

Применение метода малоуглового рассеяния лазерного излучения при исследовании импульсного распыления жидкостей

А.Н. Ишматов, И.Р. Ахмадеев*

*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН
659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1*

Поступила в редакцию 10.09.2012 г.

Рассмотрены особенности применения метода малоуглового рассеяния лазерного излучения для изучения импульсного формирования аэрозольных сред. Предложена модификация измерительной установки, которая позволяет вести исследования развития облака, смоделированного в лабораторных условиях, практически с момента после его образования.

Ключевые слова: метод малоуглового рассеяния лазерного излучения, измерительная установка, импульсное формирование аэрозоля, распыление жидкости; low-angle laser light scattering, measuring system, impulse aerosol formation, liquid atomization.

Введение

Изучение формирования аэрозольных сред в результате импульсного воздействия является актуальной задачей и требует использования высокоточных и быстродействующих методов. Все более важным и практически необходимым становится знание динамики рабочих процессов, которые происходят вследствие комплекса воздействующих факторов в условиях высокоскоростного импульсного распыления жидкостей.

Использование метода малоуглового рассеяния лазерного излучения (LALLS) для исследования дисперсных параметров аэрозольных сред при импульсном формировании имеет ряд преимуществ, к которым относятся [1, 2]: широкий диапазон измеряемых значений (при анализе с помощью теории Ми – от 100 нм), высокое быстродействие, слабая чувствительность к показателю преломления материала частиц и возможность динамических измерений. В то же время высокая чувствительность налагает серьезные требования на качество исследуемого образца и вызывает необходимость тщательной калибровки оборудования. Также при прохождении зондирующего лазерного излучения в исследуемом объеме из-за высокой концентрации частиц на начальных этапах импульсного формирования аэрозолей может возникать эффект многократного рассеяния света частицами [1, 3], что приводит к невозможности получения точных данных измерениях.

Цель настоящей работы – оценка возможностей применения метода LALLS для изучения процессов импульсного формирования жидкокапельных сред.

Экспериментальная оценка

При проведении натурных экспериментов процесс импульсного распыления моделировался в лабораторных условиях при использовании устройства в виде модифицированной гидродинамической трубки (рис. 1) для распыления малых объемов, также применявшегося в работах [4, 5].

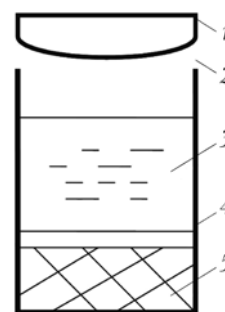


Рис. 1. Схема распылителя [5]: 1 – ограничитель; 2 – выходное отверстие; 3 – жидкость; 4 – корпус; 5 – пиротехнический заряд

В распылителе пиротехнический заряд отделен от жидкости непроницаемой мембраной. За счет резкого скачка давления при сгорании заряда происходит кавитирование жидкости, а сгенерированный газ под давлением поступает в жидкость, газифицируя и вспенивая ее. Далее «подготовленная» жидкость

* Александр Николаевич Ишматов (ishmatoff@rambler.ru); Игорь Радикович Ахмадеев (admin@ipcet.ru).

при высоких скоростях истекает через выходное отверстие. Ограничитель служит для возможности регулирования формы факела распыла и площади выходного сечения [4–6]. Для распыления использовалась дистиллированная вода, масса жидкости для однократного распыла ~ 10 г.

Эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха 293 К и относительной влажности 50%. В соответствии с оптимальными условиями [4, 6] распыление проводилось при рабочих давлениях в устройстве ~ 12 МПа и угле раскрытия факела, равном 90°. Скоростная видеосъемка импульсного распыления показала (рис. 2), что факел распыла имеет конусообразную симметричную форму, выброс жидкости из распылителя заканчивается через 3 мс, скорость выброса соответствует ~ 200 м/с, формирование облака происходит за 8 мс.

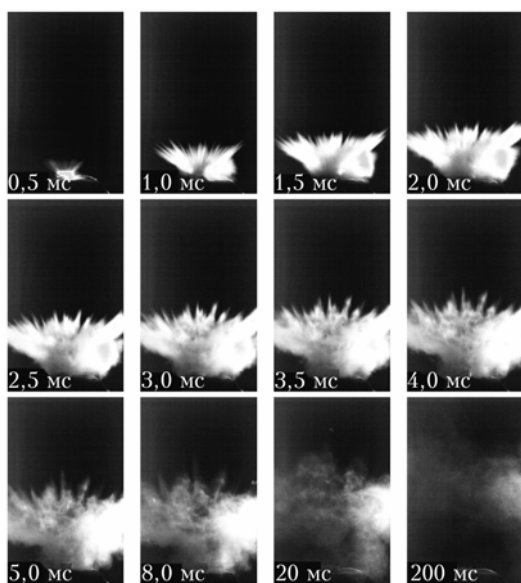


Рис. 2. Визуализация распыления

Импульсный дисперсный поток можно рассматривать как конусообразное тело вращения, условно разделенное на зоны (рис. 3).

