

УДК 544.77.051.15; 544.772.3

*А.Н. ИШМАТОВ\*, Б.И. ВОРОЖЦОВ\*, В.А. АРХИПОВ\*\****ЭВОЛЮЦИЯ КАПЕЛЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ФОРМИРОВАНИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД<sup>1</sup>**

Предлагается схема эксперимента, приводится описание экспериментального стенда и методики исследования параметров дисперсности частиц и их эволюции при импульсном распылении. Приводятся результаты экспериментов, в которых процесс импульсного формирования аэрозоля моделировался в лабораторных условиях путем применения устройства в виде модифицированной гидродинамической трубки.

**Ключевые слова:** импульсное распыление, аэрозольный барьер, гидродинамическая ударная трубка, эволюция капель, дисперсный поток, экспериментальное исследование.

**Введение**

Вопросы исследования процессов эволюции капель в дисперсном потоке при импульсном распылении жидкостей имеют особую важность в задачах оперативного создания и прогнозирования дальнейшего развития аэрозольных барьеров, служащих для ликвидации, дезактивации вредных аэрозольных и газовых выбросов, а также подавления возгораний и взрывных волн в шахтах. Требования, предъявляемые к устройствам создания подобных защитных аэрозольных барьеров, с каждым годом становятся все более жесткими. Соответственно возрастает роль теоретических и экспериментальных исследований принципов импульсного распыления. Все более важным и практически необходимым становится знание динамики процессов, которые происходят вследствие комплекса воздействующих факторов, таких, как сильная турбулентность потока, кавитирование жидкости, аэродинамическое сопротивление, соответствующих наименее изученному режиму распыления, классифицированному в работе [1]. Некоторые аспекты получения математических моделей, вывода аналитических зависимостей для описания процессов импульсного диспергирования жидких сред с учетом кавитационных явлений, свойств распыливаемого вещества и внешней среды были рассмотрены в работах [2–4]. Актуальным остается вопрос исследования формирования аэрозольных сред с учетом эволюционирующих капель в дисперсном потоке. Очевидно, что дальнейшее развитие основ импульсного распыления невозможно без адекватных экспериментальных данных, получение которых связано со значительными трудностями ввиду сложности и многогранности процессов диспергирования и формирования жидкокапельных сред.

Цель работы – изучение эволюции капель в дисперсном потоке при импульсном формировании аэрозольных сред.

**1. Эксперимент**

При проведении натуральных экспериментов процесс импульсного формирования аэрозоля моделировался в лабораторных условиях путем применения устройства в виде модифицированной гидродинамической трубки (рис. 1) для распыления малых объемов, также применявшегося в работах [3–6] по импульсному распылению жидкостей.

В распылителе, представляющем собой гидродинамическую трубку, пиротехнический заряд отделен от жидкости непроницаемой мембраной. За счет резкого скачка давления при сгорании заряда происходит кавитирование жидкости, а образующийся газ под давлением поступает в жидкость, в результате формируется вспененная структура, которая с высокой скоростью истекает через выходное отверстие. Ог-

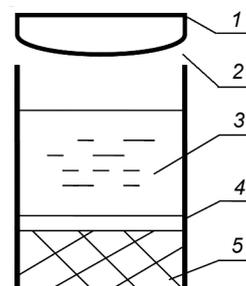


Рис. 1. Схема распылителя [5]: 1 – ограничитель; 2 – выходное отверстие; 3 – жидкость; 4 – корпус; 5 – пиротехнический заряд

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», соглашение № 8883) и гранту РФФИ (проект № 12-08-90804 мол\_рф\_нр).

раничитель служит для возможности регулирования формы факела распыла и площади выходного сечения [3, 5, 6]. Формирование облака жидкокапельного аэрозоля происходит однократно, за время порядка нескольких миллисекунд, в нестационарных условиях при высоких скоростях выброса жидкости.

С учетом особенностей импульсного распыления жидкостей, которые накладывают существенные ограничения на проведение измерений, использовался экспериментальный исследовательский комплекс, схема и внешний вид которого приведены на рис. 2.

