

На правах рукописи

Кудряшова Ольга Борисовна

**ГЕНЕЗИС АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ РАСПЫЛЕНИИ
И УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2012

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре прикладной аэромеханики и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН).

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор **Васенин Игорь Михайлович**

Официальные оппоненты:

Глазунов Анатолий Алексеевич

Доктор физико-математических наук, профессор, научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, директор

Воеводин Анатолий Федорович

Доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прикладной и вычислительной гидродинамики, главный научный сотрудник

Павловец Георгий Яковлевич

Доктор технических наук, профессор, федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого" Министерства обороны Российской Федерации, старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск**

Защита состоится «29» марта 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан "31" января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Юрий Федорович Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях актуальной является задача создания аэрозолей для нужд пожаротушения, дезинфекции, дезактивации, барьеров на пути распространения токсичных газов¹, нелетального оружия², создания средств для ингаляции в медицине³ и т.п. При этом, чем выше дисперсность получаемых аэрозолей, тем лучше достигаемый эффект, поскольку высокая удельно-массовая поверхность капельного объема дает большую суммарную площадь испарения мелких капель, что повышает скорость воздействия химических агентов. Таким образом, большой практический интерес представляют аэрозоли с характерным размером частиц порядка одного микрона и менее, причем в ряде задач требуется быстрое получение таких аэрозолей. Эта проблема до сих пор не была решена.

Уже более сотни лет практически важной остается проблема осаждения промышленных пылей, дымов и туманов (в цехах, на мельницах и других промышленных объектах). Отдельно следует отметить все развивающееся производство наноразмерных порошков, аэрозоль которых является особенно токсичным и взрывоопасным. Экологическая обстановка на таких производствах уже не соответствует нормативам, определяющим уровень экологической безопасности людей. При этом с ускорением темпов жизни, производства, увеличением числа техногенных опасностей становится все более актуальной задача создания быстрых, практически мгновенных способов реагирования на возникшую угрозу.

Вопросам уменьшения промышленных выбросов в атмосферу в настоящее время уделяется значительное внимание. Однако создание высокоэффективных схем осаждения пылевых частиц со степенью улавливания 99,0 - 99,9 % затруднено из-за ограничений физического плана: резко снижается эффективность пылеулавливания мельчайших микронных и субмикронных частиц, доля которых в связи с интенсификацией производства постоянно возрастает. Возникает необходимость применения новых способов борьбы с вредными выбросами, например, распылением

¹Мальшев В. И. Концепция комплексной маскировки и сохранения объектов, существенно необходимых для устойчивого функционирования экономики и выживания населения в военное время. (проект): сб. материалов центра стратегических исследований гражданской защиты. – Вып. 14. – М.: ЦСИ ГЗ МЧС России, 1999. – С. 53-74.

²Буренок В.М., Корчак В.Ю., Смирнов С.С. Оружие нелетального действия – составная часть системы вооружения будущего // Вестник академии военных наук. 2007. – № 4. – С. 117 – 127.

³Онищук А.А., Толстикова Т.Г., Сорокина И.В., Бакланов А.М., Карасев А.А., Болдырев В.В., Фомин В.М. Эффект наночастиц индометацина при осаждении в легких (получение наноразмерных аэрозольных форм слаборастворимых в воде лекарственных препаратов) // Ж. Доклады АН. – 2009. – Т. 425, № 5. – С. 692-695.

специальных адсорбирующих высокодисперсных аэрозолей, созданием акустических или электрических полей, либо комбинация подобных методов.

При создании аэрозолей серьезную проблему представляет эффективность распыливания жидкостей, поскольку только небольшая часть энергии расходуется на образование капель, большая ее часть переходит в кинетическую энергию потока. Чем меньше требуемый диаметр образуемых частиц, тем меньше эффективность распыливающих устройств. В частности, для получения капель воды диаметром 20 микрон эффективность традиционных распылителей (пневматических и центробежных форсунок и т.п.) составляет менее 1 %. Поэтому для обеспечения решения описанных задач получения жидкокапельных аэрозолей необходимы новые методы, основанные на более эффективных механизмах распыления.

Этим целям и задачам соответствует метод ударно-волнового (импульсного) распыливания жидкостей, отличающийся высокой скоростью образования облака аэрозоля. Потребности практики разработки распылителей ударно-волнового типа приводят к необходимости исследований закономерностей импульсного распыла; также важной является задача изучения дальнейшей эволюции получаемых аэрозолей, влияния физико-химических свойств распыливаемого материала, условий распыления, конструктивных особенностей генератора аэрозолей на параметры, характеризующие эффективность целевого процесса: ингаляция в медицине, осаждение дыма при пожаре или создание маскирующей завесы.

Использование высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в качестве энергоносителя в распылителях импульсного типа имеет ряд преимуществ, поскольку ВЭМ позволяют получать достаточно энергии за короткий промежуток времени, при этом ВЭМ занимают небольшой объем, что дает возможность автономного конструкторского исполнения распылителей. Преимущества ВЭМ существенны при применении таких устройств в системах создания аэрозолей, хотя имеются и недостатки в виде специфики работы с ВЭМ. Другим возможным источником импульсного воздействия на распыливаемую среду является сжатый газ.

В институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН⁴ проводилось построение обобщённой модели и экспериментальные исследования процессов импульсного диспергирования жидких объемов. В работах автора предложена схема взрывного распыливания на основе ударной гидродинамической трубки с нагружающим зарядом ВЭМ, где достигается более высокая степень диспергирования с максимально полным

⁴Кедринский В.К. Газодинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 435 с.

расходом жидкости. Проведение комплексного исследования в области взрывного распыливания жидкостей с учетом не только воздействия ударных волн на диспергируемую среду для условий гидродинамической трубки, но также взаимодействия полученного облака мелкодисперсных капель с внешней средой, безусловно, является актуальным, так как позволит выявить основные закономерности образования и эволюции дисперсной фазы, развить теорию взрывного диспергирования жидкостей, способствовать повышению эффективности распыления жидкостей разрабатываемыми импульсными устройствами.

Взрывной механизм образования жидкокапельных сред чрезвычайно сложен и характеризуется большим числом параметров, которые определяются как свойствами дисперсной фазы, так и свойствами внешней среды; анализ этих процессов невозможен без понимания физической сущности диспергирования жидкости. К тому же взрывной способ распыливания имеет ряд особенностей, таких как малое время образования аэрозольного облака, высокая скорость истечения жидкости (при критических числах Вебера), нестационарность процессов образования и развития аэрозоля в условиях испарения, полидисперсность распыления, требующих разработки и внедрения новых методик и методов для проведения экспериментального и теоретического исследования. Недостаточно изученными являются вопросы, связанные с описанием динамики облаков микронных и субмикронных капель, где необходимо взаимосвязано рассматривать процессы испарения, осаждения и коагуляции капель с учетом физико-химических свойств распыливаемой жидкости и окружающей среды. Это представляет не только теоретический интерес, но и является важным при разработке практических приложений, в том числе, перечисленных выше.

Объектом исследования являются аэрозольные среды, полученные с помощью импульсной генерации, и дальнейшая их эволюция с учетом испарения, акустического воздействия и взаимодействия фаз.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование процессов генезиса аэрозолей, образующихся при распыливании жидкостей с помощью импульсного (ударно-волнового) воздействия, в том числе, процессов ультразвуковой коагуляции и осаждения.

Научная новизна. Проведены теоретические и экспериментальные исследования физики процессов сверхбыстрого получения аэрозолей на основе конверсии энергии ВЭМ. Создана новая теория импульсного распыливания жидкости и дальнейшей эволюции облака аэрозоля. Впервые

теоретически показана и экспериментально подтверждена роль кавитации в процессе взрывного распыления и ее влияние на параметры аэрозоля, установлен безразмерный критерий Wo , характеризующий эффективность кавитации. Получены закономерности, позволяющие определить необходимые характеристики аэрозоля от входных параметров распыления для различных принципиальных типов конструкций распылителя.

Сформулирована проблема генезиса жидкокапельного аэрозоля с частицами микронного и субмикронного размера. Определены и раскрыты новые закономерности импульсного распыления жидкости и дальнейшей эволюции полученного аэрозоля. Уравнения, описывающие коагуляцию аэрозолей, решены в оригинальной постановке (в безразмерном виде, с учетом испарения за счет развитого теплообмена с окружающей средой и уносом энергии с относительно большой поверхности капель, с учетом зависимости максимального диаметра частиц от пространственно-временных параметров облака). Установлены безразмерные критерии, характеризующие процесс эволюции облака аэрозоля: критерий Ku , характеризующий отношение скорости испарения к скорости седиментации, параметр To , показывающий степень зависимости для данного физико-химического состава капли скорости испарения от площади ее поверхности, и другие.

Предложен и теоретически обоснован набор экспериментальных методов, позволивших впервые провести весь комплекс исследований быстропротекающих процессов при взрывном диспергировании жидкостей, включающий определение дисперсных параметров частиц на основе регистрации эффектов рассеяния и затухания зондирующего излучения, измерение температурных полей и скоростную видеорегистрацию.

Теоретически и экспериментально показано, что применение мелкодисперсных жидкокапельных аэрозолей повышает эффективность коагуляции и осаждения твердофазных аэрозолей при ультразвуковом воздействии.

Исследование генезиса аэрозоля, полученного с применением ударно-волнового воздействия, имеет фундаментальное значение с точки зрения понимания и объяснения процессов импульсного диспергирования жидких сред и дальнейшей эволюции образованных аэрозолей, в том числе при наложении внешнего акустического поля.

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается корректностью постановки задач и их строгой физической обоснованностью; большим объемом полученных экспериментальных данных, их логической взаимосвязью, физической наглядностью, непротиворечивостью и воспроизводимостью; применением современной

измерительной техники, а также статистической обработкой и анализом погрешности измерений по общепринятым методикам. Достоверность методов расчета подтверждается удовлетворительным соответствием расчетных и экспериментальных данных.

Практическая ценность. Результаты проведенной работы могут найти применение для создания устройств распыления мелкодисперсных аэрозолей в целях пожаротушения, дезинфекции, осаждения вредных выбросов. Последнему варианту использования в работе уделено особое внимание: для осаждения твердофазных аэрозолей (пылей и дымов) предлагается использовать мелкодисперсный жидкокапельный аэрозоль дополнительно к уже известному в таких случаях применению ультразвуковых полей.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899): безопасность и противодействие терроризму, индустрия наносистем и материалов. Исследования проводились в рамках проектов фундаментальных исследований СО РАН 5.5.1.3 и 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».

Автор защищает:

1. Физико-математическую модель ударно-импульсного распыления жидкости. Определяющие генезис аэрозоля безразмерные критерии. Результаты численных расчетов влияния безразмерных параметров на характеристики распыла.
2. Экспериментальные методы и средства измерений для исследования параметров мелкодисперсных аэрозольных облаков в динамике. Результаты экспериментального исследования эволюции капель при импульсном распыливании жидкостей.
3. Принципы и методы инженерных расчетов импульсных распылителей и характеристик аэрозольных сред, получаемых с их помощью.
4. Физико-математическую модель коагуляции мелкодисперсных аэрозолей с учетом испарения, осаждения, воздействия акустического поля, взаимодействия фаз. Результаты численных расчетов влияния параметров дисперсной среды на эволюцию аэрозолей.
5. Закономерности влияния физических параметров аэрозолей (концентрации, дисперсности, физико-химических свойств частиц) и характеристик акустического поля (частоты, уровня звукового давления,

времени воздействия) на процесс акустической коагуляции. Определяющие безразмерные критерии.

6. Экспериментальные методы и средства исследования процесса коагуляции взвешенных частиц пылей и дымов.