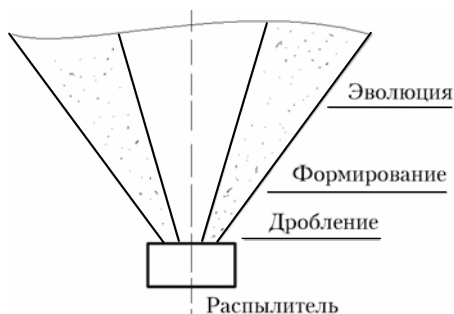


Рис. 3. Схема деления потока

С точки зрения конечного результата процесс формирования капель вследствие первичного и вторичного распыления логично рассматривать в одной зоне («дробление») до 0,1 м, поскольку в сильно тур-

булизованных потоках на расстояниях, превышающих 0,1 м, возникает кризис сопротивления движению частиц дисперсной фазы (сопротивление движению капле в потоке оказывается меньше в 4–7 раз, чем для отдельной капли) [7, 8]. Таким образом, очевидно, что диспергирование жидкости происходит на небольшом расстоянии от сопла.

Проводить исследование дисперсности капель в области «дробление» на данном этапе не имеет смысла, так как в этой области ввиду большой плотности потока не исключена коагуляция капель, их форма может отличаться от сферической, к тому же в потоке могут присутствовать жидкостные структуры, которые продолжают дробиться. Для исследования измерительной установкой [2] по методу LALLS выбиралась область «формирование» (расстояние от сопла 0,15 м) и область «эволюция» (расстояние от сопла 0,3 м).

Установка позволяет вести непрерывные дистанционные бесконтактные измерения дисперсности и концентрации частиц непосредственно в дисперсном потоке [9]. Длина волны излучения лазера составляет 631 нм, диаметр лазерного луча ~ 1,5 мм, мощность лазера ~ 5 мВт. Регистрация интенсивности рассеянного на аэрозольных частицах излучения (индикатрисы рассеяния) проводилась под углами от 0,3 до 20° в плоскости, перпендикулярной лучу лазера, фотодиодной линейкой из 8 элементов, чувствительная площадка каждого из которых составляет 50 мм². Частота записи измеренных данных составляла 100 кГц. Ошибка измерения индикатрисы рассеяния не превышала ± 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. В качестве базисной функции выбиралось гамма-распределение [2]:

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

где $a > 0$ – нормирующий множитель; α , b – параметры распределения; D – диаметр частиц.

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

На начальных этапах импульсного формирования аэрозолей из-за высокой оптической плотности на результаты измерения может существенно влиять эффект многократного рассеяния света частицами. Этот эффект при восстановлении функции распределения можно не учитывать в случае выполнения условия для оптической плотности дисперсной среды $\tau < 1,5$ [1]:

$$\tau = \ln(I_0/I) = kl_s,$$

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 в экспериментах предлагается использовать устройство в виде защитной трубки, уменьшающей длину оптического пути вдвое, как показано на рис. 4. Защитная трубка располагается так, чтобы изолировать зондирующий луч лазера на половине дисперсного потока.

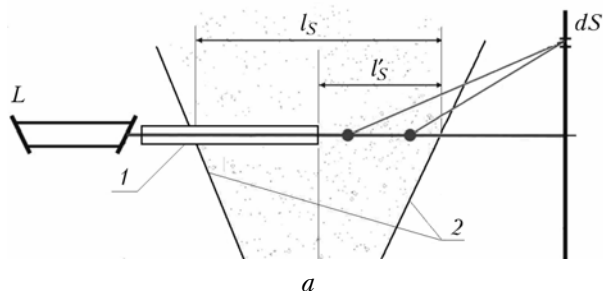


Рис. 4. Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки: L — лазер; 1 — защитная трубка; 2 — границы аэрозольного облака; dS — площадка, на которую приходит рассеянное под различными углами излучение; l_S — длина оптического пути без использования защитной трубки; l'_S — длина оптического пути с использованием защитной трубки

Проведение измерений без потери информации о потоке в этом случае возможно при его симметричности. Из рис. 4, б видно, что исходящий поток представляет собой пустотелый, относительно, симметрич-

ный конус. Влияние уменьшения оптического пути на результаты измерения учитывается численными методами при обработке измерительных данных [9].

Результаты и обсуждение

Экспериментальное исследование показало, что для приведенных условий проводить измерения по 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. 5).

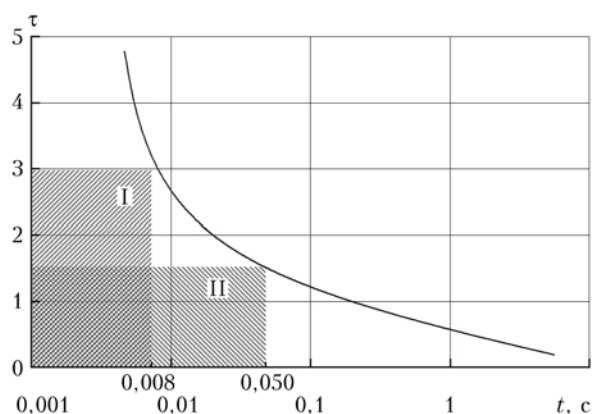


Рис. 5. Изменение оптической плотности в эксперименте: I — область ограничения измерения с применением защитной трубки; II — область ограничения измерения без применения трубки

Измерение дисперсных характеристик в течение промежутка времени до 8 мс не представляется возможным из-за высокой оптической плотности облака.

