

УДК 621.7.08

Метод исследования тонкодисперсного распыления жидкостей

А.Н. Ишматов, Б.И. Ворожцов*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН
659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1*

Поступила в редакцию 18.01.2012 г.

Проведена экспериментальная оценка применения метода, основанного на анализе частиц солевого остатка, сформированного в результате испарения капель при распылении модельных водных растворов NaCl. Метод применялся для исследования дисперсного состава капель в факеле импульсного и ультразвукового распылителей.

Ключевые слова: метод исследования, дисперсность капель, методика «солевого остатка», тонкодисперсное распыление жидкостей, импульсное распыление, ультразвуковое распыление, модельный раствор, водный раствор NaCl, кристаллизация, морфология частиц, гидродинамическая ударная трубка; method of investigation, droplets dispersiveness, "saline residue" technique, finely dispersed liquid atomization, impulse atomization, ultrasonic atomization, model solution, NaCl solution, crystallization, particles morphology, hydrodynamic shock tube.

Введение

Проведение экспериментальной отработки устройств тонкодисперсного распыления жидкостей и исследование процессов формирования жидкокапельных сред связаны со значительными трудностями ввиду малого времени существования мелкодисперсных испаряющихся капель субмикронного и нанометрового диапазона [1].

Оптические методы [2, 3] позволяют проводить измерения с малым временным шагом непосредственно в самом потоке. Основной является проблема использования этих методов в условиях повышенной плотности и нестационарности дисперсного потока на начальных стадиях его формирования [4, 5]. Особенно остро это проявляется при исследовании импульсного распыления жидкостей, которое происходит однократно в течение нескольких миллисекунд и характеризуется высокими концентрациями дисперсного потока на начальных стадиях распыления [6]. Также существует проблема выбора измерительной области в потоке, поскольку сложно оценить расстояние, на котором еще протекает стадия диспергирования; не исключена коагуляция капель и к тому же их форма может отличаться от сферической. В случае выбора заведомо большего расстояния результаты измерений будут отражать картину по истечении

промежутка времени, за которое размер капель может измениться вследствие испарения.

Проблему с испарением и аморфностью форм можно решить методами заморозки жидких капель: например использовать метод «парафинового» моделирования [7]. Также известен способ определения дисперсности аэрозоля, основанный на исследовании солевого остатка [8, 9], сформированного при испарении капель растворов NaCl, используемого в качестве модельной жидкости при распылении. Функция распределения образованных капель восстанавливается из распределения частиц солевого остатка с учетом их размера и содержания соли в первоначальных каплях по методике, описанной в работе [8].

Экспериментальная оценка

Для оценки степени уменьшения капель раствора при формировании частиц сухого остатка проведен ряд экспериментов по испарению капель. Исследование проводилось в нормальных условиях (относительная влажность 50%, температура 298 К) с использованием оптического анализатора частиц «Pip 9.0». Для регистрации процесса применялась видеокамера (частота кадров 25 Гц), для создания высокой освещенности «холодным» светом использовался осветитель с волоконным световодом (ОВС-1), что позволило избежать влияния теплового излучения на испарение исследуемых капель, для получения капель — аэрограф («кратон» АВ-01). В качестве предметной

* Александр Николаевич Ишматов (ishmatoff@rambler.ru); Борис Иванович Ворожцов (admin@ipcet.ru).

пластинки использовалась подложка из поликарбоната, который обладает достаточно хорошими гидрофобными свойствами.

С помощью распылителя создается полидисперсное облако капель, динамика испарения в котором зависит от размера облака, расхода жидкости и воздуха. Для получения отдельных капель распылитель размещался на некотором расстоянии (~ 0,15 м) от предметной пластины. Мелкие капли довольно неустойчивы и быстро испаряются, в итоге оставались отдельные относительно крупные капли (20–100 мкм), испарение которых относительно медленное. Можно с определенной долей уверенности говорить, что такая капля с момента образования до попадания на подложку имеет, примерно, такое же процентное содержание соли, что и распыленный раствор.