7. Принципы построения, рекомендации по расчету и проектированию комбинированных устройств (импульсный генератор мелкодисперсного жидкокапельного аэрозоля и ультразвуковой источник) для повышения эффективности улавливания взвешенных частиц промышленных дымов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 7-й Международной конференции «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф» (Томск, 2008), XIV Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2008), Международной конференции NEMs (Белокуриха, 2009, Бийск, 2010, 2012, Ла Рошель, 2011), Международной конференции ISMTII-2009 (С-Петербург, 2009), Всероссийской научной конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов». (Новосибирск, 2009), Всероссийской конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (Бийск, 2010), XVII и XVIII Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2010, 2012), XVII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2011), Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2011), Всероссийской конференции «Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений» (Бийск, 2011).

Полностью диссертационная работа обсуждалась на Ученом совете ИПХЭТ СО РАН и научном семинаре кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 53 научные работы, в том числе 17 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов и изданий (в том числе 2 статьи в зарубежных журналах, входящих в системы цитирования РИНЦ, Scopus), 2 главы в зарубежных монографиях; получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в формировании научных идей, постановке задач и планировании исследований, разработке физико-математических моделей ударно-волнового распыления и дальнейшей эволюции облака аэрозоля, в постановке экспериментов, разработке методик проведения исследования, обработке и интерпретации полученных данных, подготовке публикаций и докладов на конференциях. Все основные

результаты диссертации получены автором лично либо при его непосредственном участии в качестве ведущего исполнителя на всех этапах исследований.

Автор выражает благодарность научному консультанту, д.т.н., проф. Васенину И.М. за внимание и постоянную помощь в работе, д.ф.-м.н., проф. В.А. Архипову (зав. отделом газовой динамики физики взрыва НИИ ПММ ТГУ) и д.ф.-м.н., проф. С.С. Бондарчуку (профессору Томского государственного педагогического университета) за обсуждение результатов работы и ряд критических замечаний, сотрудникам Бийского технологического института д.т.н. Хмелеву В.Н. и к.т.н. Шалунову А.В. за предоставленные источники ультразвука и ценные обсуждения результатов, а также коллективу лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН за помощь, оказанную в ходе проведения исследований.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 158 наименований, 29 из которых – зарубежные источники. Работа изложена на 257 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 97 рисунков, 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность проблемы и дана общая характеристика работы.

В первой главе «Методы генерации аэрозолей. Основные закономерности распыливания жидкостей» приведен обзор литературы, освещающей физику процессов распыливания жидких сред (п. 1.1, 1.2), показано влияние ударных нагрузок на диспергируемую среду (п. 1.1.2), изложено современное состояние проблемы взрывного распыливания (п. 1.3, 1.4). Описаны результаты исследования пространственного гидродинамического взаимодействия аэрозольных частиц в вязкой среде обтекания в звуковых полях (п. 1.5.3). Приведен обзор литературы по вопросам коагуляции аэрозолей (п. 1.5). Автором предложен подход к расчету вероятности столкновений частиц при ультразвуковой коагуляции аэрозолей (п. 1.5.4). Он заключается в определении ядра уравнения Смолуховского, исходя из ортокинетической гипотезы коагуляции аэрозолей под действием акустического поля. Рассмотрены варианты использования аэрозолей в технике (п. 1.6).

Вторая глава «Разработка новых методов исследования аэрозолей» посвящена модификации методов спектральной прозрачности (МСП) и малоуглового рассеяния (ММУ) для целей измерения дисперсного состава и концентрации частиц микронных и субмикронных аэрозолей в динамике. Протекающие процессы характеризуются высокой скоростью получения аэрозоля (импульсная генерация за доли секунды) и, иногда, высокой скоростью испарения и/или осаждения частиц. Поэтому к измерительным методам предъявляются высокие требования по скорости измерения исследуемых параметров. Измеряемые частицы могут быть размером от десятков нанометров до десятков микрометров, не допускается внесения возмущения в объект исследования.

Проведен сравнительный анализ методов измерения для решения задач исследования. Предложена модификация оптических методов измерения, соответствующие экспериментальные методики. Для измерения характеристик микронных и субмикронных аэрозолей в динамике с высокой скоростью без внесения возмущения в объект исследования предложена модификация метода спектральной прозрачности (МСП) и метода малоуглового рассеяния (ММУ) для бесконтактного дистанционного определения функции распределения частиц по размерам и концентрации конденсированной фазы аэрозолей.

Модификация метода спектральной прозрачности привела к созданию турбодиметрического высокоселективного метода (ТВСМ, измерительная установка «турбодиметрический измеритель параметров аэрозольных сред» – ТИПАС-1). Отличие в аппаратной реализации данного метода заключается в том, что используются спектрометр в качестве приемника излучения и широкополосный источник оптического излучения, работающий в видимом диапазоне спектра вместо лазеров с перестраиваемой длиной волны.

Для восстановления функции распределения частиц по размерам в ТВСМ применяется уравнение:

$$I(\lambda, t) = I_0(\lambda, t) \exp \left[- \frac{\pi C_n(t) l(t)}{4} \int_0^{\infty} Q \left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda) \right) D^2 f(D, t) dD \right],$$

где $I(\lambda, t)$ – интенсивность прошедшего через аэрозоль излучения; $I_0(\lambda, t)$ – интенсивность зондирующего излучения; C_n – счётная концентрация конденсированной фазы аэрозоля; $l(t)$ – длина оптического пути; $Q(\pi D/\lambda, m(\lambda))$ – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения; D – диаметр частиц; λ – длина волны зондирующего излучения; $m(\lambda)$ – комплексный показатель преломления конденсированной фазы

аэрозоля; $f(D, t)$ – функция распределения частиц по размерам. Чтобы решить задачу восстановления функции распределения частиц по размерам применяется экспериментальная информация о коэффициенте спектральной прозрачности, полученном в виде:

$$\tau_{\lambda}(t) = \ln \frac{I_0(\lambda, t)}{I(\lambda, t)}.$$

При этом величины $I_0(\lambda, t)$ и $I(\lambda, t)$ получают путём прямых измерений в широком диапазоне длин волн. Далее осуществляется расчёт ансамбля значений коэффициентов спектральной прозрачности для различного вида функции распределения частиц по размерам и проводится сравнение экспериментально полученных данных с теоретически найденными. По минимальной величине отклонения результатов эксперимента от расчётной величины делается выбор вида функции распределения частиц по размерам. Все расчёты выполняются в строгом соответствии с теорией Ми.

Модификация метода малоуглового рассеяния основана на алгоритме прямого поиска для определения функции распределения частиц по размерам путем решения серий прямых задач оптики аэрозолей, что позволило отказаться от решения некорректных задач оптики светорассеяния при восстановлении функции распределения частиц по размерам по измеренной малоугловой индикатрисе рассеяния (измерительная установка «лазерный измеритель дисперсности» – ЛИД-2М).

Для определения концентрации частиц в облаке применяется модифицированный метод спектральной прозрачности. Физическая модель метода основана на взаимодействии монохроматического излучения с полидисперсной средой по механизму Ми. По экспериментально измеренной величине оптической толщи τ и расчетным значениям усредненного фактора эффективности ослабления излучения $Q(D_{32}, \lambda, m)$ определяется массовая концентрация частиц по формуле:

$$c_m = \frac{\tau \cdot \rho \cdot D_{32}}{1,5 \cdot l \cdot Q(D_{32}, \lambda, m)},$$

где ρ – плотность частиц, l – оптическая длина зондирования, D_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр частиц.

Особенности реализации данных методов показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика разработанных оптических методов измерения дисперсности частиц

Метод	Решаемые задачи
ТВСМ (ТИПАС-1)	Оценка функции распределения и концентрации. Диапазон измеряемых размеров частиц для длин волн 360 ÷ 1100 нм: $22 \text{ нм} < D < 10500 \text{ нм}$
Модифицированный ММУ (ЛИД-2М)	Оценка функции распределения без предварительной информации о физических свойствах вещества. При использовании лазера с длиной волны $\lambda=0,63 \text{ мкм}$ диапазон измеряемых размеров частиц: $1 \text{ мкм} < D < 100 \text{ мкм}$. Оценка концентрации частиц аэрозоля.

ТВСМ позволяет регистрировать наноразмерные частицы, но имеются ограничения по максимальному размеру исследуемых частиц – порядка десятков микрометров. Поэтому в некоторых задачах определения дисперсности аэрозольных сред с широким диапазоном размеров частиц (от нанометров до сотен микрометров) целесообразно использование сочетания методов ТВСМ и модифицированного ММУ. Такое сочетание при использовании только видимой области оптического излучения позволяет определять параметры аэрозольных сред с диапазоном диаметров частиц от 22 нм до 100 мкм. Оба метода позволяют получать как распределение частиц по размерам в динамике, так и концентрацию частиц аэрозоля, однако ТВСМ требует априорных знаний зависимости комплексного показателя преломления вещества конденсированной фазы от длины волны.

На рисунке 1 показана схема совместного использования указанных методов.

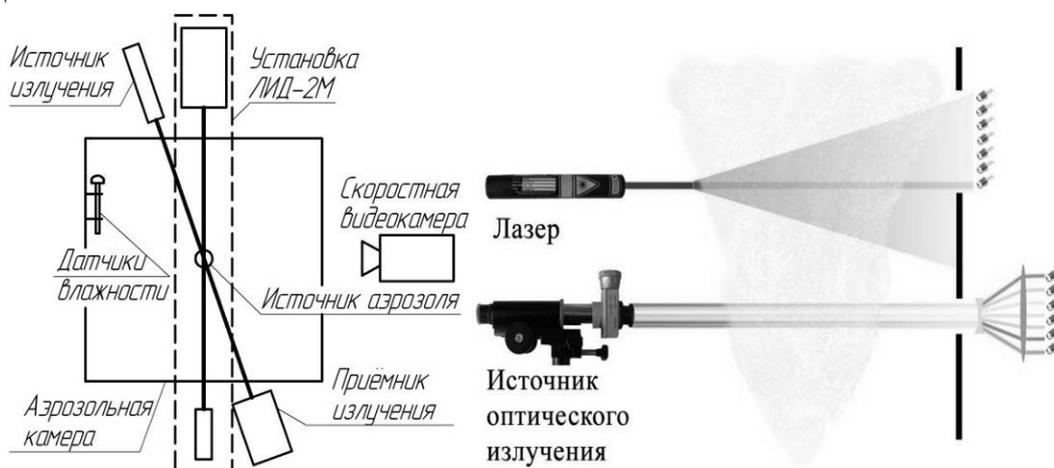
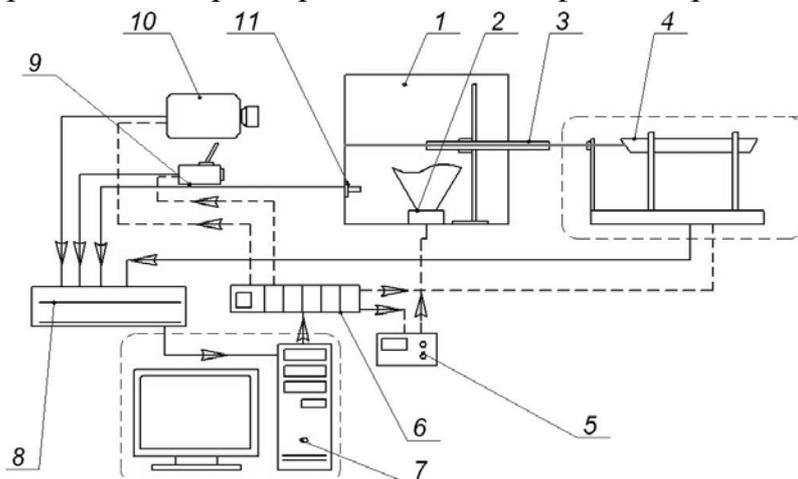


Рисунок 1 – Схема совместного использования разработанного измерительного комплекса и установок ЛИД-2М и ТИПАС-1

Разработанный измерительный комплекс (рисунок 2) позволяет определять функцию распределения и концентрацию частиц, а также пространственные характеристики облака аэрозоля, температуру и влажность среды в динамике. Комплекс отличается быстродействием, относительной простотой реализации и универсальностью применения в отношении исследуемых сред с возможностью получать данные о пространственно-временных характеристиках многофазной среды.