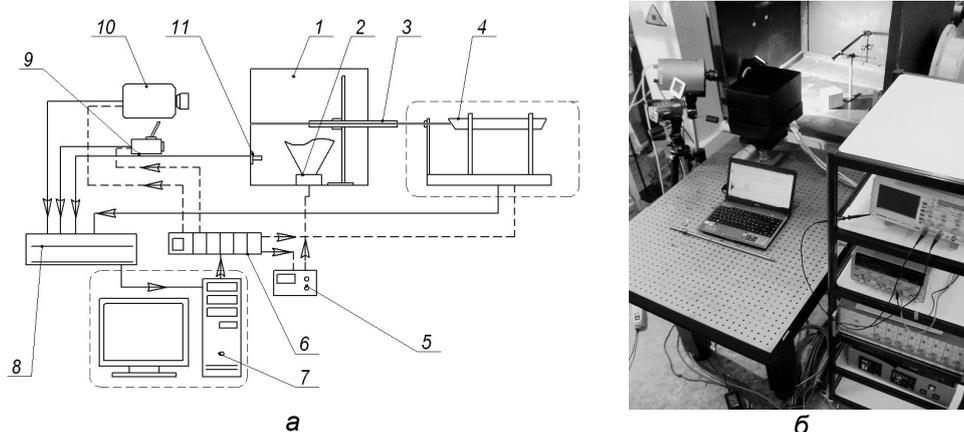


Рис. 2. Структурная схема (а) и общий вид (б) экспериментального комплекса: 1 – измерительный бокс; 2 – распылитель; 3 – защитная трубка; 4 – «ЛИД-2М»; 5 – устройство инициирования; 6 – устройство синхронизации; 7 – ЭВМ; 8 – система сбора информации; 9 – тепловизор; 10 – скоростная видеокамера; 11 –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

Для исследования использовались как известные методы, так и специально разработанные [7, 8] с учетом специфики проводимых работ.

### 1.1. Лазерная измерительная установка

Для исследования параметров дисперсности частиц в облаке и их эволюции использовался метод малоуглового рассеяния лазерного излучения (LALLS) с помощью измерительной установки [9]. Установка позволяет вести непрерывные дистанционные бесконтактные измерения дисперсности и концентрации частиц непосредственно в аэрозоле. Длина волны излучения лазера составляла 631 нм, толщина лазерного луча  $\sim 1,5$  мм, мощность лазера  $\sim 5$  мВт. Регистрация интенсивности рассеянного на аэрозольных частицах излучения (индикатрисы рассеяния) проводилась под углами от  $0,3$  до  $20^\circ$  в плоскости, перпендикулярной лучу лазера, фотодиодной линейкой из 8 элементов, чувствительная площадка каждого из которых составляет  $50 \text{ мм}^2$ . Частота записи измеренных данных 100 кГц. Ошибка измерения индикатрисы рассеяния не превышала  $\pm 5\%$  от истинного значения. Длина оптического пути – 1 м. Зарегистрированный фотодиодами сигнал рассеянного излучения обрабатывался с помощью карты АЦП, установленной в ЭВМ. Далее, путем численного решения серии прямых задач оптики аэрозоля и сравнения экспериментальной индикатрисы рассеяния с расчетными восстанавливалась функция распределения частиц по размерам [9]. В качестве базисной функции выбиралось гамма-распределение [9]:

$$f(D) = aD^\alpha \exp(-bD),$$

где  $a$  – нормирующий множитель;  $\alpha$ ,  $b$  – параметры распределения;  $D$  – диаметр частиц.

Применение гамма-распределения для описания дисперсности частиц в потоке вполне оправдано, поскольку экспериментально показано [10], что данное распределение соответствует аэрозольям, получаемым при распылении жидкостей под высоким давлением.

### 1.2. Оптимизация метода для исследования импульсных потоков

При прохождении зондирующего лазерного излучения в исследуемом объеме из-за высокой концентрации частиц на начальных этапах импульсного формирования аэрозолей может возни-

как эффект многократного рассеяния света частицами [11, 12], что приводит к невозможности получения точных данных из измерений. Эффект многократного рассеяния света на частицах при восстановлении функции распределения можно не учитывать в случае выполнения условия для оптической плотности дисперсной среды  $\tau < 1,5$  [12]:

$$\tau = \ln(I_0 / I) = k l_s,$$

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

Для уменьшения влияния многократного рассеяния предложено использовать устройство в виде защитной трубки, уменьшающей длину оптического пути вдвое, как показано на рис. 3, а. Защитная трубка располагается так, чтобы изолировать зондирующий луч лазера на половине дисперсного потока. Проведение измерений без потери информации о потоке в этом случае возможно при его симметричности. Из рис. 3, б видно, что исходящий поток представляет собой пустотелый, относительно симметричный конус.

