text] / V.G. Efimov, A.G Mitin.; Federal Research and Production Center ALTAI, Byisk, Russia. – 2001.
58. Ультразвуковой газоструйный излучатель [Текст]: пат. №1789301 Российская Федерация: МПК6 B06B1/20 / Хмелев В.Н., Митин А.Г.; заявитель НПО «Алтай». – №1789301; заявл. 02.01.1991; опубл. 23.01.1993, Бюл. № 20. – 3 с.: ил.
59. Хмелев В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве [Текст]. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
60. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука: монография в 3 томах. – Т. 2. Мощные ультразвуковые поля [Текст] / Под редакцией Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 268 с.
61. Фридман В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура [Текст] – М.: Машиностроение, 1967 – 212 с.
62. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: пер. с нем., 2 изд. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – Т. 2. – 726 с.
63. Гершгал Д.А., Фридман Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура [Текст]. – М.: Энергия, 1987. – 318 с.
64. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия, 1974. – 504 с.
65. Розенберг Л.Д. Применения ультразвука / Под редакцией Н.Н. Андреева. – М.: АН СССР, 1957. – 105 с.

66. Жуков С.Н. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение. – Минск: ООО «ФУАинформ», 2003. – 112 с.
67. Пьезокерамика из Волгограда [Текст]: каталог / ООО «Аврора–ЭЛМА». – 2004.
68. Damped acoustic transducers with piezoelectric drivers: пат. 4333028 США: МПК6 B06B1/06; G10K11/02; G10K11/00; H01L041/08 / Panton, Stanley (Канада) патентообладатель: Milltronics Ltd. (Канада) заявка: 243490 от 13.03.1981. Опубликовано: 01.06.1982. – 16 с.: ил.
69. Пажи Д.Г., Галустов В.С Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
70. Пажи Д.Г., Корягин А.А., Ламм Э.Л. Распыливающие устройства в химической промышленности. – М.: Химия, 1975. – 200 с.
71. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А. и др. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 207 с.
72. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Антонникова А.А. Физико-математическая модель динамики функции распределения частиц по размерам с учетом процессов коагуляции, испарения и осаждения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 1(17). – С. 81-90.
73. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 284 с.
74. Галкин В.А. Уравнение Смолуховского. – М.: Физматлит, 2001. – 336 с.
75. Лушников А.А., Пискунов В.Н. Три новые точно решаемые модели в теории коагуляции // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 267, № 1. – С. 132-136.
76. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Физико-математическая модель эволюции двухфазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 4 (20). – С. 87-94.

77. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А. Математическая модель эволюции аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 2. – С. 160-163.

78. Антонникова А.А., Кудряшова О.Б., Павленко А.А., Ворожцов Б.И. Об одной модели эволюции высокодисперсного жидкокапельного аэрозоля // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы VII Всероссийской конференции, г. Томск, ТГУ, 12-14 апреля 2011 г. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2011. – С. 64-65.

79. Антонникова А.А., Кудряшова О.Б., Павленко А.А., Ворожцов Б.И. Об одной модели трансформации субмикронного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сборник трудов XVII Международного симпозиума, г. Томск, ИОА СО РАН, 28 июня-1 июля 2011 г. [Электронный ресурс]. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № С19. – С. 69-72. – ISBN 978-5-94458-118-1.

80. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Математические модели коагуляции и осаждения аэрозольных систем // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: материалы Всероссийской научной конференции, г. Бийск, БТИ АлтГТУ, 22-23 сентября 2011 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 10-13.

81. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Васенин И.М. Физико-математическая модель испарения капель мелкодисперсных аэрозолей // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 129-132.

82. Antonnikova A.A., Korovina N.V., Kudryashova O.B. Sedimentation of Superfine Aerosol by Means of Ultrasound // Open Journal of Acoustics. – 2013. – V. 3, № 3A. – P. 16-20. – <http://www.scirp.org/journal/wja/>. – DOI:10.4236/oja.2013.33A004.

83. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р., Шалунова К.В., Хмелев В.Н. Экспериментальное исследование динамики дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом воздействии // Ползуновский вестник. – 2011. – № 4-1. – С. 176-180.

84. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А., Титов С.С. Физико-математическая модель коагуляции субмикронных аэрозолей с учетом испарения и осаждения при ультразвуковом воздействии // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 389-392.

85. Антонникова А.А., Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р. Исследование процессов трансформации аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XVIII Рабочей группы, г. Томск, ИОА СО РАН, 29 ноября-2 декабря 2011 г. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2011. – С. 35.

86. Антонникова А.А., Кудряшова О.Б. Исследование процессов эволюции двухфазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы докладов IV научно-технической конференции молодых ученых, г. Бийск, ИПХЭТ СО РАН, 27–28 сентября 2012 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2012. – С. 154-165.

87. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А., Коровина Н.В. Осаждение двухфазных аэрозолей под действием ультразвука // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XIX Рабочей группы, г. Томск, ИОА СО РАН, 27-30 ноября 2012 г. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. – С. 39.

88. Стретт Дж.В. (лорд Рэлей) Теория звука: пер. с англ. – 2 изд. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – Т. 2. – 476 с.

89. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. – 403 с.

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

91. Антонникова А.А., Кудряшова О.Б., Хмелев М.В., Шалунов А.В. Исследование эффективности применения ультразвуковых колебаний для

осаждения мелкодисперсных аэрозолей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 6. – С. 96-99.

92. Pavlenko A., Kudryashova O., Vorozhtsov B., Titov S., Akhmadeev I., Muravlev E. Modified Method of Optical Diagnostics of Aerosol Media // <http://www.pim-journal.org/paperInfo.aspx?ID=12>. – Precision Instrument and Mechanology. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – ID12.

93. Пат. 2441218 RU, МКИ G01N 15/02. Способ определения дисперсности и концентрации частиц в аэрозольном облаке / В.А. Архипов, А.А. Павленко, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова, С.С. Бондарчук. – № 2010143653; заявлено 25.10.2010; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 10 с.

94. Ахмадеев И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: дис ... канд. тех. наук. – АлтГТУ – Бийск, 2008. – 98 с.

95. Kudryashova O.B., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S. A Method for Laser Measurement of Disperse Composition and Concentration of Aerosol Particles. – Key Engineering materials. – 2010. – Vol. 437. – P. 179-183.

96. Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р., Павленко А.А., Архипов В.А. Лазерный метод измерений дисперсного состава и концентрации частиц облака продуктов сгорания: сборник материалов XIV Симпозиума по горению и взрыву. – Черноголовка: ИПХФ РАН, 2008. – С. 105.

97. Ахмадеев И.Р. Модифицированный метод малоуглового рассеяния для измерения дисперсности аэрозольных частиц // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы V Всероссийской научной конференции. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2006. – С. 55-56.

98. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б., Ахмадеев И.Р. Экспериментальное исследование процессов трансформации аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 7. – С. 650-652.

99. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвуковое осаждение мелкодисперсного аэрозоля // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 324, № 2. – С. 57-62.

100. Кудряшова О.Б., Антонникова А.А., Коровина Н.В., Ахмадеев И.Р., Титов С.С. Экспериментальные исследования эволюции мелкодисперсного аэрозоля растворов глицерина // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/3. – С. 181-184.

101. Antonnikova A.A., Kudryashova O.B., Shalunova K.V. Application of Ultrasound to Settle submicron Aerosols // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices «EDM 2012»: Conference Proceeding, Altai, 2-6 July 2012. – Novosibirsk: NTSU publishing office, 2012. – P. 87-89. – ISBN 978-5-7782-1980-9.

