# РАЗВИТИЕ ДИСПЕРСИЙ В ОБЛАКЕ ЖИДКОКАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

А.Н. Ишматов

В статье представлены результаты экспериментального исследования развития дисперсий в облаке жидкокапельного аэрозоля, полученного распылителем взрывного типа в условиях различного влагосодержания. Показано существенное влияние испарения на развитие облака аэрозоля.

Ключевые слова: жидкокапельный аэрозоль, ультрадисперсный аэрозоль, взрывное распыление жидкостей, испарение капель, изменение дисперсности аэрозоля, динамика развития аэрозоля, спектр массового распределения

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует ряд задач по высокоэффективному и мгновенному получению концентрированных облаков высокодисперсного аэрозоля, в частности, для целей дезактивации, дезинфекции, пожаротушения и дымоподавления, мгновенного создания барьеров на пути распространения облаков вредных газов.

В работах [1,2] была показана целесообразность использования импульсного метода для получения аэрозолей высокой дисперсности и концентрации в короткий промежуток времени. Устройства импульсного высокодисперсного распыления жидкостей характеризуются малым временем (порядка 1-2 с) образования облака ультрадисперсного аэрозоля. Использование высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в качестве энергоносителя в распылителях данного типа позволяют получать достаточное количество энергии за короткий промежуток времени, при этом ВЭМ занимают небольшой объем, что дает возможность автономного конструкторского исполнения распылителей. Преимущества использования ВЭМ существенны для применения в системах создания дезинфекционных, дезактивационных и огнегасящих аэрозолей, хотя имеются и недостатки, связанные со спецификой работы с ВЭМ: важными становятся вопросы безопасности.

Как известно, высокодисперсные жидкокапельные аэрозоли неустойчивы (изменяется агрегатное состояние вещества, увеличивается или уменьшается дисперсность) вследствие испарения и коагуляции [3,4], и для практических задач актуальными являются вопросы дальнейшего развития аэрозоля, полученного взрывным способом в различных окружающих условиях.

# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания аэрозолей использовалось модельное устройство в виде гидродинамической трубки с зарядом ВЭМ, описанное в работе [1], время полного распыления жидкости составляет порядка 2 мс [1,2], схема распылителя приведена на рисунке 1.



#### Рисунок 1. Схема распылителя

Для исследования развития аэрозоля использовалась аэрозольная камера объемом 1 м<sup>3</sup>. Поскольку планировалось создавать условия по относительной влажности до 100 %, что допускает возможность конденсации влаги на измерительном приборе, контроль влагосодержания в камере осуществлялся микропроцессорным датчиком относительной влажности и температуры ДВТ-02. Диапазоны: по температуре 0...50 °C, по влажности 0...100 % без конденсации влаги. Погрешность по температуре ±1,0 °C, по влажности ±3,0 %. Датчик ДВТ-02м имеет дополнительную защиту чувствительного элемента и допускает кратковременную конденсацию влаги.

Создание требуемого влагосодержания в камере осуществлялось путем холодного испарения воды с поддона, так как известно о длительном (до нескольких часов) существовании капель микронных размеров в условиях, близких к точке росы [5,6]. Повышение влажности горячим паром может привести к конденсационному образованию микронных капель [3], а использование распространенных ультразвуковых увлажнителей воздуха изначально приводит к образованию мелких капель и при измерении дисперсных характеристик исследуемого аэрозоля приходилось бы учитывать погрешности, связанные с наличием капель, полученных при увлажнении.

Измерение дисперсности и концентрации частиц аэрозоля осуществлялось с использованием модифицированного метода малоуглового рассеяния лазерного излучения [1,7]. С помощью данного метода можно проводить бесконтактные измерения частиц размерами от 1 до 2000 мкм в объеме и на срезе факела распыла с частотой 20 кГц.

