На правах рукописи

Ишматов Александр Николаевич

ЭВОЛЮЦИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бийск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения РАН
(ИПХЭТ СО РАН)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Ворожцов Борис Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Галенко Юрий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор
Ткаченко Алексей Степанович

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, г. Томск

Защита состоится 23 сентября 2011 г. в 10 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корпус 10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета

Автореферат разослан «___» августа 2011г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время существует ряд задач по высокоэффективному импульсному получению высокодисперсных аэрозолей, применяемых для целей дезинфекции, дезактивации, мгновенного создания жидко-капельных барьеров на пути распространения токсичных газов, взрывных волн в шахтах и на др. объектах, а также для постановки светотеплозащитных аэрозольных барьеров с целью эвакуации персонала и сохранности работоспособности оборудования в условиях пожара. Этим целям и задачам соответствуют устройства взрывного (импульсного) распыливания жидкостей, отличающиеся малым временем образования облака аэрозоля. Использование высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в качестве энергоносителя в распылителях импульсного типа имеет ряд преимуществ, поскольку ВЭМ позволяют получать достаточное количество энергии за короткий промежуток времени, при этом они занимают небольшой объем, что дает возможность автономного конструкторского исполнения распылителей.

В работах [1,2] проводилось построение обобщённой модели и экспериментальные исследования процессов импульсного диспергирования жидких объемов. Было установлено, что для системы «жидкий цилиндрический объем – нагружающий цилиндрический заряд взрывчатого вещества (ВВ), расположенный на оси симметрии жидкого объема» в импульсном режиме можно диспергировать в капли размером менее 15 мкм не более половины жидкого исходного объема, даже в случае достижения предельных режимов распыления. Также известна схема взрывного распыливания на основе ударной гидродинамической трубки с нагружающим зарядом ВВ (далее УГТ) [3], где реализуются отличные от приведенных выше условия и достигается более высокая степень диспергирования с максимально полным расходом жидкости. Такая схема на сегодняшний день изучена не достаточно полно, поэтому проведение комплексного исследования в области взрывного распыливания жидкостей с учетом не только воздействия ударных волн на диспергируемую среду для условий УГТ, но также взаимодействия генерированного облака капель с внешней средой, безусловно, является актуальным, т.к. позволит выявить основные закономерности образования и эволюции дисперсной фазы, развить теорию взрывного диспергирования жидкостей, способствовать повышению эффективности распыливания жидкостей импульсными устройствами.

Взрывной механизм образования жидко-капельных 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 выброса жидкости (при критических числах Вебера), нестационарность процессов эволюции аэрозоля в условиях испарения, полидисперсность распыления, требующих разработки и внедрения новых методик для проведения экспериментального и теоретического исследования. Сложными представляются вопросы, связанные с описанием динамики облаков субмикронных капель, т.к. необхо-

димо 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 является важным при разработке практических приложений.

Исследования диссертационной работы 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», при частичной поддержке гранта РФФИ № 11-01-90701.

Целью диссертационной работы является экспериментально-теоретическое исследование процессов эволюции облака капель, образующихся при взрывном распыливании жидкостей устройствами на основе ударной гидродинамической трубки с нагружающим зарядом ВВ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. На основе аналитического обзора механизмов диспергирования жидкостей выбрать и сформулировать используемые в работе модели и методы расчета применительно к взрывному распыливанию.
2. Провести и обосновать выбор методов и средств экспериментального исследования с учетом специфики взрывного распыливания.
3. Разработать экспериментальный стенд и диагностический комплекс для исследования основных параметров формирующегося облака жидко-капельного аэрозоля.
4. Получить новые экспериментальные данные о дисперсности и динамике испарения капель, а также эволюции аэрозольного облака.
5. Предложить физико-математическую модель и провести оценку процессов эволюции капель применительно к взрывному распыливанию.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны экспериментальный стенд и методики, позволившие впервые провести весь комплекс исследований быстропротекающих процессов при взрывном диспергировании жидкостей, включающих измерение температурных полей, оптической плотности, малоугловой индикатрисы рассеяния света дисперсной средой и скоростную видеорегистрацию.
2. Разработанные методы обеспечили уменьшение времени начала регистрации сигнала лазерной измерительной установкой с 50 мс до 8 мс, что позволило впервые провести измерение дисперсности в факеле распыла на начальных этапах образования аэрозольного облака.
3. Предложена новая методика определения дисперсности капель при распыливании солевых растворов, что позволило проводить электронно-микроскопические исследования частиц жидко-капельного аэрозоля по солевому остатку в широком диапазоне размеров.
4. С помощью разработанного экспериментального комплекса, получены новые данные по характеристикам жидко-капельных сред. Впервые приведены экспериментальные данные о влиянии поверхностного натяжения жидкостей на

дисперсность капель образующихся при взрывном распыливании устройствами на основе УГТ. Также при распыливании растворов NaCl установлено, что морфология солевых частиц может быть различной – сплошные поликристаллические и монокристаллические образования, пустотелые сферы, это указывает на нестационарные условия испарения капель на начальном этапе их эволюции.

5. Предложена физико-математическая модель, позволяющая проводить оценку эволюции капель при взрывном распыливании жидкостей устройствами на основе УГТ с нагружающим зарядом ВВ. Результаты численного эксперимента показали, что в краткосрочный промежуток времени (до нескольких секунд) после взрывного распыления наиболее существенным фактором, влияющим на изменение спектра размеров капель, является испарение.

Практическая ценность работы. Экспериментальное исследование процесса распыливания устройствами в виде УГТ имеет фундаментальное значение с точки зрения понимания и объяснения процессов импульсного диспергирования жидких объемов и дальнейшей эволюции образованных аэрозольных жидко-капельных сред. Исследования необходимы для верификации результатов численных экспериментов и развития физико-математической модели кавитационного взрывного диспергирования жидкостей.

Результаты проведенной работы могут найти применение для исследования устройств создания аэрозолей различной номенклатуры. Разработанный экспериментальный комплекс благодаря широкому спектру возможностей измерений в настоящее время используется для решения различных научных задач при исследовании параметров аэродинамических, гидравлических и ультразвуковых систем распыливания.

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.

На защиту выносятся:

1. Методики комплексного исследования взрывного распыливания жидкостей.
2. Результаты экспериментального исследования эволюции капель при взрывном распыливании жидкостей.
3. Результаты экспериментального исследования влияния поверхностного натяжения жидкости на дисперсность образуемых капель.
4. Методика исследования эволюции капель по распыливанию солевых растворов.
5. Результаты экспериментального исследования морфологии частиц образуемых при взрывном распыливании растворов NaCl.
6. Результаты численного эксперимента оценки эволюции капель при взрывном распыливании жидкостей.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 13 научных работ, в том числе 3 статьи в периодических рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» (г. Бийск, 2009), Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (г. Бийск, 2009), на III Всероссийской конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения высокоэнергетических материалов» (г. Бийск, 2010), High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application: Abstracts of V International Workshop HEMs-2010, 3-ей Всероссийской молодежной Школе-семинаре с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (г. Москва, ФИАН, 2010), XVII Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2010).

Личный вклад диссертанта состоит в формировании научных идей, постановке задач и планировании исследований, разработке теоретической модели эволюции капель аэрозоля, в постановке и проведении 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.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименования, 50 из которых – зарубежные источники. Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 19 таблиц, 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость. Кратко представлено содержание по главам.