102. Научные основы нанотехнологий и новые приборы: учебник-монография / Под ред. Р. Келсалла, А. Хэмли, М. Георгегана; пер. с англ. А.Д. Калашникова. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 528 с. – ISBN 978-5-91559-048-8.

103. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые колебательные системы большой мощности / В.Н. Хмелев, С.В. Левин, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – Р. 293–298.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт использования



МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

**Бийский технологический
институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ)**

ул. Трофимова, 27, г. Бийск, 659305
тел. (3854) 432285, факс: (3854) 435300

E-mail: info@bti.secna.ru
<http://www.bti.secna.ru>

« _____ » 2014 г. № _____
об использовании результатов диссертационной
работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора по научной работе
Бийского технологического
института (филиала) АлтГТУ
д.т.н., профессор

 Хмелев В.Н.
« 4 » / мая 2014 г.

Акт

**использования результатов диссертационной работы
Антонниковой Александры Александровны
«Осаждение аэрозолей с помощью акустического излучения и
дополнительной дисперсной фазы»**

Комиссия в составе: декана факультета информационных технологий, автоматизации и управления (ФИТАУ) БТИ (филиала) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», д.ф.-м.н., профессора Галенко Ю.А., д.т.н., доцента Шалунова А.В., начальника лаборатории акустических процессов и аппаратов, к.т.н., доцента Цыганка С.Н., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Антонниковой А.А. используются в учебном процессе факультета информационных технологий, автоматизации и управления БТИ АлтГТУ в виде разделов курсов лекций и лабораторных работ в дисциплине «Методы неразрушающего контроля» для студентов специальности 200100.62 «Приборостроение».

Научные положения диссертационной работы послужили основой для исследования эволюции дисперсного состава частиц, при проведении серии экспериментов по ультразвуковому воздействию на аэрозольные среды.

Члены комиссии:  д.ф.-м.н., профессор Галенко Ю.А.

 д.т.н., доцент Шалунов А.В.

 к.т.н., доцент Цыганок С.Н.



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

659322, г.Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1
т.(3854) 305-955, ф. 303-043, 301-725, e-mail: admin@ipcet.ru
ОКПО 10018691, ОГРН 1022200571051, ИНН 2204008820,
КПП 220401001

Исх. № 15365-205-2528 от 15.05.2014
На № _____ от _____



Директор ИПХЭТ СО РАН, профессор

С.В. Сысолятин

«15» мая 2014 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Антонниковой Александры Александровны

Комиссия в составе: ученого секретаря ИПХЭТ СО РАН, к.т.н. Титов С.С., зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Павленко А.А., с.н.с., к.т.н. Муравлева Е.В., рассмотрев материалы кандидатской диссертации Антонниковой А.А., установила, что результаты исследований использовались в рамках проекта: V.40.1.1 «Физико-математические основы эффективного преобразования энергии горения и взрыва новых высокоэнергетических материалов для автономной генерации ударно-акустических волн, высокодисперсных аэрозольных сред и развитие методов их диагностики» (2010-2012 гг.) по приоритетному направлению 5.5 «Химические аспекты энергетики: фундаментальные исследования в области создания новых химических источников тока, разработки технологий получения топлив из нефтяного и возобновляемого сырья, высокоэнергетических веществ и материалов» и проекта фундаментальных исследований СО РАН V.49.1.4: «Разработка теоретических основ, методов и высокотехнологичных средств преобразования энергии высокоэнергетических материалов (ВЭМ) для генерации пространственно-распределенных полей субмикронных и наноразмерных частиц со специальными контролируруемыми свойствами с целью дезактивации опасных химических агентов с одновременным дистанционным обнаружением и идентификацией опасных веществ» (2013-2016 гг.) по приоритетному направлению V.49 «Фундаментальные исследования в области химии и материаловедения в интересах обороны и безопасности страны», а также в ряде хоздоговорных НИР.

Члены комиссии:

С.С. Титов

А.А. Павленко

Е.В. Муравлев