Определение дисперсных характеристик осуществлялось также на оптическом анализаторе частиц Pip9.0, позволяющем измерять частицы от 0,5 мкм до 3000 мкм [8] по методике микроскопического исследования дисперсности кристаллов [4,9] при распылении модельного раствора поваренной соли с последующим испарением и восстановлением начальных дисперсных характеристик жидкокапельного аэрозоля.

При проведении опытов распыление велось в камере с различной относительной влажностью. При распылении использовалась дистиллированная вода, для стабилизации в воду добавляли глицерин (массовое содержание 20 %), объем распыляемой жидкости 1 г.

#### ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ЖИДКОКАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ

Результаты проведенных опытов показали, что при взрывном распылении образуется высокодисперсный аэрозоль с размерами капель менее 20 мкм, что также подтверждено в работах [1,2,4]. Главным фактором, влияющим на развития жидкокапельных аэрозолей данной дисперсности, является испарение капель [3,10,11,12]. В условиях отсутствия посторонних примесей капли получаемого аэрозоля испаряются в соответствии с диффузионной теорией Максвелла, позволяющей описать скорость испарения капель размерами от 1 до 100 мкм [10]:

$$I = \frac{4\pi r DM}{\rho_{la} RT} (P_s - P_{\infty})'$$

где *r* – радиус капли;

*D* – коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе;

(1)

М-молярная масса испаряемой жидкости;

 $P_s$ ,  $P_{\infty}$  – давление паров жидкости над каплей и в пространстве;

 $\rho_{lg}$  – плотность жидкости;

*R* – универсальная газовая постоянная;

*T* – температура жидкости, <sup>о</sup>К.

Поскольку в работе используется раствор глицерина и поваренной соли, то кинетика испарения такого раствора будет отличаться от кинетики испарения чистой воды [4,10]. Давление паров над поверхностью растворов, в случае различия давления паров компонент, составляющих раствор, будет претерпевать изменение в течение процесса испарения, так как компонента с большим давлением насыщенных паров будет испаряться быстрее, т.е. в капле концентрация компоненты с меньшим давлением с течением времени будет расти, соответственно возрастает ее мольная доля в растворе. При испарении капель непрерывно меняется радиус и концентрация растворенного вещества в капле, следовательно, меняется и скорость испарения. Оценка влияния содержания примеси на конечный размер капель аэрозоля осуществлялась в работе [4] по уравнению скорости испарения капель аэрозоля с учетом изменения концентрации глицерина или соли в испаряемых каплях:

$$I = \frac{4\pi r DM}{\rho_{La} \cdot R \cdot T} \left( V_a(t) \cdot P_s - P_{\infty} \right), \qquad (2)$$

где *N<sub>a</sub>(t)* – мольная доля воды в капле.

Время прекращения испарения и конечный размер капель рассчитывается из условия: *I* → 0. Оценка степени уменьшения аэрозольных частиц вследствие испарения осуществляется из условия равенства массового содержания неиспаряемой примеси в капле первоначального раствора и в капле после полного испарения растворителя [4].

$$m_{npumecu} = n \cdot \rho_{p-pa} \cdot V_1 = \rho_{p.6} \cdot V_2$$

где *n* – концентрация растворенного вещества в растворе;

 $\rho_{p-pa}$ ,  $\rho_{p.g.}$  – плотность раствора и растворенного вещества;

 $V_1$ ,  $V_2$  – объем сферической частицы диаметром  $d_1$  и  $d_2$ , соответственно, до и после испарения растворителя.

Тогда диметр конечной капли d<sub>2</sub> после испарения растворителя начальной капли d<sub>1</sub> составит:

$$d_2 = d_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{n \cdot \rho_{p-pa}}{\rho_{nnumeru}}} .$$
(3)

Данные расчетов времени испарения и степени уменьшения размеров капель при испарении воды из используемого раствора глицерина приведены в таблице 1.

# ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2010

# РАЗВИТИЕ ДИСПЕРСИЙ В ОБЛАКЕ ЖИДКОКАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

#### Таблица 1

Данные расчетов времени испарения воды из капель 20 %-го раствора глицерина

d <sub>1</sub> , мкм	30	20	15	10	5
d <sub>2</sub> , мкм	13	9	7	4	2
Время полного испарения, с	1,32	0,68	0,42	0,20	0,04

Из расчетов следует, что в ожидаемом жидкокапельном аэрозоле за время порядка одной секунды, в результате полного испарения воды из капель произойдет уменьшение размеров частиц и соответственно общей массовой концентрации. Результаты прове-



Рисунок 2. Спектр массового распределения через 2 с: а) относительная влажность 100%, концентрация частиц 0,177 г/м<sup>3</sup>; б) относительная влажность 60%, концентрация частиц 0,155 г/м<sup>3</sup>

При распылении в атмосферу с меньшим влагосодержанием измеренная через 2 с после образования аэрозоля массовая концентрация оказалась меньше. Объясняется данное расхождение кинетикой развития факела распыла: за 2 с облако аэрозоля успевает занять небольшое пространство; условия испарения, соответствующие испарению при нормальной влажности, соблюдаются только на границе аэрозольного облака с атмосферой, в объеме же самого облака в результате частичного испарения капель повышается влажность, что препятствует дальнейшему испарению капель [13], этим объясняется незначительное уменьшение массовой концентрации во втором случае, т.к. часть воды из капель испаряется. Результаты расчетов влияния влажности на время полного испарения воды из 20 мкм капли раствора глицерина приведены в таблице 2.

Таким образом, влияние влагосодержания в воздухе, окружающем каплю, на испарение существенно. Последующее развитие факела распыла ведет к увеличению занимаемого объема и понижению массовой концентрации вследствие испарения, так как расширение облака приведет к понижению влажности. Измерения дальнейшего развития дисперсий в облаке «взрывного» аэрозоля, представленные на рисунках 3 и 4, подтверждают вышеприведенные доводы.

Таблица 2

Влияние относительной влажности на время испарения 20 мкм капли р-ра глицерина (20 %)

Относительная влажность, %	50	60	70	79	80
Время испарения. с	0.32	0.68	1.21	11.01	-

Относительный рост содержания «средних» (5..10 мкм) и «крупных» (более 10 мкм) частиц с течением времени в первом ряде опытов (при 100% влажности) объясняется седиментацией «крупных» капель [3] из верхней части аэрозольной камеры в измерительную область (высота над полом камеры 40 см), что подтверждается ростом массовой концентрации частиц. Данные по скорости осаждения частиц представлены в таблице 3.

Относительный рост содержания «мелких» (менее 5 мкм) частиц во втором ряде

денных опытов не подтверждают данные расчетов. Результаты измерения дисперсности частиц в облаке аэрозоля при прошествии 2 с после распыления раствора глицерина при относительной влажности 60 %, представленные на рисунке 2а, показали результаты практически идентичные с результатами измерения дисперсности при 100 % влажности (рисунок 2б), т.е. от влагосодержания атмосферы практически не зависят, наблюдается небольшое различие в измеренной концентрации.

#### ИШМАТОВ А.Н.

опытов (при 60 % влажности) объясняется испарением как «крупных», так и «мелких» капель и, соответственно, уменьшением их размеров и массы до определенного преде-



ла, обусловленного содержанием примеси, поскольку использование глицерина замедляет и стабилизирует испарение капель.







Рисунок 4 – Спектр массового распределения через 15 с: а) относительная влажность 100 %, концентрация частиц 0,221 г/м<sup>3</sup>; б) относительная влажность 60 %, концентрация частиц 0,131 г/м<sup>3</sup>

Таблица 3

Скорость седиментации сферических частиц в нормальных условиях [3]

Размер, мкм	1	4	10	20	40
Скорость, см/с	3,5 <sup>.</sup> 10 <sup>-3</sup>	5,0 <sup>.</sup> 10 <sup>-2</sup>	0,3	2,2	4,7
CROPOCIE, CIVIC	0,0 10	0,010	0,0	2,2	-т,