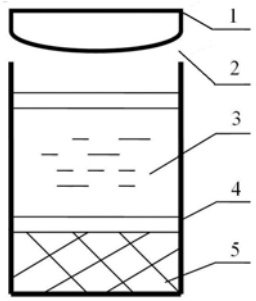
В первой главе приведен обзор литературы, освещающей физику процессов распыливания жидких сред, показано влияние ударных нагрузок на диспергируемую среду, изложено современное состояние проблемы взрывного распыливания. Конкретизированы стадии формирования аэрозольной жидкокапельной среды, характерные для взрывного распыливания:

– диспергирование кавитированной жидкости и формирование жидкокапельного потока в результате срабатывания ВВ;

– эволюция капель в потоке и взаимодействие с внешней средой при высоких скоростях (~ 200 м/с);

– формирование и эволюция аэрозольного облака.

Рассмотрена физико-математическая модель взрывного диспергирования, из которой следует, что при многократном отражении ударной волны в результате срабатывания заряда ВВ, в УГТ (рис. 1) создаются условия для развития кавитации с образованием вспененной структуры. Диспергирование и формирование

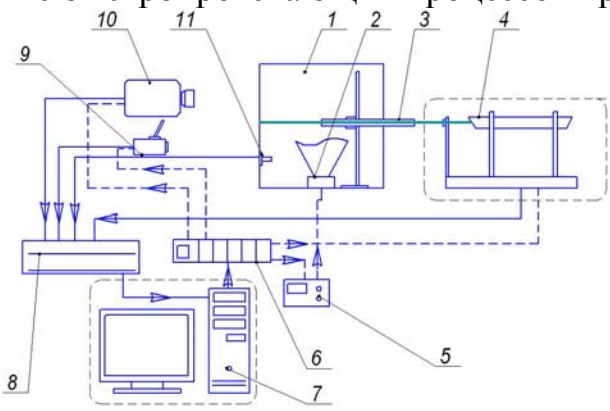


1 – отражатель; 2 - сопло; 3 - жидкость; 4 - корпус; 5 - заряд ВВ
Рис. 1. Схема УГТ [3]

жидко-капельного потока происходит в результате взрывного разрушения кавитационных пузырьков при выбросе жидкости из сопла и дальнейшего дробления капель при взаимодействии с воздухом при высоких скоростях (~200 м/с).

Образование облака жидко-капельного аэрозоля, содержащего частицы субмикронных размеров, происходит *однократно, за время порядка нескольких мс*. Это накладывает существенные ограничения на методы исследования аэрозолей, поскольку измерение дисперсных характеристик ведется по истечении определенного времени после распыливания, и *результаты измерений характеризуют аэрозоль, измененный в результате эволюции капель*.

<u>Во второй главе</u> проведен сравнительный анализ методов измерения для решения задач исследования. Разработаны экспериментальные методики. Создан экспериментальный стенд (рис. 2), реализующий комплексное исследование быстропротекающих процессов при взрывном распыливании.



а)

б)

1 – измерительный бокс; 2 – распылитель; 3 – защитная трубка; 4 – «ЛИД-2М»; 5 – устройство инициирования; 6 – устройство синхронизации; 7 – ЭВМ; 8 – система сбора информации; 9 – тепловизор; 10 – скоростная видеокамера; 11 – датчик влажности и температуры
Рис. 2. Структурная схема (а) и общий вид (б) экспериментального комплекса

Стенд обеспечивает проведение:

– измерений относительной влажности в диапазоне от 0 % до 100 % и температуры в интервале от 0 °С до 50 °С с частотой 1 Гц;

– исследований эволюции дисперсных характеристик аэрозоля во всем временном промежутке от его образования до исчезновения, в диапазоне размеров частиц от 1 мкм до 100 мкм, с частотой до 100 кГц;

– высокоскоростной видеорегистрации взрывного распыливания и развития облака аэрозоля с частотой до 10000 Гц;

– исследований температурных полей в облаке аэрозоля с возможностью отслеживать разность температур в 0,08 °С;

– измерений дисперсности частиц аэрозоля в диапазоне от 10 нм до 3000 мкм по методике заключающейся в микроскопическом исследовании кристаллов соли, образуемых в результате эволюции жидко-капельного аэрозоля водосо-

держащих растворов NaCl при взрывном распыливании с последующим восстановлением первоначальных размеров капель раствора.

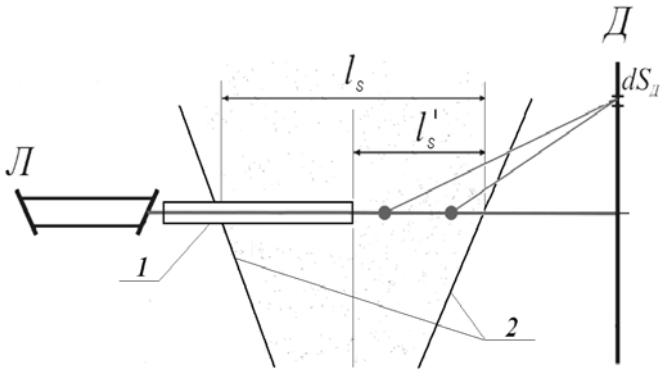
Исследования параметров дисперсности полей аэрозолей, проводилось методом светорассеяния под малыми углами на лазерной измерительной установке «ЛИД-2М» [4]. Использование метода малоуглового рассеяния неприменимо для решения задач измерений в условиях многократного рассеяния света. При восстановлении функции распределения частиц по размерам двукратное и многократное рассеяние света на них можно не учитывать в случае выполнения условия для оптической толщины дисперсной среды τ:

$$\tau < 1{,}5\,, \qquad (1)$$

$$\tau = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = k\, l_s\,,$$

где I – интенсивность излучения после прохождения рассеивающего объема; I_0 – интенсивность излучения в отсутствии частиц в объеме; k – показатель ослабления среды; l_s – длина оптического пути, м.

При исследованиях аэрозолей повышенной плотности, к которым относятся аэрозоли, получаемые при взрывном распыливании, эффект многократного рассеянии света каплями становится значительным. Для уменьшения влияния многократного рассеяния предложено использовать изолирующее устройство в виде защитной трубки, уменьшающей длину оптического пути вдвое, как показано на рис. 3 (проведение измерений без потери информации о потоке в этом случае возможно при его симметричности).



а)

б)

Л – лазер; 1 – защитная трубка; 2 – границы аэрозольного облака; *Д* – плоскость, на которой расположены фотоприемники; $dS_Д$ – площадка, на которую приходит рассеянное под различными углами излучение; l_s – длина оптического пути без использования защитной трубки; l_s' – длина оптического пути с использованием защитной трубки

Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

При длине оптического пути $l_S' = l_S / 2$ оптическая толщина τ' для той же дисперсной среды:

$$\tau' = \ln\left(\frac{I_0}{I'}\right) = k\, l_s' = \tau / 2\,. \qquad (2)$$

где I' – интенсивность излучения после прохождения рассеивающего объема на длине оптического пути l_S'. Условие (1) справедливо и для τ':

$$\tau' < 1{,}5\,.$$

Принимая во внимание (2) перепишем условие (1) для начального значения τ:

$$\tau < 3.$$

Таким образом, использование защитной трубки (сокращения оптического пути вдвое $l'_S = l_S/2$) позволило повысить порог для проведения измерений с $\tau < 1{,}5$ до $\tau < 3$.