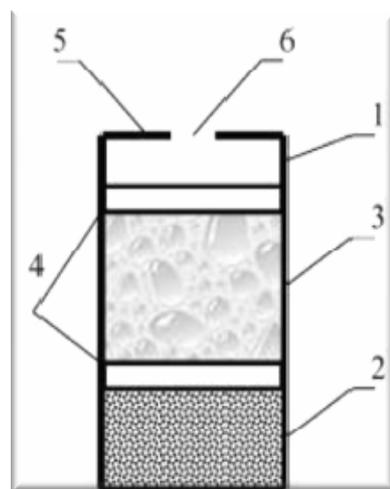
1 – измерительный бокс; 2 – распылитель; 3 – защитная трубка; 4 – ЛИД-2М, ТИПАС-1; 5 – устройство инициирования; 6 – устройство синхронизации; 7 – ЭВМ; 8 – система сбора информации; 9 – тепловизор; 10 – видеокамера; 11 – микропроцессорный датчик влажности и температуры

Рисунок 2 – Блок-схема измерительного комплекса

Описан экспериментальный стенд, реализующий комплексное исследование быстропротекающих процессов при взрывном распыливании и дальнейшей эволюции аэрозолей, в том числе при акустическом воздействии.

Третья глава «Физико-математическое моделирование процессов генезиса аэрозолей» представляет физико-математические модели ударно-волновой генерации аэрозолей и их дальнейшей эволюции.

Предложена принципиальная конструкция ударно-импульсного распылителя аэрозолей (рисунок 3).



1 – корпус, 2 – заряд ВВ, 3 – жидкость, 4 – мембраны, 5 – отражатель, 6 – отверстие
Рисунок 3 – Схема импульсного распылителя

Распылитель состоит из корпуса 1, в котором расположен заряд ВЭМ 2 и порция распыляемой жидкости 3, объем которой ограничен мембраной 4. Выброс потока жидкости происходит из отверстия 6, ширина которого ограничена краями корпуса и отражателем 5. При взрыве вещества 2 в объеме V_1 , который происходит за время порядка микросекунды, указанный объем заполняют газы под давлением в сотни атмосфер. Эти газы оказывают мощное импульсное воздействие на жидкость, вызывая распространение ударной волны. Отражатель и наличие достаточно широкого отверстия (сопла) обеспечивают постепенное истечение жидкости за счет поршневого выталкивания, не допуская прорыва газов, образовавшихся при взрыве. С другой стороны, обеспечивается полнота вытеснения жидкости.

Ударная волна в рассматриваемой конструкции, испытав один-два цикла отражения, быстро вырождается в серию акустических волн, и в этих условиях происходят процессы формирования кавитационной зоны. Максимальное давление в волне p_m определяется давлением газов, образующихся во взрывной камере объемом V_1 . В предположении мгновенной детонации давление газов составит $p_m = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{Q}{V_1}$, где γ – показатель адиабаты продуктов детонации, Q – энергия взрывчатого превращения ВВ.

При решении задачи в акустическом приближении из известных соотношений для интенсивности волновых процессов определена амплитуда смещения частиц в возбужденной волне:

$$Z_m = \sqrt{\frac{2Q}{M_{ж} \omega^2}}$$

где ω – частота колебаний, $M_{ж}$ – масса жидкости. С учетом полного отражения волны от границы жидкости с воздухом, в слое жидкости толщиной L создаются резонансные колебания с длиной волны $\lambda=2L$ и с частотой $\omega=\pi c/L$, где c – скорость звука.

Так как отражение волны происходит от границы с воздухом, в жидкость распространяется волна с противоположной фазой, то есть волна растяжения. Смещение частиц жидкости с амплитудой Z_m в волне разгрузки (фаза растяжения) приводит к появлению разрыва и испарению жидкости в образовавшуюся каверну. Следующая затем фаза сжатия вызывает образование шарообразных пузырьков в массе воды диаметром D_1 , заполненных водяными парами. Определен диаметр кавитационного пузырька в зависимости от давления в жидкости в предположении о пространственной однородности распределения таких пузырьков:

$$D_1 = \frac{L(1-k)}{\pi c} \sqrt{\frac{Q}{M_{ж}}} \sqrt[3]{\frac{p_m}{p}},$$

где k – индекс кавитации (отношение объема жидкости в кавитационном элементе к объему кавитационного элемента).

Показана роль кавитации в процессе и результате ударно-волновой генерации аэрозолей. Предложен механизм образования капель аэрозоля при истечении из выходного отверстия конструкции кавитированной жидкости. Предполагается, что в момент истечения кавитационный пузырек диаметром D_1 под давлением p ($p > p_0$, где p_0 – атмосферное давление), несущий слой жидкости, разрушится на капли диаметром, равным толщине слоя жидкости h . Данное предположение подтверждается результатами скоростной видеосъемки процесса разрыва мыльного пузыря (рисунок 4).

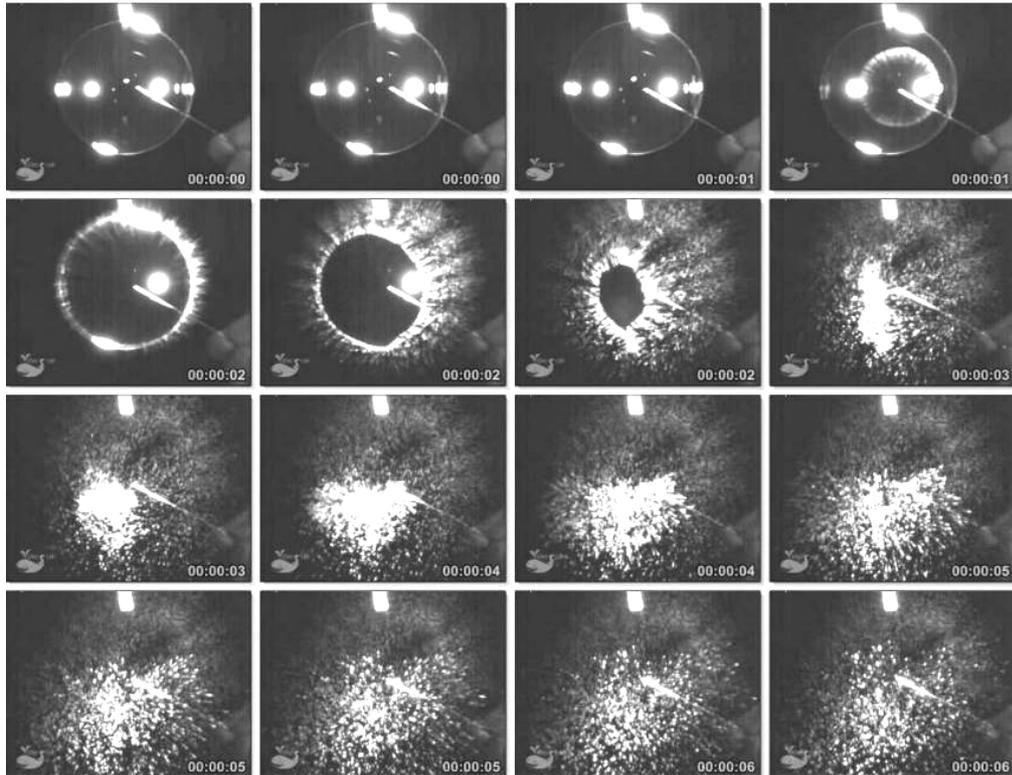


Рисунок 4 – Кадры скоростной видеосъемки процесса разрушения мыльного пузыря

Толщина водяного слоя h в момент разрушения:

$$h = \frac{D_1}{2} \left[\sqrt[3]{\frac{k}{1-k} + \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/3\gamma} \right].$$

Диаметр каплей аэрозоля, равный h , при относительно небольших скоростях истечения ($\sim 100-200$ м/с) значительно (на один-два порядка) меньше, чем при аэродинамическом механизме разрушения каплей.

Зависимость давления p от времени и скорости истечения u получена при решении задачи об истечении жидкости из выходного отверстия конструкции (в предположении о стационарном режиме истечения решалось уравнение Бернулли и уравнение неразрывности; предполагалось также, что давление изменяется только за счет истечения вследствие изменения свободного объема, $pV = p_m V_1$):

$$p = p_m \left[1 + t \frac{3S_1}{2V_1} \sqrt{\frac{2p_m}{k\rho_{ж}((S_1/S_2)^2 - 1)}} \right]^{-2/3},$$

$$u = \frac{S_1}{S_2} \sqrt{\frac{2p}{k\rho_{ж}((S_1/S_2)^2 - 1)}}.$$

где S_1 – площадь сечения конструкции, S_2 – площадь сечения отверстия. Считая послойно количество выбрасываемых частиц, с учетом постепенного

уменьшения давления, построена зависимость относительного количества частиц от их размеров, которая затем аппроксимирована функцией гамма-распределения.

Для модельного распылителя с параметрами: $L=1$ см, $S_1=1$ см², $S_1/S_2=3$, $Q=24$ кДж рассчитаны значения времени истечения $t_{ист} \sim 10^{-6}$ с, скорости $u \sim 200$ м/с, параметров функции распределения ($f(x) = ax^\alpha \cdot \exp(-bx)$): $\alpha=0,11$, $b=0,60$ (рисунок 5), что соответствует наблюдаемым в эксперименте с точность до 10 %.

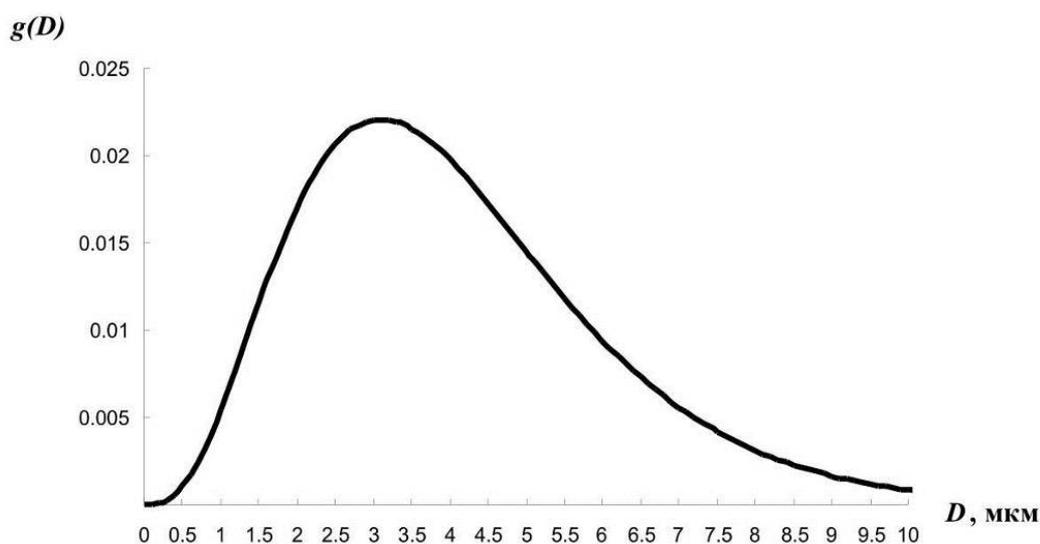


Рисунок 5 - Массовая функция распределения частиц по размерам (расчет)

Предложены варианты конструкции ударно-импульсного распылителя аэрозоля на основе принципа центробежной форсунки (с использованием теории Абрамовича-Клячко), с дополнительным использованием энергии сжатого газа.

