

УДК 621.7.08

## **Использование модельного водного раствора NaCl при исследовании тонкодисперсного распыления жидкостей\***

**А.Н. Ишматов<sup>1</sup>, Б.И. Ворожцов<sup>1</sup>, В.А. Архипов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск*

<sup>2</sup>*НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета*

E-mail: ishmatoff@rambler.ru

Проведена теоретическая и экспериментальная оценка применения метода исследования распыления жидкостей, основанного на анализе частиц солевого остатка, сформированного в результате испарения капель при распылении модельных водных растворов NaCl. Приведены результаты исследования дисперсного состава капель в факеле импульсного и ультразвукового распылителей. Установлено, что при импульсном распылении формируются частицы солевого остатка различной морфологии, что указывает на нестационарные условия эволюции капель.

**Ключевые слова:** метод исследования, дисперсность капель, методика солевого остатка, тонкодисперсное распыление жидкостей, импульсное распыление, ультразвуковое распыление, модельный раствор, водный раствор NaCl, кристаллизация, морфология частиц.

### **Введение**

Экспериментальное исследование тонкодисперсного распыления жидкостей и исследование процессов формирования капельных сред связаны со значительными трудностями ввиду быстрого испарения мелкодисперсных капель [1]. Известны способы определения дисперсности распыла, основанные на улавливании капель иммерсионной средой [2, 3], но они являются косвенными и не дают объективной оценки распыления жидкости во всем объеме факела. Оптические методы [4, 5] позволяют проводить измерения непосредственно в самом потоке с малым временным шагом. Затруднительным является использование этих методов в условиях повышенной плотности и нестационарности дисперсного потока на начальных стадиях его формирования [6], особенно при исследовании импульсного распыления жидкостей, которое происходит однократно в течение нескольких миллисекунд [7, 8]. 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

---

\* Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (проекты № 12-08-90804 мол\_рф\_нр, № 12-08-31282 мол\_а) и Минобрнауки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», соглашение № 14.В37.21.2106).

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 [9] — вместо жидкости распылять расплавленный парафин, свойства которого (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) можно смоделировать в некоторых пределах, нагревая его до определенной температуры. Вылетающие частицы быстро охлаждаются, при этом влияние испарения минимально, поэтому их все можно уловить. Метод в своем роде уникален, поскольку позволяет оперировать не с выборочной пробой, а со всем множеством капель, формирующихся при распылении. Из-за своей сложности повседневное применение метода ограничено, но он может считаться эталонным.

В работах [10–12] описан способ с использованием раствора NaCl для исследования распыления, основанный на изучении сухого остатка, сформированного при испарении капель раствора. Способ информативен, поскольку размер частиц сухого остатка напрямую связан с содержанием неиспаряемой примеси в первоначальной капле и можно с удовлетворительной точностью восстановить размеры первоначальных капель. Однако требуется учитывать особенности процессов эволюции испаряющихся капель раствора при формировании частиц сухого остатка в рамках описанного способа.

Цель настоящей работы — оценка применения модельного раствора NaCl для определения дисперсности распыла.

### 1. Теоретическая оценка

При распылении образуется множество капель, движущихся с различными скоростями вследствие отличающихся начальных условий, масс и сил сопротивления. При движении капли раствора происходит ряд различных процессов. Чтобы показать степень влияния этих процессов на формирование частиц солевого остатка, проведем оценки характерных времен [13]:

$$t_1 = \frac{2}{36} \frac{\rho_d D^2}{\mu_g}, t_2 = 0,25 D^2 / \alpha, t_3 \approx \frac{\rho_d D^2}{\mu_d}, t_4 = \frac{18 \mu_g H}{\rho_d D^2 g}, t_5 = \frac{\rho_d D^2}{8 D_{AB} (C_S - C_\infty)}, t_6 = \frac{D^2}{4 D'_{AB}}, \quad (1)$$

где  $t_1$  — характерное время скоростной релаксации капель,  $t_2$  — характерное время выравнивания температуры в капле,  $t_3$  — характерное время затухания нестационарных возмущений в капле за счет вязкой диссипации энергии,  $t_4$  — характерное время гравитационного осаждения капли,  $t_5$  — характерное время испарения капли,  $t_6$  — характерное время диффузии растворенного вещества,  $\rho_d$  — плотность вещества частиц,  $D$  — диаметр капли,  $\mu_g$  — коэффициент динамической вязкости воздуха,  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $\mu_d$  — коэффициент динамической вязкости вещества капли,  $H$  — высота нижней границы облака,  $g$  — ускорение свободного падения,  $D_{AB}$  — коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе,  $C_S$  — концентрация равновесного с каплей пара,  $C_\infty$  — концентрация пара в пространстве,  $D'_{AB}$  — коэффициент диффузии растворенного вещества в растворе.