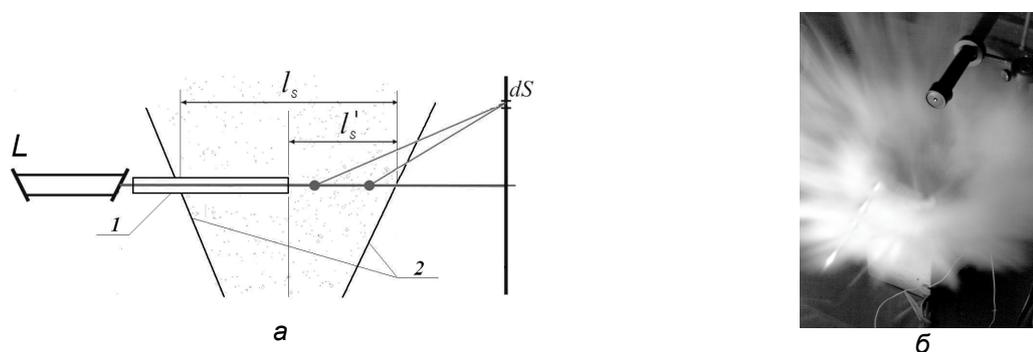


Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки:  $L$  – лазер;  $1$  – защитная трубка;  $2$  – границы аэрозольного облака;  $dS$  – площадка, на которую приходит рассеянное под различными углами излучение;  $l_s$  – длина оптического пути без использования защитной трубки;  $l'_s$  – длина оптического пути с использованием защитной трубки

При длине оптического пути  $l'_s = l_s / 2$  оптическая плотность  $\tau'$  для той же дисперсной среды также уменьшается в 2 раза:

$$\tau' = \ln(I_0 / I') = k l'_s = \tau / 2,$$

где  $I'$  – интенсивность излучения после прохождения рассеивающего объема на длине оптического пути  $l'_s$ .

Таким образом, использование защитной трубки (сокращения оптического пути вдвое  $l'_s = l_s / 2$ ) позволяет повысить порог для проведения измерений в облаке капель с  $\tau < 1,5$  до  $\tau < 3$  ( $\tau' < 1,5$ ). Влияние уменьшения оптического пути на результаты измерения учитывается численными методами при обработке измерительных данных [9].

## 2. Анализ результатов

В измерительном боксе исследовалось распыление выбранных для работы веществ. При необходимости в боксе создавались требуемая температура и влажность. Условия проведения экспериментального исследования:

- |                                     |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| - распыливаемая жидкость –          | дистиллированная вода $\sim 10$ г; |
| - температура окружающего воздуха – | 293 К;                             |
| - влажность –                       | 50 %;                              |
| - частота кадров видеосъемки –      | 3000 Гц;                           |
| - время экспозиции кадров –         | 326 мкс.                           |

В соответствии с оптимальными условиями [5, 6] распыление проводилось при рабочих давлениях  $\sim 12$  МПа и угле раскрытия факела равном  $90^\circ$ . Скоростная видеосъемка импульсного рас-

пыления показала (рис. 4), что факел распыла имеет конусообразную симметричную форму, выброс жидкости из распылителя заканчивается через 3 мс, скорость выброса соответствует  $\sim 200$  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 по методу LALLS.

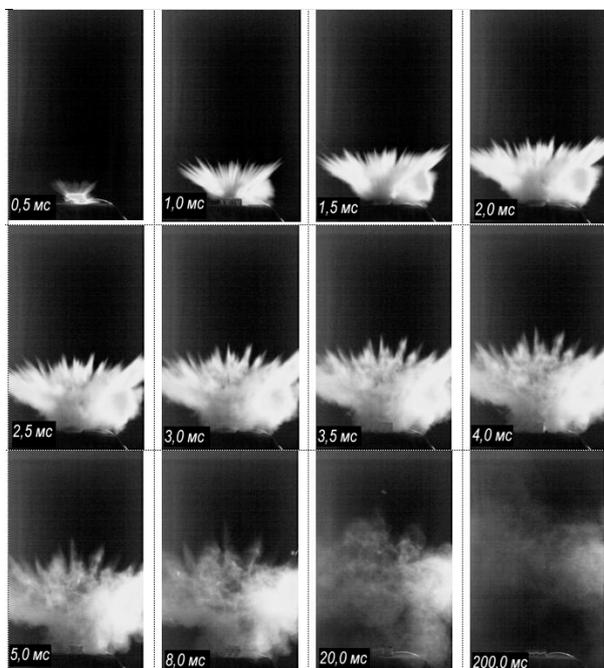


Рис. 4. Визуализация распыления

соответственно вероятность вторичного диспергирования капли в таком потоке минимальна. И с точки зрения конечного результата процесс формирования каплей вследствие первичного и вторичного распыления логично рассматривать в одной зоне («дробление»), так как первичное распыление происходит практически у самого сопла распылителя, а вторичное – ограничено небольшими расстояниями от сопла (порядка 0,1 м). Зона «формирование» характеризуется высокими скоростями дисперсного потока. Длина варьируется от 0,15 м в зависимости от объема диспергируемой жидкости и формы факела. Конечный участок соответствует зоне развития облака («эволюция»), в которой частицы находятся в уравновешенном состоянии, и эволюция облака происходит за счет испарения, конденсации, коагуляции и гравитационного осаждения частиц.