Возможности измерения дисперсности частиц аэрозоля с помощью установки «ЛИД-2М» ограничены размерами от 1 мкм до 100 мкм. Согласно физико-математической модели кавитационного диспергирования при взрывном распыливании образуется широкий спектр частиц, в том числе и наноразмерных. В более широком диапазоне параллельно с измерениями на лазерной установке можно проводить измерения отбором проб (микроскопическое исследование, оптические счетчики частиц и т.п.). Проведение пробоотбора требует некоторого времени, что является существенным недостатком, т.к. за это время размеры первоначальных капель могут меняться вследствие испарения. Исследование фракции наноразмерных частиц с использованием электронного микроскопа ограничено твердыми веществами и возможно только по методу отпечатков капель на твердой подложке или методом замораживания капель. Была разработана экспериментальная методика, заключающаяся в исследовании дисперсности кристаллов соли, образуемых в результате эволюции жидкокапельного аэрозоля водосодержащих растворов NaCl с последующим восстановлением размеров первоначальных капель. Методика построена на обратной задаче получения тонкодисперсных порошков при распылении растворов. Она отличается простотой и возможностью с достаточной точностью оценивать размеры образуемых капель как по методу малоуглового рассеяния, так и с помощью методов электронной микроскопии. Оценка степени уменьшения аэрозольных частиц вследствие испарения определяется из условия равенства массового содержания неиспаряемой примеси в капле первоначального раствора и частицы после полного испарения растворителя:

$$m = \left(C_m\right)_2 \rho_{p-pa} V_1 = \rho_1 V_2,$$

где m – масса примеси в капле раствора, кг; $\left(C_m\right)_2$ – относительная массовая концентрация примеси в растворе; ρ_{p-pa}, ρ_1 – плотность раствора и примеси в растворе, соответственно, кг/м^3; V_1, V_2 – объем капли и примеси в ней, соответственно, м^3.

Выразив объем через диаметр сферы, получили уравнение для расчета диаметра конечной сферической частицы D_2, оставшейся после испарения растворителя из начальной капли диаметром D_1:

$$D_2 = D_1 \sqrt[3]{\frac{\left(C_m\right)_2 \rho_{p-pa}}{\rho_1}} \qquad (3)$$

Выражение (3) позволяет оценить размер образуемых капель по известным конечным частицам. Данная особенность полезна для исследования жидкокапельных аэрозолей содержащих наноразмерные частицы методами электронной микроскопии.

Пример расчета изменения размеров капель при испарении раствора NaCl

различных концентраций приведен на рис. 4. Большинство твердых частиц являются несферическими и имеют неровности по поверхности, поэтому, распределение частиц по размерам описывалось как статистический результат анализа каждой частицы, характеризующейся эквивалентным диаметром. В соответствии с рис 5(а) D_a определяется как *диаметр эквивалентной сферы* площадь, которой равна площади проекции частицы. На рис 5(б) расстояние между двумя, наиболее отдаленными точками определяют как наибольший диаметр D_L. Наибольший отрезок, перпендикулярный D_L определяется как *эквивалентный наименьший диаметр* D_S. Соотношение между двумя описанными величинами: $D_a \geq D_S$. Если проекция сферическая, обе величины равны.

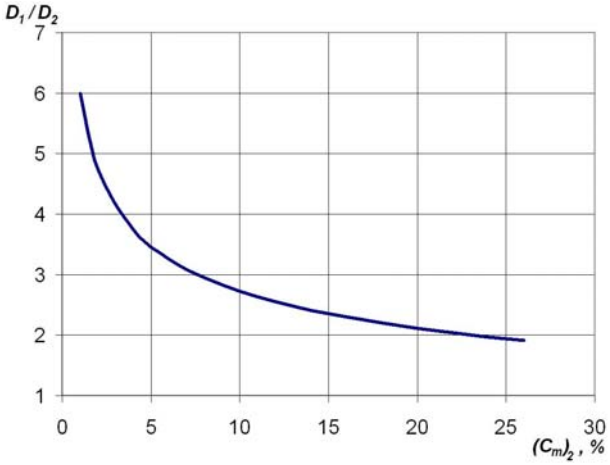
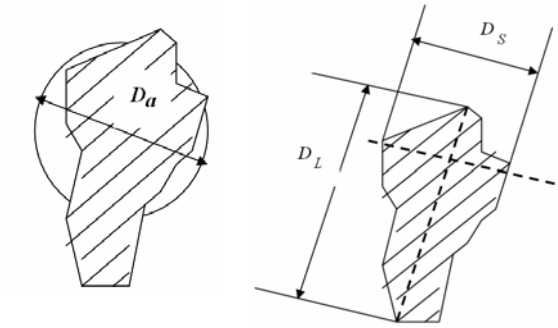


Рис. 4. Расчетный график изменения размеров капель в зависимости от массовой относительной концентрации NaCl в распыливаемом растворе

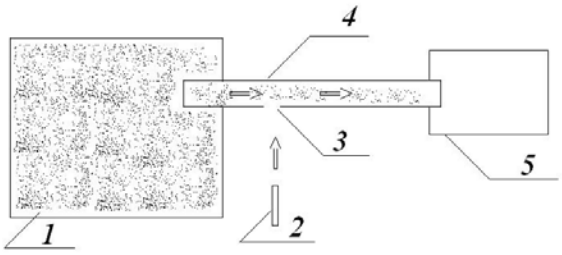


а) диаметр эквивалентной сферы

б) наибольший и наименьший эквивалентный диаметры

Рис. 5. Эквивалентный диаметр частицы

Схема проведения пробоотбора на полированные металлические пластины и оптические зеркала с металлическим напылением приведена на рис. 6.



1 – аэрозольная камера; 2 – предметная пластина; 3 – отверстие под пластину; 4 – трубка; 5 – насос

Рис. 6. Схема проведения пробоотбора

Главное достоинство методики заключается в том, что она допускает проведение комплексного исследования: параллельно с пробоотбором можно вести измерения оптическими методами и т.п. Это особенно актуально при проведении единичных экспериментов, которые в силу различных причин не могут быть проведены повторно.

<u>В третьей главе</u> представлены результаты исследования эволюции капель в ограниченном объеме развивающегося облака аэрозоля. Показано влияние поверхностного натяжения на характеристики взрывного диспергирования жидкостей устройствами на основе УГТ. Приведены экспериментальные данные исследования дисперсности взрывного распыливания в широком диапазоне измеряемых размеров частиц.

Проведение экспериментов связано с высокоэнергетическими (высокоскоростными, скоротечными) процессами. Поэтому, в первую очередь, обеспечивалась безопасность работы персонала на экспериментальном стенде, путем ис-

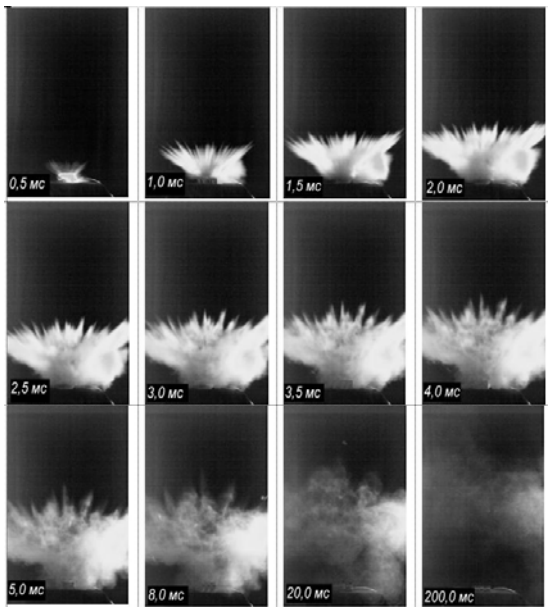
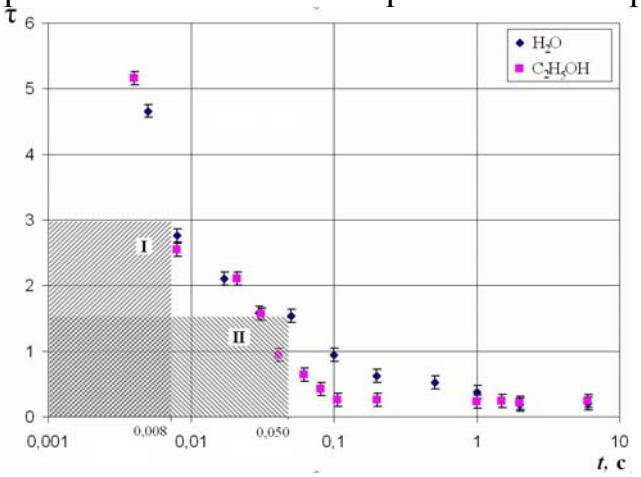