Рассмотрены основные безразмерные параметры (параметр Абрамовича A , число Рейнольдса Re , отношение площади сопла к площади сечения конструкции S_2/S_1) и их влияние на выходные характеристики облака аэрозоля: угол распыла, скорость истечения, дисперсность аэрозоля. Теоретически получена функция распределения частиц по размерам в результате распыления, аппроксимированная функцией гамма-распределения. Проведенные расчеты показали хорошее согласие с экспериментом на модельном распылителе: время истечения составит 1,5 сек, коаксиальная скорость потока $u_z=238$ м/с (192 м/св эксперименте); угол факела распыла – 44° (37° в эксперименте). Средний объемно-поверхностный диаметр D_{32} составит 22 мкм (21,9 мкм в эксперименте).

На основе разработанной модели установлен безразмерный параметр:

$$Wo = \frac{Z_m}{L} = \frac{1}{\pi c} \sqrt{\frac{2Q}{M_{ж}}} \quad (1)$$

характеризующий эффективность процессов кавитации в жидкости. Экспериментально установлен порог кавитации, соответствующий значениям параметра $Wo_{min} \sim 0,01 \div 0,02$. Как показано на рисунке 6, параметр Wo определяет ведущий механизм формирования капель при импульсном распылении жидкостей. При $Wo < Wo_{кр}$ определяющим механизмом образования капель будет кавитационный, при $Wo > Wo_{кр}$ – аэродинамический. При небольших энергетических затратах в варианте импульсного (взрывного) распыления для значений числа Wo , близких к пороговому Wo_{min} , результирующий размер капель много меньше, чем можно получить при тех же энергетических затратах в случае применения других способов распыления.

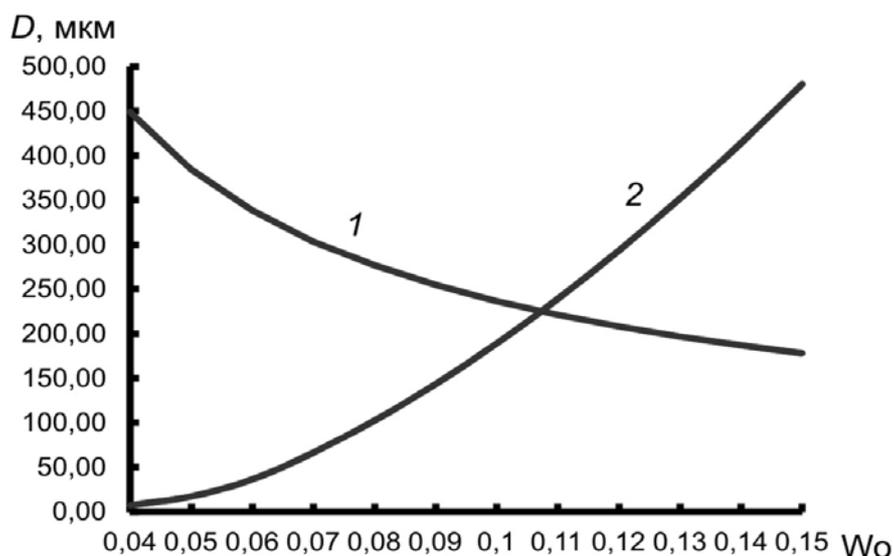


Рисунок 6 – Зависимость диаметра капель аэрозоля: аэродинамический механизм (1) и кавитационный механизм (2)

С дальнейшим ростом Wo преобладающим становится аэродинамический механизм: относительно большие капли, получившиеся при разрыве кавитационного пузырька, будут претерпевать дальнейшее разрушение под действием аэродинамических сил.

Практическое следствие данных модельных расчетов таково: чтобы получить микронный аэрозоль (радиус капель около $1 \div 10$ мкм), необходимо создать условия для кавитации ($Wo > Wo_{min} \sim 0,01$), но не допускать слишком большого взрывного (импульсного) воздействия на жидкость $Wo \sim 0,02 - 0,05$. Максимально крупнодисперсный аэрозоль (220 мкм) взрывным способом можно получить при $Wo \sim Wo_{кр}$.

В получаемых импульсным способом аэрозолях присутствуют капли микронных и субмикронных размеров. Теплообмен таких капель со средой протекает интенсивно вследствие их большой удельной поверхности. Предложена физико-математическая модель, описывающая процесс испарения мелких капель в динамике, в зависимости от влажности и температуры, физико-химических свойств жидкости. Модель позволяет в процессе испарения массы капель аэрозоля рассчитать их радиус, температуру, а также влажность и температуру воздуха. Чем выше дисперсность аэрозоля, тем более интенсивно происходит испарение и влажность растет быстрее. Рост влажности среды соответствует наблюдаемому в эксперименте: влажность среды повышается от 60 % до 88 % в течение 320 мс для аэрозоля с характерным диаметром капель 10 мкм, концентрацией 3 г/м³. Температура среды понижается на 2-3 градуса, что соответствует результатам измерений с помощью тепловизора.

Физико-математическая модель коагуляции мелкодисперсных аэрозолей учитывает процессы испарения, которые в этом случае могут быть существенны. Проведены расчеты изменения массы водного аэрозоля, обусловленного испарением частиц по закону Максвелла:

$$I = \frac{dm}{dt} = \frac{4\pi r D_f M (p_{drop} - p_{pl})}{RT}, \quad (2)$$

где D_f – коэффициент диффузии, M – молекулярный вес жидкой капли, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, r – радиус частицы, p_{drop} – парциальное давление над каплей, p_{pl} – парциальное давление над плоской поверхностью. Чтобы определить парциальные давления над поверхностью частиц, обратимся к формуле Томсона (Кельвина), определяющей давление насыщенного пара над каплями жидкости:

$$\ln(p_{drop} / p_{pl}) = \frac{2\sigma M}{\rho_{жс} R T r}, \quad (3)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения капли.

Капля полностью испарится в момент времени t , при котором ее масса $m=0$. Результаты полученного расчета (кривая) и эксперимента (точки) динамики отношения испарившейся массы капель m к начальной массе m_0 приведены на рисунке 7. Уже через 15 секунд останется только 10 % от исходной массы аэрозоля, остальные 90 % массы жидкости испарятся. Это хорошо согласуется с данными проведенных экспериментов.

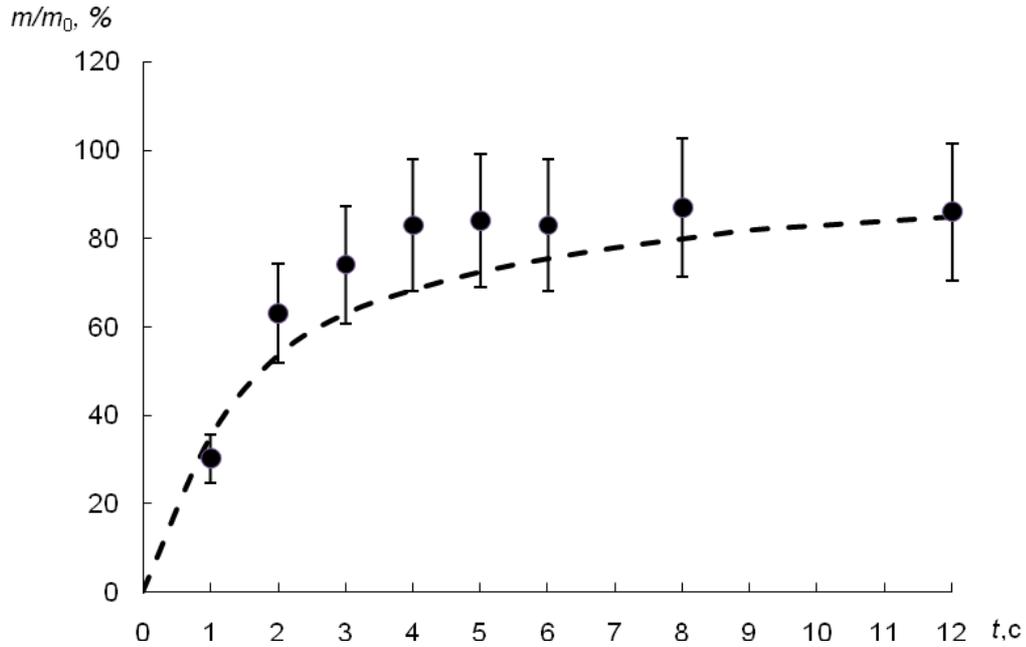


Рисунок 7 – Относительная масса испарившегося аэрозоля в зависимости от времени (точками показаны экспериментальные данные)

Кроме испарения в эволюции аэрозоля большую роль играют процессы коагуляции и осаждения. В главе 3 предложена модель эволюции жидкокапельного аэрозоля с учетом процессов испарения и коагуляции в виде варианта интегрального уравнения Смолуховского, со стоком (испарение) и обрезанием спектра (осаждение):

$$\frac{\partial f(D, t)}{\partial t} = I_1 + I_2 + I_3, \quad (4)$$

где I_1 описывает убыль капель с диаметром D за единицу времени в единице объема за счет столкновения капли диаметра D с любой каплей диаметра D' :

$$I_1 = -f(D, t) \int_0^{D_{кр}(t)} K(D, D') f(D', t) dD', \quad (5)$$

где $K(D, D')$ – вероятность столкновения капель с диаметрами D и D' в единицу времени. Примем вероятность столкновения частиц пропорциональной их сечениям: $K(D, D') = b_k(D^2 + D'^2)$.

Величина максимального диаметра частиц $D_{кр}$ определяется выражением:

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{18\eta_0 H}{G\rho_{жс}t}}, \quad \text{где } H \text{ – высота облака, } G \text{ – ускорение свободного падения.}$$

Все частицы с диаметром, большим, чем $D_{кр}$, осадут на момент времени t .

Член I_2 описывает возникновение частиц диаметра D за счет столкновения капель с диаметрами D' и $D - D'$:

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^D K(D-D', D') f(D', t) f(D-D', t) dD',$$

член I_3 – уменьшение массы капель за счет их испарения:

$$I_3 = \frac{\partial}{\partial D} \left[4\pi D_f M p_{pl} \left(\exp\left(\frac{4\sigma M}{\rho_{жс} RTD}\right) - 1 \right) \frac{f(D)}{RTD\rho_{жс}} \right].$$

Начальные условия для уравнения (4): при $t=t_0$ $f(D, t_0)=f_0(D)$ – начальное распределение частиц по размерам.

Установлены безразмерные критерии, характеризующие особенности протекания процессов. В частности, безразмерный комплекс Ku характеризует отношение скорости испарения к скорости седиментации и определяется как:

$$Ku = \frac{18\eta_0 H D_f M p_{pl}}{RT\rho_{жс} G D_0^4}. \quad (6)$$

Расчеты показывают, что относительно быстро осаждаются лишь капли с радиусом более 1 мкм: для $D=20$ мкм время осаждения составит 0,69 мин, а для $D=0,2$ мкм – 116 ч. Таким образом, для среднедисперсных аэрозолей осаждение следует учитывать, только если нас интересует время, измеряемое часами, а не минутами. Испарение же субмикронной водяной капли происходит за доли секунды. При таких условиях критерий $Ku \gg 1$: $Ku \sim 10^9 - 10^{11}$. Но для других условий, например, повышенной влажности, капель трудноиспаряемых жидкостей, а также для грубодисперсных жидкокапельных аэрозолей критерий Ku становится ~ 1 . В этом случае процессы испарения и седиментации будут идти с одинаковой по порядку величины скоростью. Дальнейшее уменьшение Ku говорит о преобладании скорости седиментации перед испарением; в пределе, например, для твердофазных аэрозолей, $Ku=0$ и испарения не происходит.