В качестве примера рассмотрим капли водного раствора NaCl в диапазоне размеров от 1 до 30 мкм при атмосферном давлении, температуре  $T = 293$  К, относительной влажности воздуха 50 %, при этом  $\mu_g = 18,27 \cdot 10^{-6}$  Па·с,  $\mu_d = 1,002 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $D'_{AB} = 1,1 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $D_{AB} = 0,23 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_d = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_S = 0,02$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_\infty = 0,01$  кг/м<sup>3</sup>,

Таблица 1

Характерные времена процессов эволюции капель

Параметр	Значение параметра					
	1	5	10	15	20	30
$D$ , мкм						
$t_1$ , с	$0,3 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$35,4 \cdot 10^{-5}$	$79,6 \cdot 10^{-5}$	$141,5 \cdot 10^{-5}$	$318,5 \cdot 10^{-5}$
$t_2$ , с	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$17,8 \cdot 10^{-5}$	$40,2 \cdot 10^{-5}$	$71,4 \cdot 10^{-5}$	$160,7 \cdot 10^{-5}$
$t_3$ , с	$10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$
$t_4$ , с	$10^4$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^3$	44,7	25,2	11,9
$t_5$ , с	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	0,12	0,216	0,489
$t_6$ , с	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	0,204

$\alpha = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  [14], а высоту нижней границы облака примем равной 0,3 м. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Оценка характерных времен указывает, что процессы скоростной релаксации капель, выравнивания температуры и возмущений в капле достаточно скоротечны и на фоне таких процессов, как гравитационное осаждение, испарение и диффузия соли в капле — не существенны.

По аналогии с процессами образования порошков оксидов металлов плазмохимическим методом [15] рассматривается следующая физическая картина. При распылении раствора, в результате испарения растворителя с поверхности капли, концентрация соли вблизи поверхности повышается, соль диффундирует к центру капли и при достижении определенного значения концентрации происходит кристаллизация с образованием конденсированного остатка. Процесс образования остатка определяет морфологию частицы и включает два периода. В течение первого периода формируется первичная структура частицы. Предположим, что при достижении концентрации соли в области на поверхности капли раствора некоторого критического значения перенасыщения  $C_{cr}$  происходит нуклеация кристалла. При этом в зависимости от скорости испарения и скорости диффузии соли в объеме капли возможны несколько вариантов.

1. Нуклеация одного или нескольких кристаллов с образованием сплошной частицы в случае относительно медленного испарения и высокой скорости диффузии соли, когда в момент времени достижения  $C_{cr}$  на поверхности капли концентрация соли во всем объеме близка к равновесной концентрации  $C_*$ .

2. Нуклеация множества кристаллов на поверхности капли с образованием полой частицы в случае относительно быстрого испарения и медленной скорости диффузии, когда концентрация соли больше  $C_*$  лишь для периферийной области капли.

В течение второго периода происходит испарение оставшегося растворителя и осаждение соли на первоначально образованных кристаллах с формированием сплошных либо полых частиц. Формирование сплошных частиц определяется условием [15]:

$$t_6 / t_5 < 0,6. \quad (2)$$

Условие (2) критично, т. к. для точного восстановления размера первоначальной капли требуется точное определение массы солевого остатка [12]. В случае наличия неоднородностей в теле частицы солевого остатка оценить ее массу без знания структуры проблематично. Из табл. 1 следует, что условие (2) выполняется и должны формироваться сплошные частицы.

Также очевидно, что для точного определения массы частиц солевого остатка процессы испарения и кристаллизации должны заканчиваться до попадания частиц на предметные пластины. Из табл. 1 следует, что для капель размерами менее 30 мкм данное условие выполняется (время осаждения много больше времени испарения капель).