В условиях 100 %-ной влажности, в виду равенства давлений паров над каплей и в объеме камеры, испарение прекращается, причем это равенство может наступить и при меньшем влагосодержании в камере, как было показано выше в таблице 2, поскольку давление паров над растворами меньше, чем над чистыми жидкостями. С другой стороны, известно, что чем меньше размер капли, тем больше давление насыщенных паров над ней. Влияние кривизны поверхности на давление насыщенных паров над каплями описывается уравнением капиллярной конденсации Томсона-Кельвина [10,12]:

$$Ln\left(\frac{P_s}{P_{\infty}}\right) = \pm \frac{2\sigma \cdot M}{\rho_{Lq} \cdot R \cdot T \cdot r} \,. \tag{4}$$

Расчеты изменения давления над искривленной поверхностью приведены в таблице 4.

# ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2010

# РАЗВИТИЕ ДИСПЕРСИЙ В ОБЛАКЕ ЖИДКОКАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Таблица 4

<i>г</i> , нм	1	3	5	10	100	1000	2000	5000
Р <sub>кап</sub> /Р <sub>п</sub> ,	2,9153	1,4285	1,2386	1,1129	1,0107	1,0010	1,0005	1,0002

Давление насыщенных паров над каплями различных размеров

Из расчетов видно, что давление насышенных паров над каплями размерами свыше 1 мкм отличается менее, чем на 0,1 % от давления паров над плоской поверхностью, т.е. влияние кривизны существенно только на капли размерами менее одного микрона, но даже небольшого отличия давления над мелкими каплями достаточно для испарения в условиях 100 %-ной влажности [10].Таким образом, распределение капель по размерам в полидисперсном аэрозоле, состоящем из очень мелких капель, должно меняться со временем вследствие «изотермической перегонки» [3] - испарения более мелких капель в насыщенном паром воздухе и конденсации образующегося пара на более крупных капельках и на стенках камеры. С другой стороны, небольшое содержание примеси приводит к понижению давления насыщенных паров над каплями [3,10], именно этим объясняют аномально долгое время существования (до нескольких часов) микронных капель в условиях 100 %-ной влажности, на поверхности которых происходит адсорбция находящегося в воздухе углекислого газа [6].

Из вышесказанного следует, что в условиях 100 %-ной влажности, при распылении раствора, давление насыщенных паров воды над «мелкими» каплями вследствие наличия примеси глицерина будет меньше давления насышенных паров воды в аэрозольной камере и, соответственно, сохраняется аэрозоль с первоначальными дисперсными характеристиками. Данный вывод подтверждается при восстановлении размеров первоначальных частиц при распылении водного раствора поваренной соли [4], результаты расчетов восстановления представлены на рисунке 5. Использование раствора поваренной соли позволяет параллельно с установкой ЛИД-2М проводить микроскопическое исследование кристаллов соли с последующим восстановлением размеров первоначальных капель раствора, что повышает достоверность полученных результатов.

Стоит отметить, что ни в одном опыте не была зафиксирована вся исходная масса распыленной жидкости в аэрозольной камере при измерении концентрации на установке ЛИД-2М. Исследование частиц на электронном микроскопе, проведенное в работе [14], показало наличие частиц менее 1 мкм, также встречаются и достаточно крупные частицы (более 40 мкм). Таким образом, можно сделать вывод, что часть массы распыленной жидкости находится за пределами возможностей измерения установкой ЛИД-2М и требует дополнительного более глубокого исследования.



Рисунок 5. Спектр массового распределе
ния частиц аэрозоля

Спектр распределения кристаллов NaCl
Восставленный спектр распределения

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанных экспериментальных методик проведено исследование параметров жидкокапельных облаков аэрозоля, образуемых в результате взрывного диспергирования жидкостей. Установлено влияние относительной влажности атмосферы на формирование облака аэрозоля. Исследованы дисперсные характеристики аэрозоля, полученного методом взрывного диспергирования. Установлено наличие частиц, выходящих за пределы возможностей измерения.