Проведены расчеты трансформации спектра распределения частиц по размерам. Решение проведено в безразмерном виде, в качестве характерного диаметра выбран медианный: $D_0 = \alpha / b$, где α и b – параметры функции распределения частиц по размерам (гамма-распределение, $f(r) = aD^\alpha \exp(-bD^b)$). Результаты экспериментальных измерений и расчета массовой функции распределения частиц аэрозоля по размерам приведены на рисунке 8. Уже через 12 с обнаруживается только 10 % от исходной массы аэрозоля, остальные 90 % массы жидкости испарятся. Это хорошо согласуется с данными расчета члена I_3 модели (86 %). Как видно из сравнения кривых 2, 3 (эксперимент) и 4, 5 (расчет), пик распределения в

эксперименте и в расчете хорошо совпадает, но расчетные кривые более «размазаны» при больших диаметрах. В целом можно говорить о хорошем качественном совпадении модельных расчетов с экспериментальными данными. Отличия в форме кривых можно объяснить ограничениями математического аппарата метода измерений: решение подбирается в виде гамма-распределения, в то время как в быстропротекающих процессах эволюции вид функции распределения может искажаться.

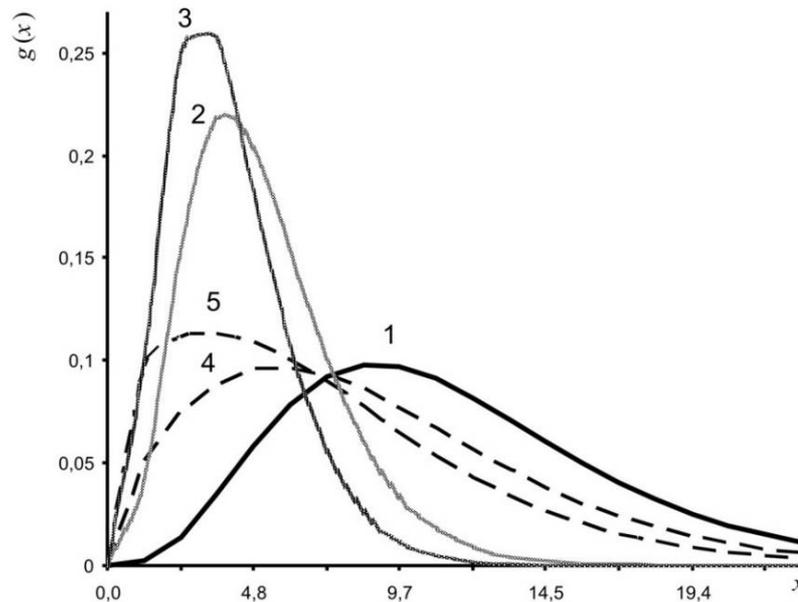


Рисунок 8 – Функция распределения частиц по размерам в нулевой момент времени (1), при $t=6$ с (2 – эксперимент, 4 – расчет) и при $t=12$ с (3 – эксперимент, 5 – расчет)

Представленные результаты сравнения экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о физической адекватности предлагаемой математической модели.

Предложена модель коагуляции аэрозоля под действием ультразвука в виде варианта интегрального уравнения Смолуховского. Выражение для вероятности столкновений в модели включает в себя зависимость от частоты и интенсивности УЗ-воздействия:

$$K(D, D_1) = \frac{k_b n_0}{v} (D^2 + D_1^2) \left(1 + k_a U_0^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right)^2 \right), \quad (7)$$

где ω – частота акустического воздействия, $\tau = \rho_c D^2 / 18\eta$ – время релаксации стоксовой частицы, η – динамический коэффициент вязкости среды, ρ_c – плотность частицы, U_0 – скорость движения частиц в акустическом поле, n_0 – счетная концентрация частиц, k_b, k_a – коэффициенты.

Асимптотический анализ выражения (7) показывает, что существует минимальная частота акустического воздействия ω_{min} : при $\omega < \omega_{min}$ ультразвук не оказывает влияния на процессы коагуляции. Показано, что для каждого характерного размера частиц аэрозоля существует также оптимальная частота акустического воздействия ω_{max} : при $\omega > \omega_{max}$ дальнейшее увеличение частоты не приводит к ускорению коагуляции (это хорошо согласуется с известными экспериментальными данными). Расчет для водяного аэрозоля минимальной и оптимальной частот воздействия приведен на рисунке 9.

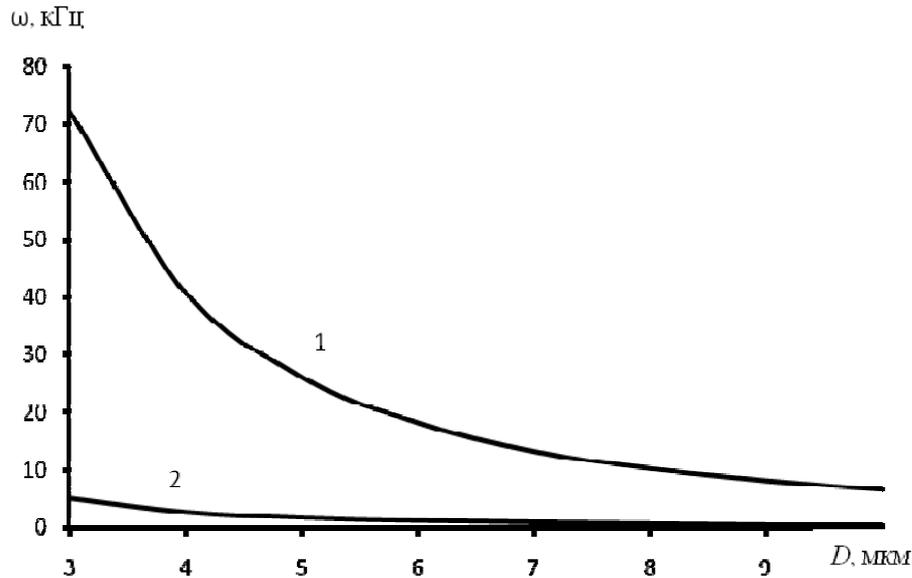


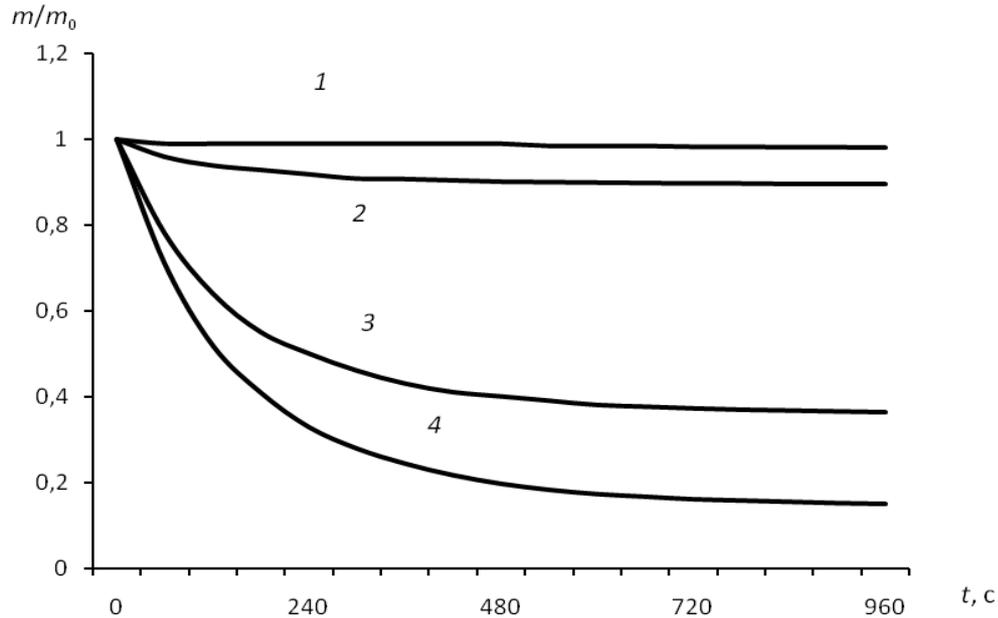
Рисунок 9 – Оптимальная частота ω_{max} (1) и минимальная частота ω_{min} (2) для водного аэрозоля

В предложенной модели эволюции учтена возможность коагуляции двухфазного аэрозоля. Теоретически показано, что введение в аэрозоль дополнительной дисперсной фазы может существенно повысить скорость коагуляции и осаждения исходного аэрозоля.

На рисунке 10 показан расчет изменения массы аэрозоля при введении 5 % массы дополнительной фазы «крупной» дисперсности (кривая 2), «мелкой» дисперсности без УЗ-воздействия (кривая 3) и с УЗ-воздействием (кривая 4). Кривая 1 иллюстрирует осаждение «чистого» исходного аэрозоля с параметрами распределения $\alpha=0,1$, $b=1$ без дополнительной фазы и без воздействия ультразвуком. Видно, что такой мелкий аэрозоль не оседает даже за продолжительное время. Введение «крупного» дополнительного аэрозоля не слишком улучшает картину осаждения, поскольку незначительно увеличивает количество частиц и вероятность столкновения. «Мелкий» дополнительный аэрозоль, даже в количестве 5 % от массы исходного,

существенно повышает скорость осаждения. Ультразвуковое воздействие еще ускоряет этот процесс.

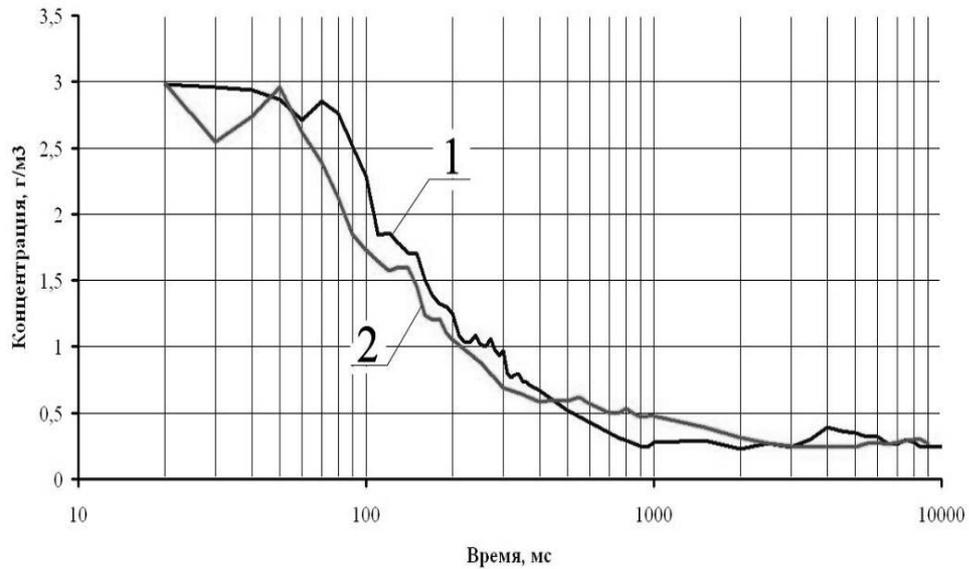
Результаты данных расчетов подтверждены экспериментально, что показано в главе 4.