Рис. 7. Кинограмма процесса взрывного распыливания

пользования защитных экранов, кожухов, стенд находился в отдельном изолированном помещении. При проведении экспериментального исследования в целях безопасности масса ВВ, используемого в отдельном опыте, не превышала 0,5 г, при этом масса распыляемой жидкости составляла не более 10 г. Скоростная видеосъемка процесса импульсного распыливания (рис. 7) показала, что факел распыла имеет конусообразную симметричную форму с углом раскрытия 90°, выброс жидкости из распылителя заканчивается через 3 мс, скорость выброса соответствует 200 м/с, формирование облака происходит за 8 мс, его развитие удается наблюдать в течение 200 мс. По изменению геометрических параметров оценивалась динамика увеличения объема облака при выбросе и выбиралась область для проведения измерений дисперсных характеристик лазерной установкой «ЛИД-2М».

Проведенная оценка температурного поля в аэрозоле с помощью бесконтактного метода регистрации тепловизором показала, что понижение температуры в облаке за счет испарения капель и расширения газов составляет ~ 2 °С.



I – область ограничения измерения с применением защитной трубки; II – область ограничения измерения без применения трубки

Рис. 8. Изменение оптической толщины в эксперименте

Экспериментальное исследование развития дисперсности капель (рис. 8, таблица 1) в закрытой камере показало, что проводить измерение по разработанной методике для «ЛИД-2М» с изолирующим устройством (защитной трубкой) без учета влияния многократного рассеяния света на частицах аэрозоля можно начиная с 8 мс, тогда как без использования защитной трубки – с 50 мс. Вести измерения дисперсных характеристик в течение промежутка времени до 8 мс не представлялось возможным из-за высокой оптической толщины облака.

В центре облака характеристики, начиная с 8 мс вплоть до 2 с развития практически постоянные. Исследование на границе облака показало существенное изменение дисперсности капель (для оценки дисперсности использовался среднемассовый характеристический диаметр D_{43}) уже к 1 с (таблица 1). Это связано, прежде всего, с неустоявшейся структурой облака обусловленной циркуляцией и испарением: капли, находящиеся у границы, более подвержены испарению, чем капли, находящиеся в центре.

Таблица 1 – Изменение D_{43} в облаке при распыливании дистиллированной воды

Параметр	Значение параметра								
t, с	0,008	0,02	0,03	0,040	0,1	0,2	1,0	2,0	6,0
D_{43}, мкм, граница облака	15,9	16,6	16,5	17,5	17,2	16,9	10,8	8,8	8,5
D_{43}, мкм, центр облака	16,8	16,1	16,5	16,7	16,5	17,0	17,3	14,5	13,8

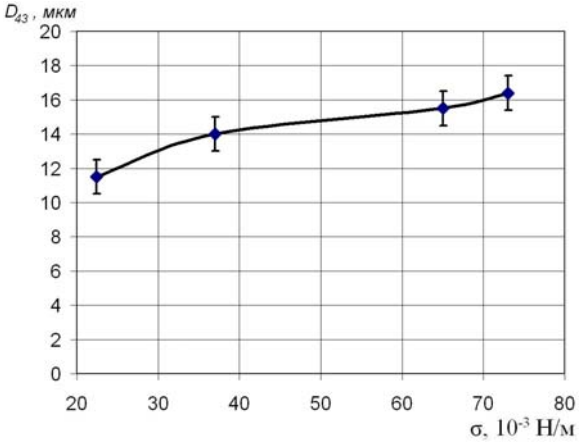
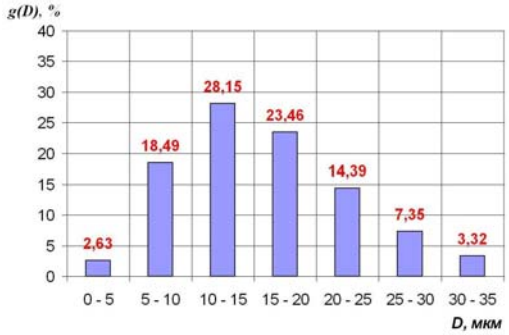
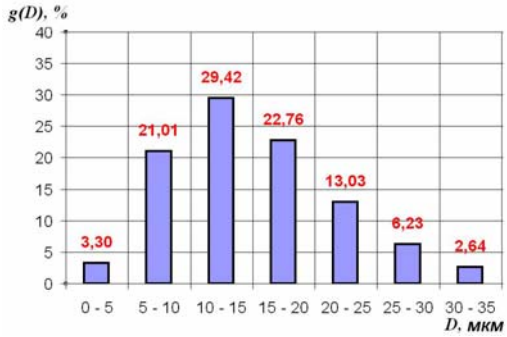


Рис. 9. Влияние поверхностного натяжения на среднемассовый диаметр (D_{43}) капель в аэрозоле

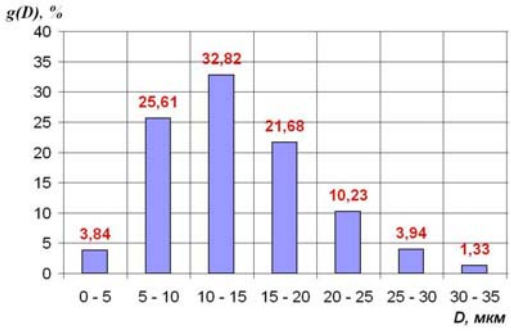
Серия экспериментов по распыливанию модельных жидкостей (растворов этилового спирта) позволила установить зависимость дисперсности капель аэрозоля от поверхностного натяжения σ (рис. 9, 10). Для проведения исследования выбирались растворы с 20 %, 25 %, 96 % содержанием спирта и дистиллированная вода. Эксперименты проводились в нормальных условиях (298 °К, влажность 50 %) при массе распыливаемой жидкости равной 1 г.



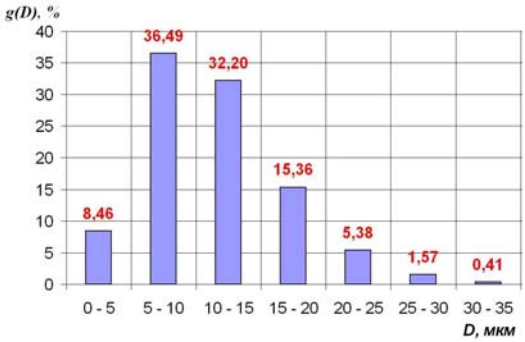
а) дистиллированная вода ($\sigma=73{,}0\cdot10^{-3}$ Н/м; $D_{43}=16{,}4$)



б) раствор этилового спирта 20 % ($\sigma=65{,}0\cdot10^{-3}$ Н/м; $D_{43}=15{,}5$)



в) раствор этилового спирта 25 % ($\sigma=37{,}0\cdot10^{-3}$ Н/м; $D_{43}=14{,}0$)

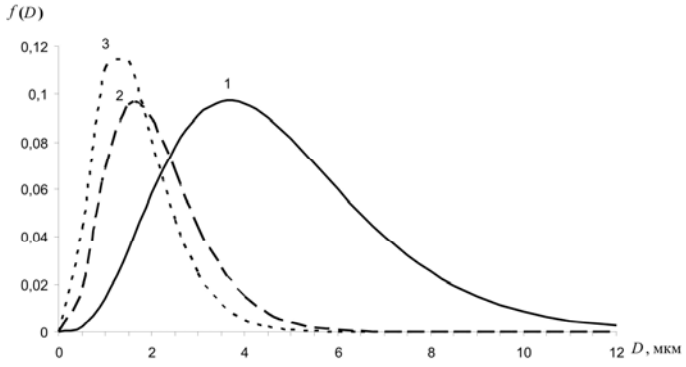


г) спирт этиловый 96% ($\sigma=22{,}4\cdot10^{-3}$ Н/м; $D_{43}=11{,}5$)

Рис. 10. Массовое распределение капель по размерам

Установленная экспериментальная зависимость влияния поверхностного натяжения на дисперсность взрывного распыливания имеет существенное значение для развития кавитационной теории взрывного диспергирования жидких объемов.