Таким образом, для приведенных условий основным определяющим фактором эволюции капель и времени образования сухого солевого остатка при исследовании является испарение. Процесс испарения растворителя из капель размерами от 1 до 100 мкм можно описать с использованием диффузионной модели [1] с помощью уравнения [16–18]:

$$dD/dt = \frac{D_{AB}}{D \rho_d} (x_{\text{H}_2\text{O}}(t) C_S - C_\infty), \quad (3)$$

где  $x_{\text{H}_2\text{O}}(t)$  — мольная доля воды в капле раствора.

$$x_{\text{H}_2\text{O}}(t) = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}(t)/M_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}(t)/M_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NaCl}}(t)/M_{\text{NaCl}}},$$

где  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  — масса воды в капле,  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  — молярная масса воды,  $m_{\text{NaCl}}$  — масса NaCl в капле,  $M_{\text{NaCl}}$  — молярная масса NaCl.

При проведении численных расчетов принимался ряд допущений:

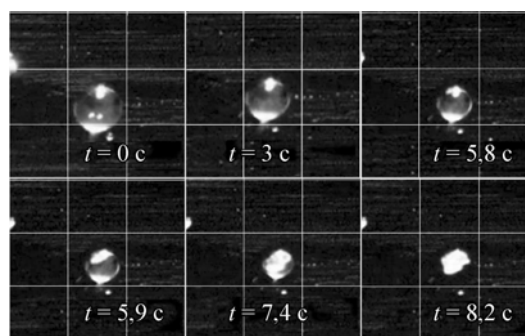
- все процессы рассматриваются в отсутствие конвекции в объеме капли;
- расстояние между каплями больше их среднего размера;
- капли в процессе движения под действием аэродинамических сил не деформируются и сохраняют свою сферическую форму;
- капли не сталкиваются, не дробятся и не коагулируют;
- в каждой капле при ее испарении происходит образование сплошной частицы солевого остатка, форма которого близка к шарообразной;
- температура капли остается постоянной и равной температуре мокрого термометра, находящегося в тех же условиях;
- физико-химические процессы при кристаллизации, образование химических связей в растворе и двойного электрического слоя, образующегося при диссоциации молекул NaCl и воды, не оказывают влияния на испарение. Допущение существенно, но ввиду оценочного характера расчетов, вполне справедливо.

Температурный фактор в приведенных выше уравнениях учитывается переменными:  $D_{AB}$ ,  $C_S$ ,  $C_\infty$ ,  $D'_{AB}$ , значения которых в зависимости от температуры будет различным [14]. Влияние ограниченного пространства аэрозольного облака на испарение капель учитывается изменением  $C_\infty$ . Для проведения более точных расчетов температуру испаряющейся капли целесообразно рассматривать в соответствии с теорией, изложенной в работах [1, 18], в нашем случае расчеты имеют достаточно упрощенный (оценочный) характер.

## 2. Экспериментальная оценка

Для оценки применимости уравнения (3) для расчета времени выдержки капель водного раствора проведен ряд экспериментов по испарению капель. Исследование проводилось в нормальных условиях (относительная влажность 50 %, температура 298 К) с использованием оптического анализатора частиц Pir9.0, для регистрации процесса применялась видеокамера (с частотой 25 кадров в секунду), для получения капель — распылитель аэродинамического типа. В качестве предметной пластинки использовалась подложка из поликарбоната, который обладает достаточно хорошими гидрофобными свойствами и позволяет вести исследование осевших капель без учета их растекания. С помощью распылителя создавался полидисперсный поток капель. За промежуток времени от момента образования капли до ее попадания в объектив микроскопа испарение может привести к значительному изменению относительной концентрации соли в капле.

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



Поэтому исследовались отдельные крупные капли (20–100 мкм), испарение которых относительно медленное [1], это позволяет с определенной долей уверенности говорить, что такая капля при попадании на подложку после образования имеет примерно такое же процентное содержание соли,

что и распыленный раствор. Правомочность интерпретации полученных для таких капель данных и теоретических расчетов обусловлена закономерностью испарения капель диаметром от 1 до 100 мкм [1]. Наша цель на данном этапе — выявить особенности формирования солевого остатка при испарении.