Автор выражает благодарность с.н.с. ИПХЭТ СО РАН, к.т.н. Е.В. Муравлеву за помощь в проведении экспериментов, с.н.с. ИПХЭТ СО РАН, к.ф.-м.н., доценту О.Б. Кудряшовой и г.н.с. ИПХЭТ СО РАН, д.т.н., профессору Б.И. Ворожцову за ценные практические советы и замечания при написании статьи.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Муравлев Е.В., Ахмадеев И.Р., Павленко А.А., Титов С.С. // Известия ВУЗов. Физика, – № 8/2, 2008. – С. 115-121.

2. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Архипов В.А. // Известия ВУЗов. Физика, – № 8/2, 2008. – С. 107-114.

3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы, туманы. М.: Химия, 1972. – 428 с.

4. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И. // Краткие сообщения по физике. ФИАН – Москва. – № 1 – 2010. – С. 22-27.

5. Козырев А.В., Ситников А.Г. // Успехи физических наук, – Т. 171. – № 7. – 2001. – С. 765-774.

6. Gudris N., Kulikowa L., // Zeitschrift fur Physiks. – V. 25. – № 2. – 1924. – P. 121-132.

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

 Ишматов А.Н. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции 16-17 апреля 2009 года. АлтГТУ, БТИ. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2009: в 2-х т. – Т.1. – С. 147-149.

9. Сысолятин С.В., Сурмачёв В.Н., Дубков А.С., Бояринова Н.В., Ишматов А.Н. // Ползуновский вестник. АлтГТУ – Барнаул. – №3 – 2008. – С. 131-133.

Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде. – М.: Мир, 1986. – 314 с.

10. Спурный К., Нех Ч., Седлачек Б. и др. Аэрозоли. – М.: Атом-издат, 1964. – 360 с.

11. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: учебник-монография. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.: ил.

12. P. Brain, D.R. Butler // Plant, Cell and Environment. – № 8. – 1985. – P. 247-252.

13. Ворожцов Б.И, Кудряшова О.Б., Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Сакович Г.В. // Инженернофизический журнал, – Т. 83. – № 6. – 2010. – С. 1-20.

# РАСЧЕТ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ИХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

# А.А. Кухленко, М.С. Василишин, С.Е. Орлов, Д.Б. Иванова

Изложена математическая модель разрушения твердых частиц в роторнопульсационном аппарате. Получены зависимости для расчета дисперсного состава и площади их поверхности в процессе обработки. Проведено сравнение теоретических зависимостей с экспериментальными данными по измельчению различных модельных систем в аппаратах роторно-пульсационного типа.

Ключевые слова: роторно-пульсационный аппарат, измельчение, дисперсный состав, площадь поверхности частиц

Дисперсный состав и площадь поверхности частиц во многом определяют эффективность протекания гидродинамических и массообменных процессов в различных отраслях современной промышленности. Так при мокром измельчении твердых частиц от их размера существенно зависит устойчивость получаемых суспензий. В массообменных процессах (растворение, экстрагирование) и в химических реакциях размер и площадь поверхности частиц определяют время их проведения. Кроме того, в современной химической технологии все большее применение находят аппараты, в которых интенсификация процесса осуществляется с помощью комбинированного воздействия на обрабатываемую среду: активного физического

воздействия при одновременном измельчении сырья. К числу таких аппаратов в полной мере можно отнести аппараты роторнопульсационного типа (РПА). К сожалению, в настоящее время процесс измельчения твердых частиц в РПА недостаточно полно изучен, что в свою очередь, затрудняет проводить прогнозирование кинетики протекания процессов.

Исходя из этого, представляется актуальным разработать математическое описание процесса мокрого диспергирования твердых частиц различной природы в РПА.

Для разработки такого описания предположим, что частицы исходного сырья однородны и не представляют собой каких-либо агломератов. Кроме того, предположим, что