В соответствии с разработанными методиками проведена серия экспериментов по распыливанию растворов NaCl для комплексного исследования, уточнения



1 – 0,008 с; 2 – 6,0 с; 3 – 12,0 с

Рис. 11. Счетная функция распределения частиц по размерам в эксперименте

сведений о генезисе аэрозоля и влияния примесей на процесс образования дисперсных частиц. Результаты измерений функции распределения частиц аэрозоля по размерам приведены на рис. 11.

Для распыления использовался 20 %-ный раствор NaCl. Выбор данной концентрации обусловлен относительно небольшим отличием размера капли раствора и конечного кристалла соли, образуемого при испарении. В результате исследования был сделан вывод, что меняющиеся значения распределения в течение первых секунд указывают на сложный механизм образования аэрозольного поля, который зависит от процессов газодинамического течения, генерированного горением ВВ, процессов диффузии частиц и, особенно, процессов испарения капель аэрозоля.

Электронно-микроскопическое исследование частиц, получаемых при взрывном распыливании растворов NaCl, установило, что их морфология может быть различной – сплошные поликристаллические и монокристаллические образования, пустотелые сферы (рис. 12). Приведенные данные указывают на нестационарные условия испарения капель на начальном этапе их эволюции. Установлено, что часть массы распыленной жидкости переходит в нанометровую область, находится за пределами возможностей измерения установкой «ЛИД-2М» и требует дополнительного более глубокого исследования с использованием новых измерительных устройств и методик.

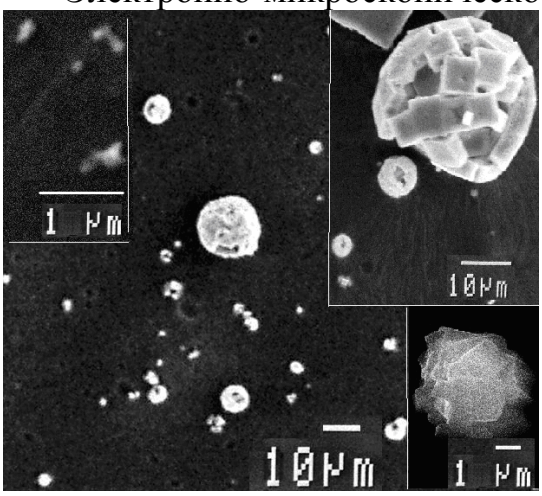


Рис. 12. Аэрозольные частицы, образованные при взрывном распыливании 20 % раствора NaCl

<u>В четвертой главе</u> приведена теоретическая оценка экспериментальных результатов с помощью численного моделирования.

Импульсный дисперсный поток (рис. 13) рассматривается как конусообразное тело вращения и разбивается на зоны, как показано на рис. 14. С точки зрения конечного результата процесс диспергирования логично рассматривать на расстоянии до 10 см от сопла распылителя (зона интенсивного дробления), т.к. в сильно турбулизованных импульсных потоках на расстояниях, превышающих 10 см, возникает *кризис сопротивления* движению частиц дисперсной фазы, – сопротивление движению капель в потоке оказывается меньше. На этом участке (зона интенсивного дробления) происходит распад кавитированной жидкости и дробление капель на высоких скоростях. Дальнейшее движение капель автомодально и изменение дисперсности происходит только вследствие внешних факторов. Зона образования жидко-капельного облака, также характеризу-

ется высокими скоростями. Длина ее соответствует 20-150 см, в зависимости от объема диспергируемой жидкости и конструктивного исполнения распылительного устройства. Конечный участок соответствует зоне развития облака, в которой частицы находятся в уравновешенном состоянии, и изменение в облаке происходит за счет испарения, конденсации, коагуляции и гравитационного осаждения частиц.

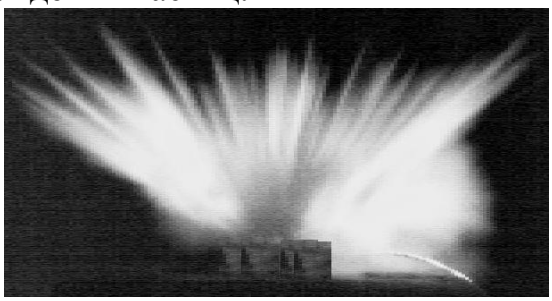


Рис. 13. Импульсный поток

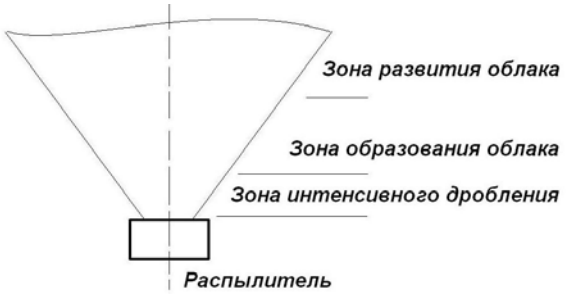


Рис. 14. Схема деления потока

При моделировании рассматривается множество капель, движущихся с различными скоростями, вследствие разных начальных условий, различных масс и сил сопротивления. Для оценки процессов на указанных стадиях образования и эволюции капель проведено сравнение их характерных времен (таблица 2):

$$t_1 = \frac{2}{36}\frac{\rho_d D^2}{\mu_g};\ t_2 = 0{,}25D^2/æ;\ t_3 \approx \frac{\rho_d D^2}{\mu_d};\ t_4 = \frac{18\,\mu_g\, H}{\rho_d\, D^2 g};\ t_5 = \frac{\rho_d\, D^2}{2D_{AB}(C_s - C_\infty)},$$

где t_1 – характерное время скоростной релаксации капель, с; t_2 – характерное время выравнивания температуры в капле, с; t_3 – характерное время затухания нестационарных возмущений в капле за счет вязкой диссипации энергии, с; t_4 – характерное время гравитационного осаждения капли, с; t_5 – характерное время испарения капли, с; ρ_d – плотность вещества частиц, кг/м^3; D – диаметр капли, м; μ_g – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; æ – коэффициент температуропроводности, м^2/с; μ_d – коэффициент динамической вязкости вещества капли, Па·с; H – высота нижней границы облака, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; D_{AB} – коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе, м^2/с; C_S, C_∞ – концентрация равновесных по отношению к капле паров над ней и в пространстве, кг/м^3.