На рис. 1 показана динамика испарения 90-мкм капли 20%-го водного раствора NaCl, которая продолжает испаряться в течение 5,9 с. Затем начинается кристаллизация, судить о которой можно по увеличившемуся светоотражению, а полное испарение заканчивается через 8,2 с.

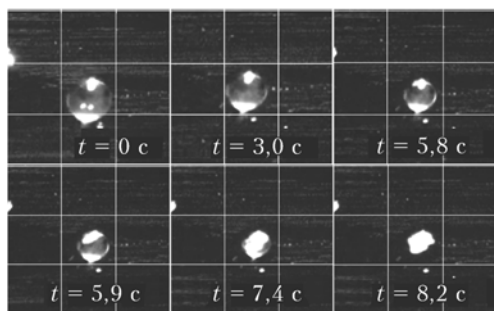


Рис. 1. Динамика испарения капли 20%-го раствора NaCl (шаг сетки 100 мкм)

Из рис. 1 следует, что при испарении конечная частица меньше первоначальной капли в 1,72 раза, при этом в момент кристаллизации уменьшение составило 1,42 раза. Из условия равенства массового содержания неиспаряемой примеси в капле и массы частицы после полного испарения воды из 20%-го раствора NaCl конечная частица должна быть меньше первоначальной капли в 2,2 раза в соответствии с уравнением [8]:

$$D_2 = D_1 \sqrt[3]{C_m \rho_{\text{sol}} / \rho_{\text{imp}}},$$

где D_2 – диаметр частицы, оставшейся после испарения растворителя из начальной капли диаметром D_1 ; C_m – относительная массовая концентрации примеси в растворе, %; ρ_{sol} , ρ_{imp} – плотность раствора и примеси (NaCl) в растворе.

Расходимость экспериментальных данных с расчетами может быть объяснена тем, что капли на подложке в силу своей массы несколько деформируются, а размер солевого остатка обусловлен площадью соприкосновения капли с подложкой в момент начала кристаллизации. Этого эффекта можно избежать при наблюдении мелких капель, масса которых

менее сильно сказывается на деформации. Эксперимент по исследованию кристаллов соли, оставшихся после испарения мелких капель (для этого проводилась регулировка распылителя с целью получения мелкодисперсной фракции), показал, что они имеют кубическую форму (рис. 2).

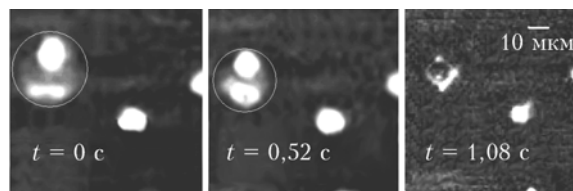


Рис. 2. Динамика испарения 33-мкм капли 20%-го раствора NaCl

Из рис. 2 следует, что из первоначальной 33-мкм капли 20%-го раствора NaCl формируется кристалл, равный 17 мкм, т.е. происходит примерно двукратное уменьшение, что соответствует расчетам. Время испарения составило 1,08 с.

Результаты и их обсуждение

Практическое применение методики для анализа дисперсности ультразвукового распыления на частотах 2,4 МГц показало, что в случае 10%-го модельного раствора (рис. 3, а) средний размер частиц солевого остатка ($D_2(50)$) составил 1,98 мкм, средний размер восстановленных капель ($D_1(50)$) – 5,38 мкм, для 20%-го раствора (рис. 3, б): $D_2(50) = 2,22$ мкм; $D_1(50) = 4,72$ мкм.

Различное содержание NaCl в воде обуславливает отличие по вязкости (μ_d) и плотности раствора (10%-й раствор NaCl: $\mu_d = 1,19$ Па·с; $\rho_{\text{sol}} = 1071$ кг/м³; 20%-й раствор NaCl: $\mu_d = 1,56$ Па·с; $\rho_d = 1148$ кг/м³ [10]), этим объясняется (с учетом особенностей ультразвукового распыления [11]) смещение размеров капель в сторону меньших значений при распылении 20%-го раствора.