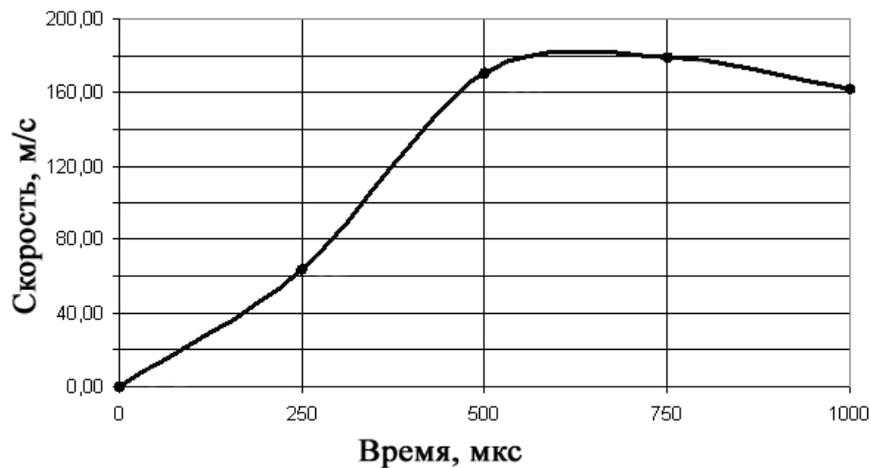
1 – без дополнительной фазы и без УЗ-воздействия; 2 – $w=5\%$ дополнительной фазы с параметрами $\alpha_1=0,3$, $b_1=0,1$; 3 – $w=5\%$ дополнительной фазы с параметрами $\alpha_1=0,1$, $b_1=0,5$, без УЗ-воздействия; 4 – $w=5\%$ дополнительной фазы с параметрами $\alpha_1=0,1$, $b_1=0,5$ и с УЗ-воздействием

Рисунок 10 – Зависимость относительной массы аэрозоля от времени (расчет)

В **четвертой главе** приведены данные экспериментов. С помощью модельного импульсного распылителя и специального измерительного комплекса проведено экспериментальное исследование процесса диспергирования жидкости. Получены зависимости скорости движения фронта облака, концентрации частиц (рисунок 11) и параметров дисперсности (рисунок 12) от времени. Снижение концентрации аэрозоля (рисунок 11а) сопровождалось увеличением влажности в камере на 10-12 % и уменьшением температуры среды на 1-2 градуса, что говорит о преобладании влияния испарения частиц на эволюцию аэрозоля, созданного импульсным способом, как и было предсказано в процессе физико-математического моделирования (гл. 3).



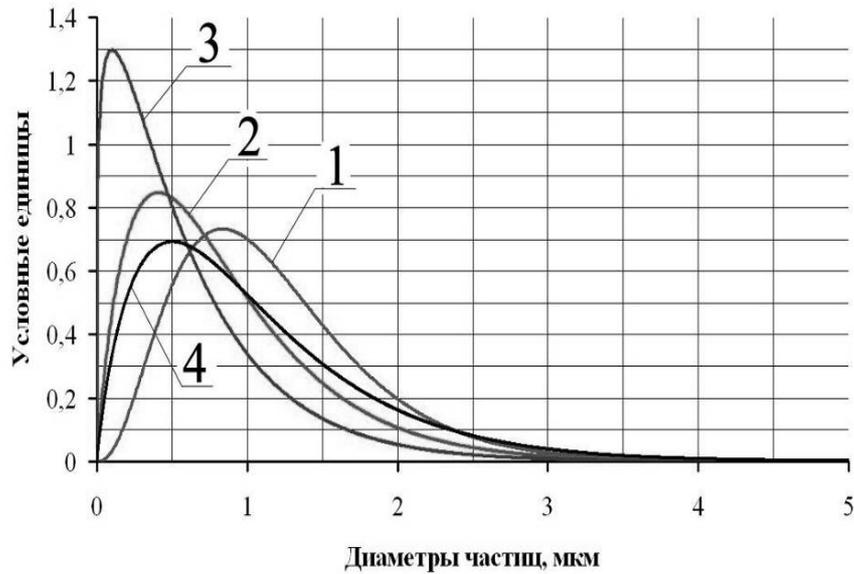
а)



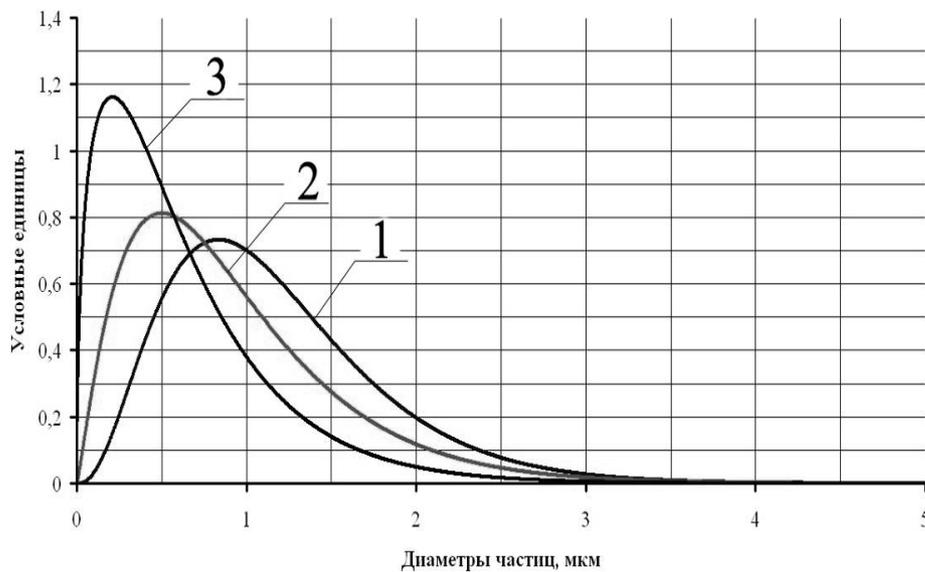
б)

Рисунок 11 – Концентрация частиц аэрозоля (дистиллированная вода) (а) и средняя скорость фронта аэрозольного облака (б)

Полученные данные (рисунок 12 а и б) хорошо согласуются с результатами теоретической оценки спектра размеров частиц, выполненной для используемого распылителя. Полученные в эксперименте результаты динамики функции распределения частиц по размерам совпадают с теоретическими расчетами, выполненными с учётом испарения, осаждения и коагуляции с точностью до 10 %. По представленным результатам видно, что ММУ (кривая 4, рисунок 12а) в отличие от ТВСМ (кривая 3, рисунок 12а) недостаточно информативен в области размеров частиц менее 1 мкм.



а)



б)

Рисунок 12 – Спектр размеров частиц импульсного распылителя в зависимости от времени: а) эксперимент, б) расчет; 1 – 10 мс, 2 – 4 с, 3 – 10 с (ТВСМ), 4 – 10 с (ММУ)

Чтобы показать, что в начальный момент образуются наночастицы, были проведены исследования на электронном микроскопе продуктов распыления водных растворов NaCl и смесей, содержащих добавки наноразмерных частиц алмаза. Результаты свидетельствуют, что такие частицы имеются. Таким образом, показано, что с помощью конструкции импульсного распылителя удастся создать мелкодисперсный аэрозоль, что является важным для многих практических задач. Экспериментально установлено, что при импульсном распылении жидкости образуется облако

аэрозоля с частицами субмикронных и микронных размеров, которые быстро испаряются.

Экспериментально установлено, что повышение влажности окружающей среды замедляет процессы испарения (а следовательно, уменьшения концентрации и трансформации дисперсного состава). В результате серии экспериментов установлена слабая зависимость дисперсности капель от поверхностного натяжения: чем меньше поверхностное натяжение, тем меньше размер капель; вязкость жидкости также слабо влияет на дисперсность капель и концентрацию их в облаке аэрозоля.

С помощью оптических измерений дисперсных характеристик аэрозолей во времени показано, что ультразвуковое (УЗ) воздействие повышает скорость коагуляции и осаждения частиц как жидкокапельных, так и твердофазных аэрозолей с диаметром частиц от 5-6 мкм и более. При этом даже незначительное снижение температуры окружающей среды (на 9 °С) существенно увеличивает время осаждения водного аэрозоля. Для дымов со средним диаметром частиц около 2-4 мкм влияние ультразвука гораздо менее заметно, чем для более крупнодисперсных аэрозолей. Поэтому для осаждения дымов необходимо применять другие способы воздействия. Теоретически (глава 3) было показано, что одним из таких способов может быть введение дополнительной фазы аэрозоля: мелкодисперсного жидкокапельного аэрозоля в твердофазный (дым).

На рисунке 13 показана зависимость от времени относительной концентрации дыма в исходном состоянии и с введением в него дополнительной фазы (водного аэрозоля) разной дисперсности. Видно, что крупнодисперсные водяные капли не оказывают практически никакого влияния на скорость осаждения дыма (кривые 1 и 2); мелкодисперсные капли, напротив, сильно ускоряют осаждение (кривая 3). Эффект еще усиливается при УЗ-воздействии (кривая 4). Это объясняется тем, что при введении дополнительной фазы с мелким размером капель существенно увеличивается счетная концентрация частиц, чего не происходит при введении дополнительной фазы с крупным размером капель той же массы. В соответствии с (7) вероятность столкновения частиц $K(D, D_1)$ пропорциональна счетной их концентрации n_0 , а значит, скорость коагуляции и осаждения аэрозоля повышается при увеличении числа частиц в единице объема. Увеличить число частиц возможно, распылив мелкодисперсный водный аэрозоль, например, импульсным способом.

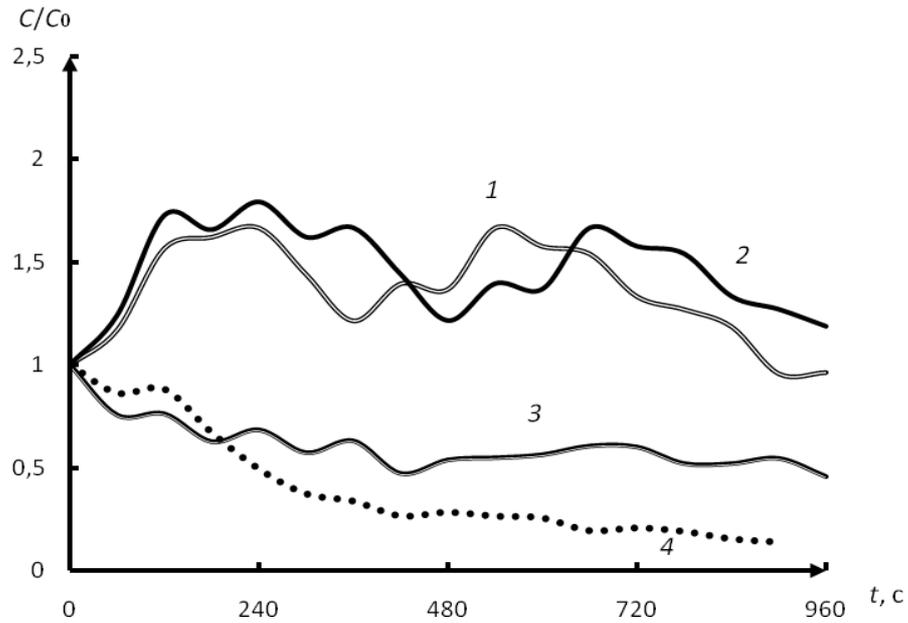


Рисунок 13 – Зависимость относительной концентрации дыма от времени при добавлении водного аэрозоля и УЗ-воздействии: 1 – дым; 2 дым и крупнодисперсный (30-40 мкм) водный аэрозоль; 3 – дым и мелкодисперсный (2-4 мкм) водный аэрозоль; 4 – дым, мелкодисперсный водный аэрозоль и УЗ-воздействие

Рисунок 14 иллюстрирует хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов для последнего случая.