Таблица 2 – Характерные времена процессов при эволюции капель

Параметр	Значение параметра					
D, мкм	1	5	10	15	20	30
t_1, с	$0{,}3\cdot10^{-5}$	$8{,}8\cdot10^{-5}$	$35{,}4\cdot10^{-5}$	$79{,}6\cdot10^{-5}$	$141{,}5\cdot10^{-5}$	$318{,}5\cdot10^{-5}$
t_2, с	$0{,}2\cdot10^{-5}$	$4{,}4\cdot10^{-5}$	$17{,}8\cdot10^{-5}$	$40{,}2\cdot10^{-5}$	$71{,}4\cdot10^{-5}$	$160{,}7\cdot10^{-5}$
t_3, с	10^{-4}	$2{,}5\cdot10^{-4}$	10^{-3}	$2{,}3\cdot10^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$9{,}0\cdot10^{-3}$
t_4, с	10^5	$0{,}4\cdot10^3$	$0{,}1\cdot10^3$	44,7	25,2	11,9
t_5, с	$7\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$6{,}8\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-1}$	0,612

Таким образом, в короткий промежуток времени (до нескольких секунд) после взрывного образования высокодисперсного аэрозоля наиболее существенным фактором, влияющим на изменение спектра размеров капель, является испарение. Процессы скоростной релаксации, выравнивания температуры и не-

стационарные возмущения в объеме капли при проведении оценок изменения дисперсности можно не учитывать, также как и гравитационное осаждение.

Принимался ряд допущений:

- в соответствии с экспериментальными данными размеры капель находятся в пределах от 1 мкм до 30 мкм;
- аэрозоль находится в ограниченном объеме – 1 м^3;
- расстояние между каплями больше их среднего размера;
- температура в облаке постоянная;
- капли в процессе движения сохраняют свою сферическую форму;
- капли не сталкиваются, не дробятся и не коагулируют;
- в каждой капле, при ее испарении, происходит нуклеация только одного кристалла, форма которого близка к шарообразной;
- облако частиц пространственно однородно;

Для описания эволюции капель с учетом принятых допущений предложена модель на основе теории диффузионного испарения:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{D_{AB}}{D\,\rho_d}\left(x_{\mathrm{H_2O}}(t)\,C_S - C_\infty\right)K_F\,, \qquad (4)$$

где $x_{H_2O}(t)$ – мольная доля воды в капле раствора NaCl; K_F – коэффициент массоотдачи, учитывающий увеличение скорости испарения капель при их движении;

$$x_{H_2O}(t) = \frac{\dfrac{m_{\mathrm{H_2O}}(t)}{M_{\mathrm{H_2O}}}}{\dfrac{m_{\mathrm{H_2O}}(t)}{M_{\mathrm{H_2O}}} + \dfrac{m_{\mathrm{NaCl}}(t)}{M_{\mathrm{NaCl}}}}\,;\ K_F = \begin{cases} 1{,}00 + 0{,}108\left(\left(\mathrm{Re}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\mathrm{Sc}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^2, \text{ при } \mathrm{Re} < 25 \\ 0{,}78 + 0{,}308\left(\left(\mathrm{Re}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\mathrm{Sc}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^2, \text{при } \mathrm{Re} \geq 25. \end{cases},$$

здесь $m_{\mathrm{H_2O}}$ – масса воды в капле, кг; $M_{\mathrm{H_2O}}$ – молярная масса воды, , кг/моль; m_{NaCl} – масса NaCl в капле, кг; M_{NaCl} – молярная масса NaCl, , кг/моль; Re – число Рейнольдса; $\mathrm{Sc} = \dfrac{\mu_g}{D_{AB}\,\rho_g}$ – число Шмидта.

Для оценки процессов испарения капель раствора с помощью предложенной модели проведено сравнение характерных времен испарения t_5 и диффузии соли в объеме капли t_6.

$$t_6 = \frac{D^2}{4D'_{AB}}\,,$$

где D'_{AB} – коэффициент диффузии соли в растворе, м^2/с.

Оценка характерных времен процессов (таблица 3) указывает, что процессы диффузии соли в капле успевают проходить быстрее процесса испарения.

Таблица 3 – Характерные времена процессов при испарении капель раствора NaCl

Параметр	Значение параметра					
D, мкм	1	5	10	15	20	30
t_5, с	$0{,}7\cdot10^{-3}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$6{,}8\cdot10^{-2}$	$15{,}3\cdot10^{-2}$	$27{,}2\cdot10^{-2}$	$61{,}2\cdot10^{-2}$
t_6, с	$0{,}2\cdot10^{-3}$	$0{,}5\cdot10^{-2}$	$2{,}3\cdot10^{-2}$	$5{,}1\cdot10^{-2}$	$9{,}0\cdot10^{-2}$	$20{,}4\cdot10^{-2}$

Предложенная модель для оценки эволюции капель имеет упрощенный вид, поскольку не учитывает образования химических связей в растворе, физико-химические процессы кристаллизации, влияния двойного электрического слоя, образующегося при диссоциации молекул соли и воды и многих других факторов. Поэтому была показана ее адекватность для капель размерами от 1 мкм до 100 мкм, путем сравнения расчетов с экспериментальными данными, полученными при микроскопическом исследовании испарения отдельных капель (рис. 15 и 16). В качестве примера рассматривались капли 20 %-ного водного раствора NaCl при атмосферном давлении, температуре 293 К, относительной влажности воздуха 50 %. При моделировании с течением времени вода из капли испаряется, соответственно ее мольная доля в растворе уменьшается, скорость испарения асимптотически приближается к нулевому значению (рис. 17), поэтому в расчетах за конец испарения принималось значение времени, при котором дальнейшее изменение диаметра частицы незначительно.

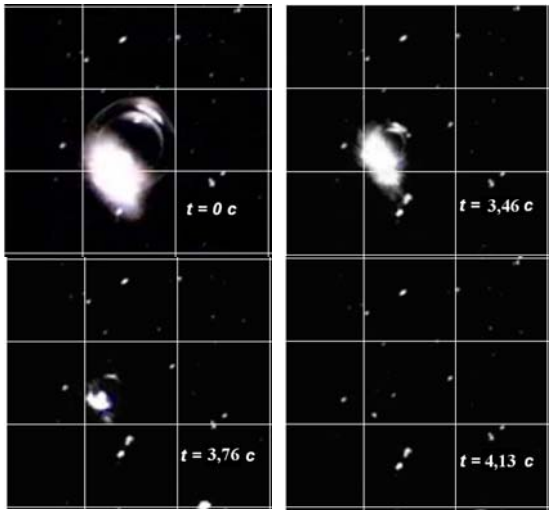
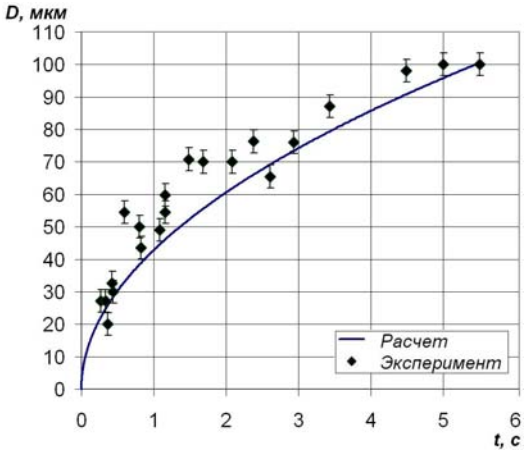
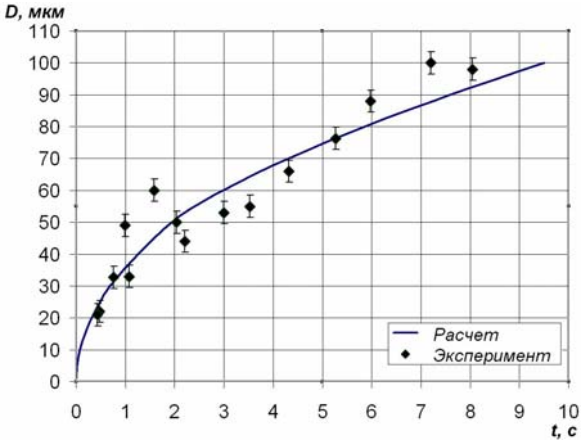


Рис. 15. Динамика испарения 100 мкм капли дистиллированной воды (шаг сетки 100 мкм)



а) дистиллированная вода



б) 20 %-ный раствор NaCl

Рис. 16. Динамика испарения капель

В соответствии с теоретической моделью проведен численный эксперимент изменения дисперсности капель в облаке для распыливания 1 г дистиллированной воды (таблица 5) с принятым допущением, что облако мгновенно расширилось до размеров, соответствующих времени 0,2 с.