Для исследования измерительной установкой по методу LALLS выбирались область «формирование» (расстояние от сопла 0,15 м) и область «эволюция» (расстояние от сопла 0,3 м). Экспериментальное исследование показало, что для приведенных условий проводить измерения по разработанной методике с применением защитной трубки без учета влияния многократного рассеяния света на частицах аэрозоля можно начиная с 8 мс, тогда как без использования защитной трубки – с 50 мс (рис. 6). Измерение дисперсных характеристик в течение промежутка времени до 8 мс не представляется возможным из-за высокой оптической плотности облака. Таким образом, в соответствии с данными, полученными из кинограммы процесса распыления (рис. 4), метод LALLS для исследования процессов на стадии «дробление» не подходит. Но предложенная модификация (использование защитной трубки) позволяет вести исследования развития облака практически с момента его образования. Уменьшение оптической плотности в эксперименте с течением времени указывает на уменьшение концентрации аэрозоля. Исследование разви-

В соответствии с полученными экспериментальными данными и теоретическими аспектами распыления жидкостей [13] конкретизированы стадии образования и эволюции облака мелкодисперсных капель при импульсном распылении:

- диспергирование кавитированной жидкости ( $\sim 3$  мс);
- формирование жидкокапельного потока в условиях высокоскоростного истечения ( $\sim 8$  мс);
- эволюция аэрозольного облака (более 8 мс).

Импульсный дисперсный поток можно рассматривать как конусообразное тело вращения, условно разделенное на зоны, как показано на рис. 5. В сильно турбулизованных потоках на расстояниях, превышающих 0,1 м, возникает кризис сопротивления движению частиц дисперсной фазы (сопротивление движению капель в потоке оказывается меньше в 4–7 раз, чем для отдельной капли) [14, 15],

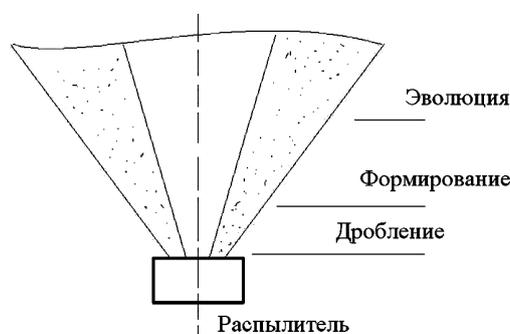


Рис. 5. Схема потока

тия дисперсности в центре облака (расстояние от сопла 0,3 м) показало, что жидкокапельный аэрозоль имеет практически постоянные характеристики с 8 мс вплоть до 1 с развития. На границе облака (расстояние от сопла 0,15 м – нижняя граница) выявлено существенное изменение дисперсности капель (для оценки дисперсности использовался среднемассовый диаметр частиц  $D_{43}$ ) уже к 0,2 с (таблица). Это связано, в первую очередь, с нестационарной структурой облака, обусловленной циркуляцией и испарением. Капли, находящиеся ближе к границе, более подвержены испарению, чем капли, находящиеся в центре.

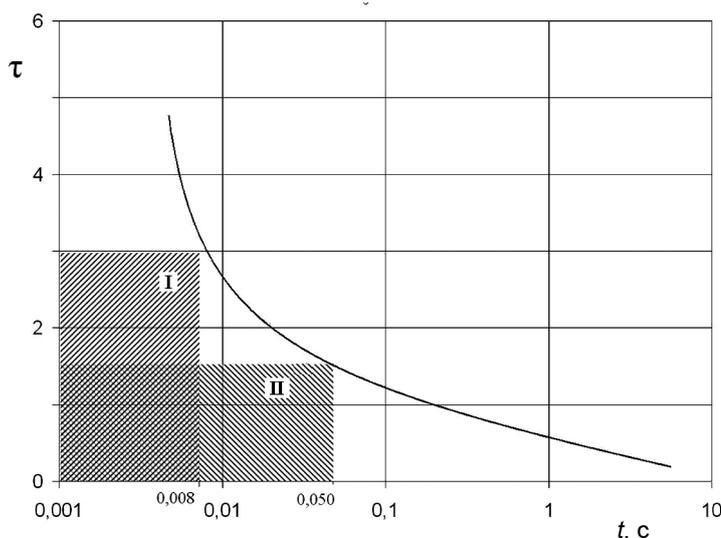


Рис. 6. Изменение оптической плотности в эксперименте: I – область ограничения измерения с применением защитной трубки; II – область ограничения измерения без применения трубки