Описанный способ применялся также для исследования дисперсности импульсного распыления жидкостей [6, 12] устройствами на основе гидродинамической трубки с использованием высокоэнергетических материалов в качестве энергоносителя. Метод распыления обусловлен скоротечностью процессов (менее 8 мс) формирования жидкокапельной среды и сложен для исследования [6].

В отличие от методики использования «камеры-ловушки» с синхронизацией ее открытия/закрытия [13], позволяющей решать задачи исследования первоначальных капель, методика «солевого остатка» по своей сути близка к методу «парафинового» моделирования [7], не требует разработки сложных механизмов и специальной подготовки пробоотборников, допускает использование комплексного подхода (одновременное использование нескольких методов исследования), что особенно актуально для максимальной информативности измерений в эксперименте.

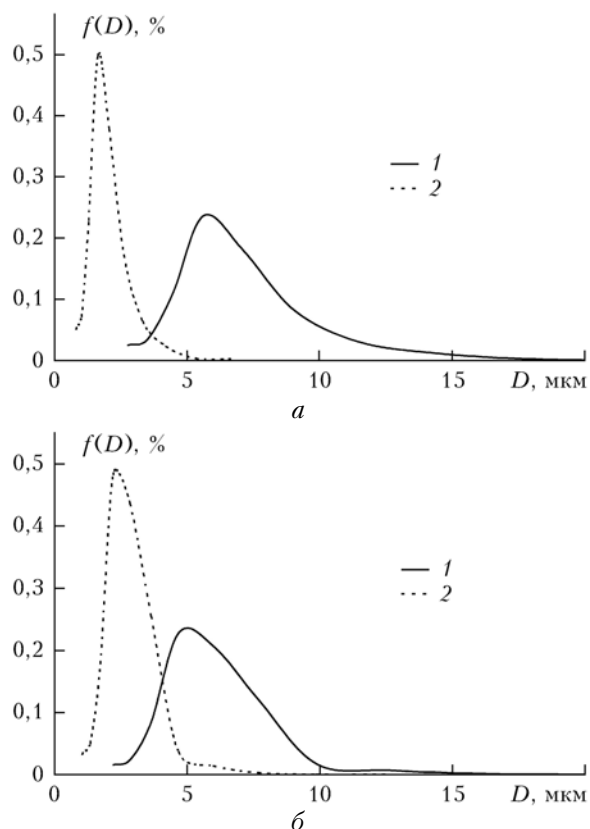


Рис. 3. Восстановление начальной функции распределения (1) по распределению (2) частиц солевого остатка при ультразвуковом распылении модельных растворов NaCl: а – 10%-й раствор NaCl; б – 20%-й раствор NaCl: $\mu_d = 1,56 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho_d = 1148 \text{ кг/м}^3$

В результате электронно-микроскопического исследования частиц установлено, что их морфология может быть различной: сплошные поликристаллические и монокристаллические образования, пустотелые сферы (рис. 4, а – импульсное распыление). Эти результаты не соотносятся с морфологией частиц, сформированных в результате аэродинамического (рис. 4, б) и ультразвукового (рис. 4, в) распыления растворов NaCl (шаг сетки – 30 мкм) и испарения капель с подложки (рис. 4, г).

Очевидно, что морфология определяется скоростью испарения воды из капель, обусловленной концентрацией раствора, дисперсностью капель и скоростью их движения, температурным режимом, аэродинамической структурой дисперсного потока [1, 12, 14]. При импульсном распылении создаются условия быстрого испарения за счет высоких скоростей потока (~ 200 м/с [6]), процесс испарения происходит быстрее диффузии соли в капле. В итоге на поверхности концентрация соли близка к значению перенасыщения, что приводит к формированию корки кристаллов и образованию полых сферических частиц.