Таблица 5 – Изменение размеров капель в облаке за 0,2 с

Параметр	Значение параметра					
D_1, начальные размеры капель, мкм	5	10	15	20	25	30
D_2, конечные размеры капель, мкм	3,91	9,50	14,67	19,75	24,80	29,84
D_1/D_2, %	21,80	5,00	2,22	1,25	0,80	0,53
Время испарения в облаке, с	0,05	–	–	–	–	–

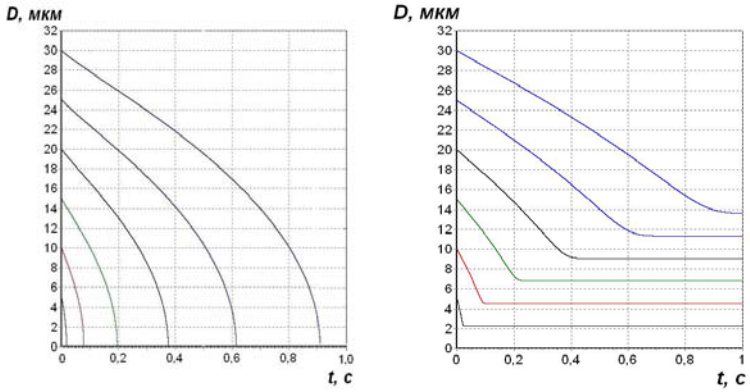
Численные расчеты изменения дисперсности капель в облаке в зависимости от массы распыляемой дистиллированной воды и объема, в котором происходит распыливание (таблица 6), показали, что при относительно большой испарившейся массе воды из капли ее размер меняется не так значительно.

Таблица 6 – Результаты расчета изменения дисперсности аэрозоля в ограниченном объеме

Параметр		Значение параметра						
Объем, 10^{-3} м^3		0,52	14	65	113	180	268	1000
Диаметр сферического облака, м		0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
Масса испарившейся из капель воды, г		0,012	0,324	1,500	2,592	4,116	9,600	12,000
Изменение дисперсности (%) в зависимости от массы распыляемой воды	1 г	0,4	12,23	–	–	–	–	–
	5 г	0,08	2,20	11,21	21,61	43,87	–	–
	10 г	0,04	1,09	5,27	9,52	16,20	65,80	–

Таким образом, показано, что в первые 0,2 с с момента образования аэрозоля существует ограничение на испарение капель в облаке.

Результаты расчетов эволюции капель воды и 20 %-ного раствора NaCl приведены на рис. 17 и в таблице 7. На рис. 17б наблюдается стабилизирующее действие NaCl на испарение капель водного раствора: скорость испарения падает вследствие большего содержания примеси в капле. Неиспаряемая примесь также ограничивает и конечный размер оставшихся частиц.



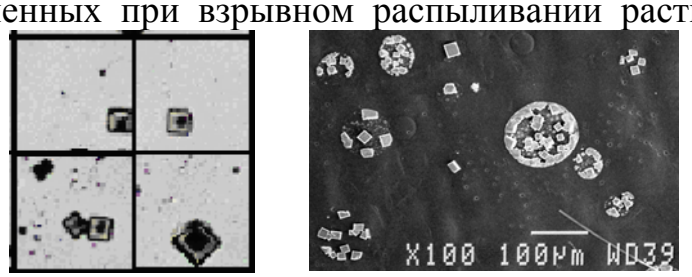
а) дистиллированная вода б) 20 % раствор NaCl

Рис. 17. Динамика испарения капель в облаке

Таблица 7 – Расчет испарения капель 20 %-ного раствора NaCl

Параметр	Значение параметра					
D_1, Начальные размеры капель, мкм	5	10	15	20	25	30
D_2, Конечные размеры капель	3,11	6,35	9,63	12,89	16,13	19,35
D_1/D_2, %	37,80	36,50	35,80	35,55	35,48	35,50
Влажность в облаке, при которой закончилось испарение, %	63,51	68,24	70,68	71,43	71,53	71,53
Время, за которое произошло испарение, с	0,023	0,097	0,223	0,413	0,638	1,121
Испарившаяся вода из капель, %	93,69	92,26	91,32	91,06	91,05	91,05

В результате электронно-микроскопического исследования частиц, полученных при взрывном распыливании растворов NaCl, установлено, что они представляют собой пустотелые сфероиды (рис. 12). Эти результаты не соотносятся с результатами аэродинамического распыливания растворов NaCl (рис. 18а.) и при испарении капель с подложки (рис. 18б). Очевидно, что морфология частиц определяется скорос-



а) аэродинамическое распыливание б) испарение капель с подложки

Рис. 18. Структура солевого остатка

тью испарения растворителя из капли, обусловленной концентрацией раствора, дисперсностью капель и скоростью их движения, температурным режимом, аэродинамической структурой двухфазного потока и т.д.

Предположим, что при достижении концентрации соли на поверхности капли критического значения перенасыщения $C_{кр}$, происходит ее мгновенная кристаллизация в той части объема капли, где концентрация $C \geq C_*$, (C_* – равновесная концентрация для данной температуре). При этом в зависимости от скорости испарения растворителя и скорости диффузии соли возможны два варианта – кристаллизация соли в объеме капли с образованием одного или нескольких монокристаллов и кристаллизация на поверхности капли с образованием множества кристаллов. Кристаллизация соли в объеме капли происходит, если к моменту достижения $C_{кр}$ на поверхности капли, величина $C \geq C_*$ во всем ее объеме. Кристаллизация соли на поверхности капли с образованием пустотелой сферической частицы происходит, если $C \geq C_*$ лишь для периферийной области капли. Для NaCl свойственно образование кристаллов кубической сингонии, что и наблюдается на рис. 12, 19.

В работе [5] показано, что морфология частиц определяется параметром $K_t = t_5 / t_6$. Приведены расчеты, показавшие, что граничным условием, отделяющим режимы образования полых и сплошных частиц является K_t^*=0,6. При $K_t > K_t^*$ процесс испарения происходит быстрее диффузионного переноса и образуются полые частицы; при $K_t < K_t^*$ испарение идет медленнее диффузии, и образуются сплошные частицы. Из таблицы 5 следует, что $K_t = 0{,}33$, т.е. по оценочным теоретическим соображениям для данных условий распыливания должны образовываться сплошные частицы, что противоречит данным экспериментального исследования.

Таким образом, можно утверждать, что при взрывном распыливании создаются условия быстрого испарения капель за счет высоких скоростей выброса жидкости из сопла. Характерное время скоростной релаксации капель намного меньше времени испарения, но в течение этого времени испарение происходит намного быстрее, чем стационарное испарение тех же капель, т.е. процесс испарения в этот промежуток времени происходит быстрее диффузии. В итоге на поверхности капли концентрация соли близка к значению перенасыщения и даже такого короткого времени достаточно для начального образования корки кристаллов и дальнейшего образования полых сферических частиц за счет вторичного осаждения соли на внутренней поверхности солевой корки.