**Изменение  $D_{43}$  при распылении дистиллированной воды**

Параметр	Значение параметра								
	0,008	0,02	0,03	0,040	0,1	0,2	1,0	2,0	6,0
$t$ , с									
$D_{43}$ , мкм, 15 см от сопла	15,9	16,6	16,5	17,5	17,2	16,9	10,8	8,8	8,5
$D_{43}$ , мкм, 30 см от сопла	16,8	16,1	16,5	16,7	16,5	17,0	17,3	14,5	13,8

Таким образом, было показано, что облако жидкокапельного аэрозоля, полученного при импульсном распылении, достаточно устойчиво и стационарно на стадии «эволюции». Очевидно, что время жизни облака капель зависит от занимаемого объема, массы распыленной жидкости, влажности воздуха, теплообмена и конвекционных потоков, которые могут иметь место в реальных условиях. В нашем случае исследование методом LALLS проводилось в закрытой камере без использования осветительного оборудования, которое привносит дополнительный тепловой поток, способствующий быстрому разрушению облака за счет испарения капель.

**Заключение**

В соответствии с полученными экспериментальными данными и теоретическими аспектами распыления жидкостей конкретизированы стадии образования и эволюции облака мелкодисперсных капель при импульсном распылении. Выявлено ограничение на проведение измерений методом светорассеяния под малыми углами, вызванное многократным рассеянием света в дисперсном потоке на начальном этапе его формирования. Предложенная модификация (использование защитной трубки) позволяет вести исследования развития облака с момента после его образования.

Исследование развития дисперсности в центре облака показало, что жидкокапельный аэрозоль имеет практически постоянные характеристики с 8 мс вплоть до 1 с развития. На границе облака выявлено существенное изменение дисперсности капель уже к 0,2 с. Это связано, в первую очередь, с нестационарной структурой облака, обусловленной циркуляцией и испарением. Капли, находящиеся ближе к границе, более подвержены испарению, чем капли, находящиеся в центре.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Ohnesorge W. V. // Math. Mech. – 1936. – V. 16. – P. 355–358.
- Кедринский В. К. Газодинамика взрыва: эксперимент и модели. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
- Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Ишматов А.Н. и др. // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – № 6. – С. 1084–1104.

4. Kudryashova O.B., Vorozhtsov V.I., Muravlev E.V., et al. // Propellant, Explosives, Pyrotechnic. – 2011. – No. 36. – P. 524–529.
5. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Архипов В.А. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 8/2. – С. 107–114.
6. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Муравлев Е.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 8/2. – С. 115–121.
7. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 7. – С. 653–656.
8. Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И. и др. // Датчики и системы. – 2011. – № 11. – С. 61–63.
9. Kudryashova O.B., Akhmedeev I.R., Pavlenko A.A., et al. // Key Eng. Mater. – 2010. – V. 437. – P. 179–183.
10. Bouayal S. and Dumouchel C. // Particle & Particle Systems Characterization. – 2001. – V. 18. – Is. 1. – P. 33–49.
11. Hendrik Christoffel van de Hulst. Light scattering by small particles (Structure of matter series). – Chapman & Hall, 1957.
12. Голубев А.Г., Ягодкин В.И. // Труды ЦИАМ. – 1978. – № 828. – 21 с.
13. Liu H. Science and Engineering of Droplets – Fundamentals and Applications. – William Andrew Publishing: Noyes, 2000.
14. Симачков Н.Н. // ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – Вып. 2. – С. 46–50.
15. Лойцянский Г.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978.

\*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,  
г. Бийск, Россия

Поступила в редакцию 10.07.12.

\*\*НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского  
Томского государственного университета, г. Томск, Россия  
E-mail: ishmatoff@rambler.ru, admin@ipcet.ru leva@niipmm.tsu.ru

---

Ишматов Александр Николаевич, к.ф.-м.н., м.н.с.;

Ворожцов Борис Иванович, д.т.н., г.н.с.;

Архипов Владимир Афанасьевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. отделом.