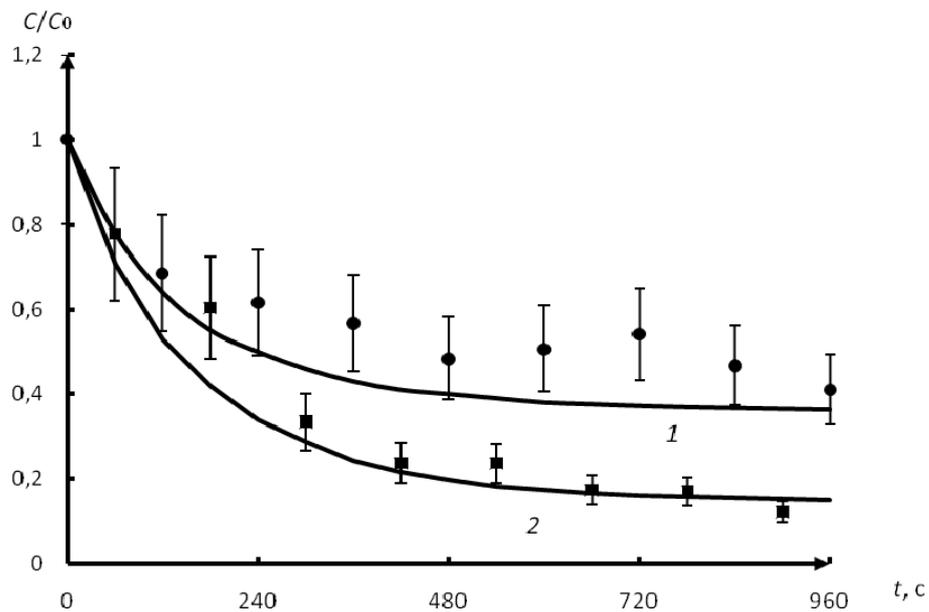


Рисунок 14 – Расчетная и экспериментальная зависимости относительной концентрации дыма от времени при добавлении мелкодисперсного (2-4 мкм) водного аэрозоля и УЗ-воздействии: 1 – расчет без УЗ-воздействия; 2 – расчет с УЗ-воздействием; точки соответствуют эксперименту без УЗ-воздействия; квадратные точки соответствуют эксперименту с УЗ-воздействием

В результате проведенных экспериментов установлена минимальная концентрация аэрозоля, при которой целесообразно воздействие УЗ-

колебаниями. Проведен асимптотический анализ поведения функции (7), который показал, что существуют предельно низкие (неэффективные) (ω_{min}) и оптимальные частоты (ω_{max}) ультразвукового воздействия (таблица 2). Данный вывод соответствует экспериментальным и теоретическим данным, известным из литературы⁵.

Таблица 2 – Расчетная зависимость минимальной и оптимальной частот ультразвукового воздействия на водный аэрозоль с целью коагуляции и осаждения дымов

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

Режим ультразвукового воздействия должен выбираться следующим образом: интенсивность 100-150 дБ, частота колебаний лежит в диапазоне $\omega_{min} < \omega < \omega_{max}$ для аэрозоля с данным характерным размером, в идеале $\omega = \omega_{max}$. Не следует ожидать заметного эффекта от УЗ-воздействия, если концентрация аэрозоля мала (менее 0,4 г/м³), либо размер частиц так мал, что частота ультразвука не попадает в диапазон рекомендуемых значений, или близка к минимальной для данного размера.

Полученные зависимости изменения среднего диаметра капель и концентрации аэрозоля в процессе УЗ-воздействия могут быть использованы при проектировании газоочистного оборудования, основанного на использовании процесса коагуляции при помощи излучателей ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Приведены примерные схемы оборудования для очистки помещений от дыма и пыли.

Предложен вариант использования разработанного импульсного распылителя: быстрый способ получения холодного пара с низкими энергозатратами. Распыляемая импульсным способом вода в течение нескольких секунд на 90 % своей массы превращается в холодный пар. Энергия превращения этой массы воды в пар берется из энергии ВЭМ и из окружающего воздуха. При этом, как показал эксперимент, энергия ВЭМ почти на порядок меньше той энергии, которая требуется для доведения той же массы воды до кипения и испарения ее «горячим» способом.

В заключении перечислены основные результаты исследований, изложенных в диссертации. Приводится **список литературы**.

⁵Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей (монография) / В.Н. Хмелев, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – 228 с.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые создана теория импульсного взрывного распыления жидких сред и образования мелкодисперсного аэрозоля. Показана роль ударно-волновой кавитации в формировании дисперсного состава аэрозоля импульсным методом. Взрыв ВЭМ приводит к формированию акустической волны в слое жидкости и, как следствие, – кавитационных пузырьков, которые при разрушении в воздухе образуют мелкие капли аэрозоля.

2. Проведен анализ двух способов распыления жидкости: центробежными форсункам и импульсным способом. Центробежные форсунки используются для достижения качественного распыла (обеспечения большей равномерности аэрозольного поля и подачи жидкости). Ударно-волновой (импульсный) метод генерации аэрозоля привлекателен возможностью создавать облако мелкодисперсного аэрозоля практически мгновенно; однако поле аэрозоля не отличается равномерностью. Разработка комбинированного метода диспергирования жидкости, основанного на сочетании принципа центробежной форсунки и импульсного распыления, позволяет использовать преимущества обоих методов.

3. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлены основные стадии формирования аэрозольной жидкокапельной среды, характерные для взрывного распыливания: кавитирование жидкой среды; диспергирование кавитированной жидкости и формирование жидкокапельного потока в результате импульсного воздействия; формирование и эволюция аэрозольного облака. Рассмотрены закономерности распада струй жидкости, истекающих из сопла распылителя. Показано, что эти струи испытывают сложные превращения под действием аэродинамических и внутренних сил; характеристики получаемого аэрозоля контролируемо зависят от конструктивных особенностей распылителя.

4. Теоретически обоснованы примененные в работе методики измерений, позволившие провести полный комплекс исследований быстропротекающих процессов, включающее определение дисперсных параметров частиц на основе регистрации эффектов рассеяния и затухания зондирующего излучения, измерение температурных полей и скоростную видеорегистрацию, а также возможность проведения электронно-микроскопических исследований. Разработанный с участием автора экспериментальный измерительный комплекс включает новый высокоинформативный турбидиметрический высокоселективный метод

восстановления функции распределения частиц по размерам субмикронных и среднедисперсных аэрозолей с диапазонами размеров частиц от 22 нм до 10,5 мкм, основанный на решении серии прямых задач оптики аэрозолей. Комплекс обеспечивает также измерение концентрации частиц в аэрозольном облаке (программная реализация автора). Эффективность и инновационная направленность разработанного измерительного комплекса выражается в том, что по совокупному показателю качества (точность, быстродействие, информативность, себестоимость) он не имеет аналогов.

5. Предложена физико-математическая модель способа получения высокодисперсного аэрозоля, сочетающего ударно-волновой метод диспергирования и использование центробежной форсунки с учетом процессов кавитации и теоретической модели Абрамовича-Клячко. Проведенные расчеты показали хорошее согласие с экспериментом на модельном распылителе. Рассмотрены основные безразмерные параметры (A , Re , S_1/S_2 , S_1/S_3) и их влияние на выходные характеристики облака аэрозоля. Установлен безразмерный параметр Wo , характеризующий интенсивность процессов кавитации в жидкости (определяющийся, в первую очередь, величиной энергии ВЭМ по отношению к массе распыляемой жидкости).

6. Рассмотрены конкурирующие механизмы (кавитационный и аэродинамический) в образовании капель аэрозоля, определены оптимальные параметры процесса распыления для получения высокодисперсного аэрозоля. Установлено, что существует критическое значение параметра $Wo_{кр}$, при котором происходит переход от кавитационного механизма распыления к аэродинамическому ($Wo_{кр} \sim 0,11$ для воды). Наиболее высокая дисперсность аэрозоля достигается при значениях $Wo \sim 0,02-0,05$; наименьшая дисперсность соответствует критическому значению $Wo = Wo_{кр} (0,11)$.

7. Впервые предложена физико-математическая модель эволюции аэрозольного облака с учетом коагуляции, в том числе под действием ультразвука, испарения и осаждения частиц. Получены безразмерные критерии, характеризующие процессы эволюции жидкокапельного облака, проведен асимптотический анализ модели, показавший наличие оптимального и минимального значения частоты ультразвука для коагуляции частиц. Предложен вариант модели для двухфазного аэрозоля; теоретически показано, что введение в мелкодисперсный твердофазный аэрозоль (дым) жидкокапельного мелкодисперсного аэрозоля повышает эффективность коагуляции и осаждения дыма.

8. Предложена физико-математическая модель испарения капель аэрозоля с учетом влажности и температуры среды, размера, температуры и

физико-химических свойств вещества капель. Показано, что чем выше дисперсность аэрозоля, тем интенсивнее происходит испарение за счет большей удельно-массовой поверхности частиц и, как следствие, улучшения теплообмена с окружающей средой.

9. Получены результаты по дистанционному бесконтактному определению функции распределения частиц по размерам и концентрации частиц мелкодисперсных аэрозолей, создаваемых импульсным способом. Показана динамика изменения функции распределения частиц по размерам различных аэрозольных сред, создаваемых импульсным способом, в процессе их образования и установлена зависимость трансформации спектра размеров частиц от физических параметров распыляемого вещества. Получены экспериментальные данные о влиянии поверхностного натяжения и вязкости жидкости на дисперсность импульсного распыливания.

10. С помощью разработанного экспериментального измерительного комплекса впервые изучена динамика дисперсных характеристик и концентрации части различных аэрозолей при ультразвуковом воздействии. Впервые исследована динамика двухфазных аэрозолей при введении дополнительной фазы различной дисперсности. Установлено, что введение в задымленную среду мелкодисперсного водного аэрозоля позволяет существенно повысить эффективность осаждения дыма, в том числе с помощью ультразвука.

11. Предложены варианты использования разработанных импульсных распылителей жидкости в технике, сельском хозяйстве, медицине, пожаротушении, очистке производственных помещений от дыма и пыли.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. **Kudryashova Olga**, Pavlenko Anatoly, Vorozhtsov Boris, Titov Sergey, Arkhipov Vladimir, Bondarchuk Sergey, Maksimenko Eugeny, Akhmadeev Igor, Muravlev Eugeny Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. In book: Photodetectors. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – P. 341-364. – 1,44 / 0,24 п.л.

2. **Kudryashova O.B.**, Vorozhtsov B.I., Ishmatov A.N., Akhmadeev I.R., Muravlev E.V. and Pavlenko A.A. Physicomathematical Modelling of the Explosion-Induced Generation of Submicron Liquid-Droplet Aerosols In: Aerosols: Properties, Sources and Management Practices. New-York: Nova Science Publishers, Inc., 2012.– P. 227-248. – 1,31 / 0,26 п.ч.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий:

3. Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Архипов В.А. Моделирование процесса диспергирования жидкости взрывным газогенератором // Известия вузов. Физика. – 2008. – т. 51, № 8/2. – С. 107-114. – 0,43 / 0,14 п.л.

4. Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Муравлев Е.В. и др. Экспериментальное моделирование взрывного диспергирования жидкости и порошков // Известия вузов. Физика. – 2008. – т. 51, № 8/2. – С. 115-121. – 0,44 / 0,12 п.л.

5. Галенко Ю.А., Ворожцов А.Б., **Кудряшова О.Б.** и др. К вопросу о возможности управления эмиссионными спектрами пиротехнических составов // Известия вузов. Физика. – 2008. – т. 51, № 8/2. – С. 122-124. – 0,13 / 0,04 п.л.

6. Павленко А.А., **Кудряшова О.Б.**, Титов С.С., Максименко Е.В. Способ определения дисперсности субмикронных аэрозолей по их спектральной прозрачности. – Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 262-266. – 0,25 / 0,03 п.л.

7. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Муравлев Е.В., Ишматов А.Н., Павленко А.А. Ударно-волновая генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – С. 95-100. – 0,31 / 0,06 п.л.

8. Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Павленко А.А. Физико-математическое моделирование ударно-волновой генерации жидкокапельных аэрозолей в конструкции центробежной форсунки // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 12/2. – С. 102-108. – 0,38 / 0,13 п.л.

9. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И. Математическая модель взрывной генерации жидкокапельных аэрозолей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318, № 2. – С. 77-81. – 0,25 / 0,13 п.л.

10. 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. – 0,25 / 0,04 п.л.

11. Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И., Титов С.С., **Кудряшова О.Б.** Лазерная измерительная установка для исследования высококонцентрированных жидкокапельных аэрозолей // Датчики и системы. – 2011. – № 11. – С. 61-63. – 0,18 / 0,04 п.л.

12. 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. – 0,19 / 0,04 п.л.

13. **Кудряшова О.Б.** Математическая модель эволюции жидкокапельных аэрозолей // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 2. – С. 129-133. – 0,25 п.л.

14. **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. – 0,56 / 0,19 п.л.

15. Титов С.С., Павленко А.А., **Кудряшова О.Б.**, Архипов В.А., Бондарчук С. С. Турбидиметрический метод определения параметров субмикронных аэрозольных сред // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 68-74. – 0,38 / 0,07 п.л.

16. 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, № 07. – С. 650–652. – 0,18 / 0,05 п.л.

17. **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. – 0,50 / 0,25 п.л.

Статьи в зарубежных журналах:

18. Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Сакович Г.В. Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 6. – С. 1084-2004. – 1,25 / 0,25 п.л.

19. **Kudryashova Olga B.**, Vorozhtsov Boris I., Muravlev Eugene V., Akhmadeev Igor R., Pavlenko Anatoly A., Titov Sergey S. Physicomathematical Modeling of Explosive Dispersion of Liquid and Powders // Propellant, Explosives, Pyrotechnic. –2011. – № 36. – P. 524-529. – 0,31 / 0,05 п.л.

Статьи в других научных изданиях:

20. Ишматов, А.Н., Ворожцов Б.И., Ахмадеев И.Р., **Кудряшова О.Б.**, Муравлёв Е.В., Диденко А.В., Павленко А.А., Титов С.С. Генезис высокодисперсного аэрозоля: влияние слабоиспаряемой примеси на

дисперсные характеристики // Динамика сплошной среды. – 2010 Вып. 126. – Акустика неоднородных сред. – С. 73-76. – 0,25 / 0,03 п.л.

21. **Кудряшова О.Б.**, Архипов В.А., Бондарчук С.С., Ворожцов Б.И. Математическая модель работы взрывного диспергатора тонкораспыленной воды: сборник материалов 7-й Международной конференции «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф». – Томск: ТГУ, 2008. – С. 72-73. – 0,18 / 0,04 п.л.

22. **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. – Черногоровка: ИПХФ РАН, 2008. – С. 105. – 0,06 / 0,02 п.л.

23. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Архипов А.В., Бондарчук С.С. Математическое моделирование взрывного способа генерации аэрозолей: сборник материалов XIV Симпозиума по горению и взрыву. – Черногоровка: ИПХФ РАН, 2008. – С. 269. – 0,06 / 0,02 п.л.

24. **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. – Proceedings of ISMTII-2009 // S.Petersberg, 2009. – V.2. – P. 178-183. – 0,25 / 0,05 п.л.

25. Vorozhtsov B.I., **Kudryashova O.B.**, Muravlev Ye.V., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Titov S.S. Physicomathematical modeling of explosion dispersion of liquid and powders. – Proceeding of НЕМ-2009 // Biarritz, France, 2009. – № НЕМ004. – 0,25 / 0,06 п.л.

26. Титов С.С., Павленко А.А., **Кудряшова О.Б.**, Архипов В.А. Оптический метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей // 1-я Всероссийская научная конференция «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов». – Новосибирск, 2009. – С. 332. – 0,06 / 0,02 п.л.

27. **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 / Trans Tech Publications, Switzerland / DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.179. – 0,3 / 0,05 п.л.

28. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И. Математическая модель взрывного генезиса высокодисперсных жидкостных аэрозолей // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: материалы V Международной конференции

«НЕМs-2010», г. Бийск, 8-10 сентября 2010 г. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 173-175. – 0,1 / 0,05 п.л.

29. Титов С.С., Павленко А.А., Архипов В.А., Бондарчук С.С., **Кудряшова О.Б.** Численное исследование применимости математической модели метода спектральной прозрачности для решения обратной задачи светорассеяния // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы Всероссийской конференции, г. Бийск, 23 – 24 сентября 2010. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 180 – 186. – 0,4 / 0,02 п.л.

30. Титов С.С., Павленко А.А., Бондарчук С.С., **Кудряшова О.Б.** Использование математической модели метода спектральной прозрачности для оценки устойчивости решения обратной задачи светорассеяния // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: материалы Всероссийской конференции, г. Бийск, 6 – 7 октября 2010. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – С. 77-80. – 0,18 / 0,03 п.л.

31. Ишматов А.Н., **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Муравлев Е.В. Жидкокапельный аэрозоль, полученный с использованием ВЭМ, в условиях повышенной влажности // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы III научно-технической конференции молодых ученых, г. Бийск, 23-24 сентября 2010 г. – С. 83-90. – 0,44 / 0,1 п.л.

32. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Титов С.С. Эволюция дисперсий в факеле распыла взрывного распылителя // Аэрозоли Сибири XVII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск: Изд-во Института Оптики атмосферы СО РАН, 2010. – С. 29. – 0,06 / 0,01 п.л.

33. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Казанцев И.В., Коровина Н.В. Влияние поверхностно-активных веществ на взрывное образование жидкокапельного аэрозоля // Аэрозоли Сибири XVII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск: Изд-во Института Оптики атмосферы СО РАН, 2010. – С. 29. – 0,06 / 0,01 п.л.

34. Павленко А.А., Архипов В.А., Бондарчук С.С., Титов С.С., **Кудряшова О.Б.**, Ишматов А.Н. Оптическая диагностика потоков субмикронного аэрозоля // Аэрозоли Сибири XVII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск: Изд-во Института Оптики атмосферы СО РАН, 2010. – С. 30. – 0,06 / 0,01 п.л.

35. Vorozhtsov V.I., **Kudryashova O.B.**, Ishmatov A.N., Akhmadeev I.R. and Sakovich G.V. Explosion generation of microatomized liquid-drop aerosols and their evolution // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010.

– Volume 83, Number 6, 1149-1169, DOI: 10.1007/s10891-010-0439-7. – <http://www.springerlink.com/content/10403v156217098m/> – 0,25 / 0,05 п.л.

36. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Антонникова А.А. Об одной модели трансформации субмикронного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: XVII Межд. симпозиум [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон.дан. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM). – Доклад № С19, 4 с. – ISBN 978-5-94458-118-1. – 0,25 / 0,06 п.л.

37. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Коровина Н.В. Физико-математическое моделирование импульсной центробежной форсунки // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: докл. Всероссийской конф., г. Томск, 12 - 14 апреля 2011. – Томск, 2011. – С. 91-93. – 0,2 / 0,05 п.л.

38. **Kudryashova O.B.**, Vorozhtsov B.I., Korovina N.V., Akhmadeev I.R., Muravlev Ye.V. Physicomatimatical modeling of explosive-type centrifugal atomizer. – Proceeding of NEM-2011 // La Rochelle, France, 2011. – № NEM006. – 0,3 / 0,06 п.л.

39. **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Муравлев Е.В., Архипов В.А., Ишматов А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования образования субмикронных аэрозольных сред методом взрывного распыления // Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений: материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти В.В. Бахирева, 13-16 сентября 2011 г. (г. Бийск, Алтайский край). – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 149-150. – ISBN 978-5-9257-0214-7. – 0,13 / 0,02 п.л.

40. Павленко А.А., **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И., Ахмадеев И.Р., Титов С.С., Максименко Е.В., Архипов В.А., Бондарчук С.С. Оптические методы дистанционной диагностики аэрозольных сред в широком диапазоне размеров частиц // Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений: материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти В.В. Бахирева, 13-16 сентября 2011 г. (г. Бийск, Алтайский край). – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 151-152. – ISBN 978-5-9257-0214-7. – 0,13 / 0,01 п.л.

41. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., Архипов В.А., **Кудряшова О.Б.** Теоретическая модель для оценки эволюции субмикронного жидкокапельного аэрозоля в краткосрочный промежуток времени при взрывном распыливании // Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений: материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти В.В. Бахирева, 13-16 сентября 2011 г. (г. Бийск,

Алтайский край). – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 156. – ISBN 978-5-9257-0214-7. – 0,06 / 0,02 п.л.

42. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., Архипов В.А., **Кудряшова О.Б.** Эволюция мелкодисперсных капель при импульсном высокоскоростном формировании аэрозольного облака // Аэрозоли Сибири. XVIII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск. – 2011. – С.33. – 0,06 / 0,01 п.л.

43. Коровина Н.В., **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И. Генерация и распространение импульсного субмикронного аэрозоля // Аэрозоли Сибири. XVIII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск. – 2011. – С. 34. – 0,05 / 0,01 п.л.

44. Антонникова А.А., **Кудряшова О.Б.**, Ахмадеев И.Р. Исследование процессов трансформации аэрозолей при ультразвуковом воздействии // Аэрозоли Сибири. XVIII Рабочая группа: материалы конференции. – Томск. – 2011. – С. 35. – 0,06 / 0,02 п.л.

45. Сакович Г.В., Ворожцов Б.И., **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов А.Б., Павленко А.А., Архипов В.А., Муравлев Е.В., Ахмадеев И.Р., Ишматов А.Н., Титов С.С. Применение ВЭМ для генерации субмикронного аэрозоля // Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: к 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН: сборник научных трудов. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 194-211. – ISBN 978-5-02-019007-8. – 0,43 / 0,06 п.л.

46. Павленко А.А., Ворожцов А.Б., Ворожцов Б.И., Архипов В.А., **Кудряшова О.Б.**, Максименко Е.В., Ахмадеев И.Р., Муравлев Е.В., Титов С.С., Бондарчук С.С. Оптическая диагностика аэрозольных полидисперсных сред с широким классом распределения частиц по размерам // Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: к 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН: сборник научных трудов. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 212-228. – ISBN 978-5-02-019007-8. – 1,13 / 0,14 п.л.

47. Антонникова А.А., Коровина Н.В., **Кудряшова О.Б.** Математические модели коагуляции и осаждения аэрозольных систем: материалы Всероссийской научной конференции «Информационные технологии в науке, экономике и образовании», г. Бийск, 22-23 сентября 2011г. / Под ред. О.Б. Кудряшовой; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2011. – С. 10-13. – 0,18 / 0,06 п.л.

48. 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. – 0,2 / 0,04 п.л.

49. 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, 2012. – P. 87-89. – ISBN 987-5-7782-1980-9. – 0,17 / 0,06 п.л.

50. **Kudryashova O.B.**, Vorozhtsov B.I., Korovina N.V. Physicomatimatical modeling of pulse atomizer // High energy materials: demilitarization, antiterrorism and civil application. Abstracts book of the VI International Workshop HEMs-2012. – Gorniy Altai, Russia. – 2012. – P. 33. – 0,06 / 0,02 п.л.

51. Коровина Н.В., **Кудряшова О.Б.**, Ворожцов Б.И. Физико-математическая модель диспергирования жидкости сжатым газом при импульсном воздействии ВВ // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы докладов IV научно-технической конференции молодых ученых, г. Бийск, 27-28 сентября 2012. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – С.144-154. – 0,62 / 0,2 п.л.

52. 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, 27-28 сентября 2012 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2012. – С. 154-165. – 0,68 / 0,34 п.л.

Патенты:

53. 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. – 0,62 / 0,1 п.л.