При обработке и конструировании распылительных устройств импульсного типа наличие пустотелых сфероидов может служить «индикатором» максимально эффективного взаимодействия дисперсного потока с окружающей средой на начальном этапе его

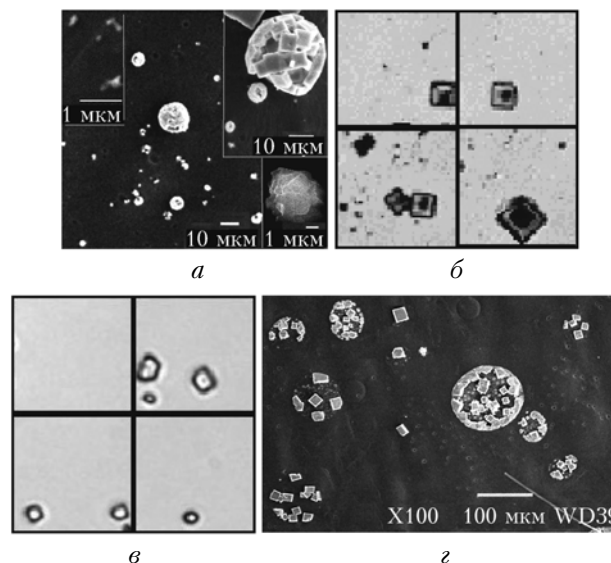


Рис. 4. Структура солевого остатка

формирования, а следовательно, и более эффективного диспергирования жидкости.

Заключение

По результатам применения методики показано, что предложенный способ позволяет восстанавливать реальную функцию распределения начальных капель по частицам их солевого остатка, также допускает использование комплекса методов исследования, что существенно увеличивает информативность измерений. Определено, что частицы солевого остатка являются «артефактами», отражающими в себе процессы, протекавшие при диспергировании. При должном подходе к исследованию морфологии частиц вполне возможно составить и описать особенности формирования дисперсной фазы в результате быстротечных процессов, например при импульсном диспергировании жидкостей, когда прямые измерения дисперсного потока на начальных этапах невозможны ввиду его высоких плотности и скорости выброса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-01-90701).

1. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Мир, 1986. 314 с.
2. Renliang Xu. Particle Characterization: Light Scattering Methods. N.Y.: Kluwer Academic Publishers, 2002. 397 p.
3. Merkus H.G. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. N.Y.: Springer, 2009. Particle Technology Series. 536 p.
4. 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.
5. Ишматов А.Н., Ахмадеев И.П., Ворожцов Б.И., Туттов С.С., Кудряшова О.Б. Лазерная измерительная установка для исследования высококонцентрированных жидкокапельных аэрозолей // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 61–63.

6. *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.
7. *Вольнский М.С.* Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
8. *Ишматов А.Н.* Методика исследования жидкокапельных аэрозольных сред по солевому остатку, образованному при распылении растворов NaCl // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сб. 2011. Вып. 1. С. 58–60.
9. *Асланов С.К., Колтаков А.В.* Влияние электрического поля на процесс диспергирования жидкой поверхности // Физ. аэродисперсных систем. 2002. Вып. 39. С. 7–13.
10. *Ведерникова М.И., Старцева Л.Г., Юрьев Ю.Л., Орлов В.П.* Примеры и задачи по массообменным процессам химической технологии: Справ. пособие. В 4 ч. Ч. IV: Основные физические, химические и теплофизические свойства веществ. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. 154 с.
11. *Хмелев В.Н., Попова О.В.* Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: Научная монография. Барнаул: Изд. АлтГТУ, 1997. 160 с.
12. *Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И.* Исследование развития высокодисперсного аэрозоля жидкости с учетом влияния слабоиспаряемой примеси // Краткие сообщения по физике. 2010. № 1. С. 22–27.
13. *Стебновский С.В.* Импульсное диспергирование как предельный режим разрушения жидкого объема // Физ. горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 2. С. 117–128.
14. *Васильев Д.Д.* Математическое моделирование кристаллизации из аэрозоля водного раствора // Теплофиз. и аэромех. 2005. Т. 12, № 3. С. 465–470.

A.N. Ishmatov, B.I. Vorozhtsov. The method for the study of fine liquid atomization.

The work is dedicated to developing methods of studying disperse characteristics of liquid-droplet aerosols in a wide range of particle sizes. The application of the method based on analysis of particles of the saline residue resulted from evaporation of droplets when atomizing model aqueous NaCl solutions is experimentally evaluated. This method was used to investigate the particulate composition during the pulse and ultrasonic atomization of liquids.