Предложенная модификация (использование защитной трубки) позволяет вести исследования развития облака практически с момента после его образования. Уменьшение оптической плотности в эксперименте с течением времени указывает на уменьшение концентрации аэрозоля. Исследование развития 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 (табл. 1).

Это связано, в первую очередь, с неустойчивой структурой облака, обусловленной циркуляцией и испарением: капли, находящиеся ближе к границе, более подвержены испарению, чем капли в центре.

Таблица 1

Изменение D_{43} при распылении 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, 0,15 м от сопла	15,9	16,6	16,5	17,5	17,2	16,9	10,8	8,8	8,5
D_{43} , мкм, 0,3 м от сопла	16,8	16,1	16,5	16,7	16,5	17,0	17,3	14,5	13,8

Изменение D_{43} при распылении этилового спирта

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, 0,15 м от сопла	13,1	12,1	13,5	11,2	12,3	9,4	8,4	7,1	7,5
D_{43} , мкм, 0,3 м от сопла	12,9	11,6	12,1	10,6	12,9	12,4	9,0	7,8	7,8

Исследование эволюции капель в импульсном дисперсном потоке до 8 мс возможно с помощью метода «солевого остатка», описанного в работе [11].

Дополнительная серия экспериментов по распылению быстроиспаряющейся жидкости (этилового спирта) подтвердила вышеприведенные выводы. Результаты проведенных экспериментов по распылению этилового спирта приведены в табл. 2.

Результаты измерений показывают, что оптическая плотность аэрозоля, а соответственно и его концентрация, с течением времени значительно падают (см. рис. 5), но при этом полного исчезновения за счет испарения капель аэрозоля не наблюдается. Этот эффект объясняется наличием продуктов сгорания пиротехнического заряда в облаке аэрозоля.

Заключение

Проведенная оценка возможности применения метода малоуглового рассеяния лазерного излучения для изучения процессов импульсного формирования жидкокапельных сред выявила ограничение на применение метода, вызванное многократным рассеянием света в дисперсном потоке на начальном этапе его формирования. Предложенная модификация (использование защитной трубки) позволяет вести исследования развития облака практически с момента после его образования (начиная с 8 мс после начала процесса распыления). С помощью предложенной методики проведения экспериментов обнаружено, что в центре облака сохраняются практически постоянные дисперсные 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 неустойчивой структурой облака, обусловленной циркуляцией и испарением: капли, находящиеся ближе к границе, более подвержены испарению, чем капли в центре.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 12-08-90804 мол_рф_нр, 12-08-

31282 мол_а) и Минобрнауки РФ (соглашение № 8883).

1. Голубев А.Г., Ягодкин В.И. Оптические методы измерения дисперсности аэрозолей // Труды ЦИАМ. М., 1978. № 828. 21 с.
2. Ахмадеев И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: Дис. ... канд. техн. наук. Бийск: АлтГТУ, 2008. 98 с.
3. van de Hulst H.Ch. Light scattering by small particles (Structure of matter series). London: Chapman & Hall, 1957. 470 p.
4. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Архитов В.А. Моделирование процесса диспергирования жидкости взрывным газогенератором // Изв. вузов. Физ. 2008. № 8/2. С. 107–114.
5. Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Сакович Г.В. Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция // Инж.-физ. ж. 2010. Т. 83, № 6. С. 1084–1104.
6. Kudryashova O.B., Vorozhtsov B.I., Muravlev E.V., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Titov S.S. Physico-mathematical modeling of explosion dispersion of liquid and powders // Propellant, Explosives, Pyrotechnic. 2011. N 36. P. 524–529.
7. Симаков Н.Н. Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки // Ж. техн. физ. 2004. Т. 74, вып. 2. С. 46–50.
8. Лойцянский Г.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
9. Kudryashova O.B., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S. A Method for Laser Measurement of Disperse Composition and Concentration of Aerosol Particles // Key Eng. Materials. 2010. V. 437. P. 179–183.
10. Boyaval S., Dumouchel C. Investigation on the Drop Size Distribution of Sprays Produced by a High-Pressure Swirl Injector. Measurements and Application of the Maximum Entropy Formalism // Particle & Particle Systems Characterization. 2001. V. 18, iss. 1. P. 33–49.
11. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И. Метод исследования тонкодисперсного распыления жидкостей // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 653–656.

A.N. Ishmatov, I.R. Akhmadeev. Application of the low-angle laser light scattering method for studying the pulse liquid atomization.

The features of application the low-angle laser light scattering method for study of the pulse formation of aerosol media are discussed. A modification of the measuring system, which allows the study of a cloud simulated in the laboratory conditions, almost from the time after its formation was proposed.