В заключении сформулированы основные выводы:

1. На основании проведенного аналитического обзора конкретизированы стадии формирования аэрозольной жидко-капельной среды, характерные для взрывного распыливания:

– диспергирование кавитированной жидкости и формирование жидко-капельного потока в результате срабатывания ВВ;

– эволюция капель в потоке и взаимодействие с внешней средой при высоких скоростях (~ 200 м/с);

– формирование и эволюция аэрозольного облака.

2. Разработан экспериментальный стенд и методики, позволившие проводить полный комплекс исследований быстропротекающих процессов, включающее измерение температурных полей, оптической плотности и малоугловой индикатрисы рассеяния света дисперсной средой, видеорегистрацию, а также возможность проведения электронно-микроскопических исследований.

3. Результаты экспериментального исследования по измерению дисперсности жидко-капельных аэрозолей с применением лазерной измерительной установки выявили ограничение на реализацию метода малоуглового рассеяния при взрывном распыливании, вызванное влиянием многократного рассеяния света на частицах аэрозоля. Для уменьшения такого влияния на результаты измерений применено изолирующее устройство в виде защитной трубки, что обеспечило уменьшение времени начала регистрации с 50 мс до 8 мс и позволило впервые провести измерение дисперсности в факеле распылителя на основе УГТ с нагружающим зарядом ВВ на начальных этапах образования аэрозоля.

4. Впервые получены экспериментальные данные о процессах диспергирования жидкостей, эволюции дисперсных характеристик жидко-капельных облаков при взрывном распыливании устройствами в виде УГТ. Показано, что в центре облака характеристики, начиная с 8 мс вплоть до 2 с развития практически постоянные, а на границе облака существенное изменение дисперсности капель наступает уже к 1 с. Получены экспериментальные данные о влиянии поверхностного натяжения на дисперсность взрывного распыливания.

5. Предложена новая методика определения дисперсности капель при распыливании солевых растворов, заключающаяся в проведении электронно-микроскопического исследования жидко-капельного аэрозоля по солевому остатку в широком диапазоне размеров частиц.

6. Установлено, что морфология частиц, получаемых при взрывном распыливании растворов NaCl, может быть различной – сплошные поликристаллические и монокристаллические образования, пустотелые сферы. Приведенные данные указывают на нестационарные условия испарения капель на начальном этапе их эволюции (до 8 мс с начала распыливания).

7. Предложена физико-математическая модель эволюции капель при взрывном распыливании. В соответствии с которой выявлены следующие закономерности данного процесса:

- в краткосрочный промежуток времени (до нескольких секунд) после взрывного образования высокодисперсного аэрозоля наиболее существенным фактором, влияющим на изменение спектра размеров капель, является испарение;

- при взрывном распыливании создаются условия быстрого испарения капель за счет высоких скоростей выброса жидкости из сопла, на что указывает морфология частиц при распыливании растворов NaCl.

- короткого времени в момент выброса достаточно для начального образования корки кристаллов на поверхности капель и дальнейшего образования полых сферических частиц за счет вторичного осаждения NaCl на внутренней поверхности солевой корки.

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н., проф. В.А. Архипову (зав. отделом газовой динамики физики взрыва НИИ ПММ ТГУ) за обсуждение результатов работы и ряд критических замечаний, д.т.н. О.С. Татаринцевой (зав. лабораторией материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН) за консультации и помощь в оформлении результатов работы, а также коллективу лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН за помощь, оказанную в ходе проведения исследований.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Ишматов А.Н. Исследование развития высокодисперсного аэрозоля жидкости с учетом влияния слабоиспаряемой примеси / А.Н. Ишматов, Б.И. Ворожцов // Краткие сообщения по физике. ФИАН. – Москва. – 2010 – № 1. – С. 22-27.

Ishmatov A.N. Study of the evolution of a finely dispersed liquid aerosol, taking into account the effect of hardly evaporable impurity / A.N. Ishmatov, B.I. Vorozhtsov // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2010. – Vol. 37, № 1. – P. 13-15.

2. Ворожцов Б.И. Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция / Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов, И.Р. Ахмадеев, Г. В. Сакович // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 6. – С. 1084-1104.

Vorozhtsov B.I. Explosion generation of microatomized liquid-drop aerosols and their evolution / B.I. Vorozhtsov, O.B. Kudryashova, A.N. Ishmatov, I.R. Akhmadeev, G.V. Sakovich // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010. – V. 83, № 6. – P. 1149-1169.

3. Ишматов А.Н. Развитие дисперсности в облаке жидкокапельного аэрозоля, полученного взрывным способом // Ползуновский вестник. – Барнаул. – 2010.– № 3. – С. 175-180.

4. Кудряшова О.Б. Ударно-волновая генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей / О.Б. Кудряшова, Б.И. Ворожцов, Е.В. Муравлев, А.Н. Ишматов, А.А. Павленко // Ползуновский вестник. – Барнаул. – 2010. – №4. – С. 95-101.

5. Ишматов А.Н. Генезис высокодисперсного аэрозоля: влияние слабоиспаряемой примеси на дисперсные характеристики / А.Н. Ишматов [и др.] // Динамика сплошной среды. – 2010. – Вып. 126. – С. 73-76.

6. Ишматов А.Н. Программное обеспечение анализа дисперсности и формы частиц при микроскопическом исследовании. // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Бийск. – 2009. – Т.1. – С. 147-149.

7. Ишматов А.Н. Жидкокапельный аэрозоль, полученный с использованием ВЭМ, в условиях повышенной влажности / А.Н. Ишматов [и др.] // Перспективы создания и применения высокоэнергетических материалов: доклады III научно-технической конференции молодых ученых. – Бийск. – 2010. – С. 83-90.

8. Ishmatov A.N. Features of HEMs Application for Generation of Ultradispersed Liquid-Drop Aerosols / A.N. Ishmatov, B.I. Vorozhtsov // High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application: Abstracts of V International Workshop HEMs-2010. – Biysk. – 2010. – P. 164-166.

9. Ишматов А.Н. Применение метода малоуглового рассеяния для исследования высококонцентрированных жидкокапельных аэрозолей / А.Н. Ишматов [и др.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск. – 2010. – С. 136-140.

10. Ишматов А.Н. Эволюция дисперсности в факеле распыла взрывного распылителя / А.Н. Ишматов, Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, С.С. Титов // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск. – 2010. – С. 29.

11. Ишматов А.Н. Влияние поверхностно-активных веществ на взрывное образование жидкокапельного аэрозоля / А.Н. Ишматов, Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, И.В. Казанцев, Н.В. Коровина // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск. – 2010. – С. 29-30.

12. Ишматов А.Н. Методика экспериментального исследования образования жидкокапельного аэрозоля взрывным способом / А.Н. Ишматов, Б.И. Ворожцов, И.Р. Ахмадеев, Е.В. Муравлев // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск. – 2010. – С. 82.

13. Павленко А.А. Оптическая диагностика потоков субмикронного аэрозоля / А.А. Павленко, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск. – 2010. – С. 89.

Цитируемая литература

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

2. Стебновский С.В. Импульсное диспергирование как предельный режим разрушения жидкого объема / С.В. Стебновский // Физика горения и взрыва. – 2008.– Т. 44, №2 – С. 117-128.

3. Ворожцов Б.И. Моделирование процесса диспергирования жидкости взрывным газогенератором / Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, В.А. Архипов // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – № 8/2. – С. 107-114.

4. 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.

5. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Жуков А.С. Тепломассоперенос при получении оксидов металлов плазмохимическим методом // XXIX Сибирский теплофизический семинар: Материалы Всероссийской конференции. – Новосибирск. – 2010 г. – С. 1-12.

Тираж 100 экз.
Подписано в печать 08.08.2011 г. Печать – ризография. Заказ № 2011-101
Отпечатано в типографии ФГУП «ФНПЦ «Алтай»
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1