Форма частицы солевого остатка может отличаться от сферической, поэтому ее размер выражался через диаметр эквивалентной сферы, площадь которой приравнивалась площади проекции частицы. Такой подход имеет свои недостатки, связанные с появлением погрешностей при измерении частиц несферической формы, но для проведения оценочных измерений вполне подходит.

На рис. 1 показана динамика испарения 90-мкм капли 20-процентного 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. Выбор столь большой концентрации NaCl в модельном растворе обусловлен наглядностью получаемых данных, небольшим отличием размера капли и конечного кристалла, сформированного при испарении.

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 раствора, диаметр конечной частицы должен быть меньше диаметра первоначальной капли в 2,2 раза в соответствии с уравнением [11]:

$$D_1 = D_2 \sqrt[3]{C_m \rho_d / \rho_{\text{imp}}}, \quad (4)$$

где  $D_1$  — диаметр частицы, оставшейся после испарения растворителя из начальной капли диаметром  $D_2$ ,  $C_m$  — относительная массовая концентрации примеси в растворе,  $\rho_{\text{imp}}$  — плотность примеси (NaCl) в растворе.

Для NaCl  $\rho_{\text{imp}} = 2165 \text{ кг/м}^3$ , в зависимости от ее содержания в растворе  $\rho_d$  находится из табл. 2 [19].

Расходимость экспериментальных данных с расчетными может быть объяснена тем, что капли на подложке в силу своего веса несколько деформируются, а размер солевого остатка обусловлен площадью соприкосновения капли с подложкой в момент начала кристаллизации. Этого эффекта можно избежать при наблюдении более мелких капель, вес которых менее сильно сказывается на деформации. Эксперимент по исследованию

Таблица 2

## Плотность водных растворов NaCl

Параметр	Значение параметра									
	2	6	10	14	16	18	20	22	24	26
$C_m, \%$										
$\rho_d, \text{кг/м}^3$	1012	1041	1071	1101	1116	1132	1148	1164	1180	1197

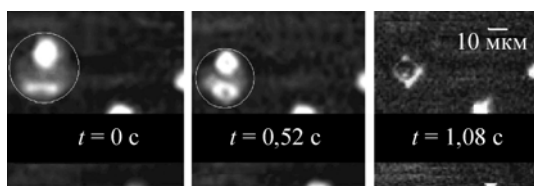


Рис. 2. Динамика испарения 33-мкм капли 20-процентного раствора NaCl (шаг сетки 100 мкм).

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).

Из рис. 2 следует, что из первоначальной 33-мкм капли 20-процентного раствора NaCl формируется кристалл, равный 17 мкм, т.е. происходит примерно двукратное уменьшение, что соответствует расчетам, при этом время испарения составляло 1,08 с.

### 3. Результаты и их обсуждение

Для оценки адекватности предложенной модели проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными, полученными при микроскопическом исследовании испарения отдельных капель раствора NaCl (рис. 3). Численный эксперимент показал, что с течением времени скорость испарения постепенно падает, асимптотически приближаясь к нулевому значению (рис. 4). Поэтому в расчетах за конец испарения принималось значение времени, при котором дальнейшее изменение диаметра частицы составляет менее 5 % от конечного размера солевого остатка, рассчитанного по уравнению (1). Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает адекватность предложенной модели для проведения оценки времени выдержки (высыхания) капель водного раствора NaCl.

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

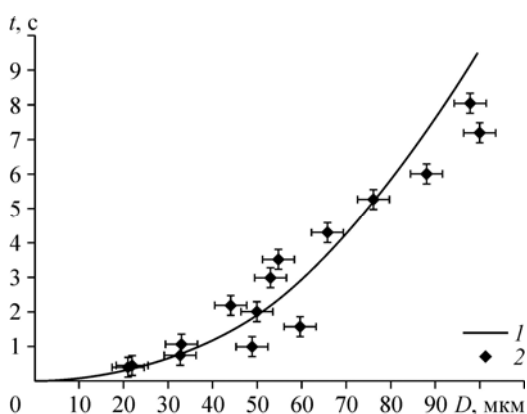


Рис. 3. Сравнение расчетных данных (1) с экспериментальными (2) по времени испарения капель 20-процентного раствора NaCl.

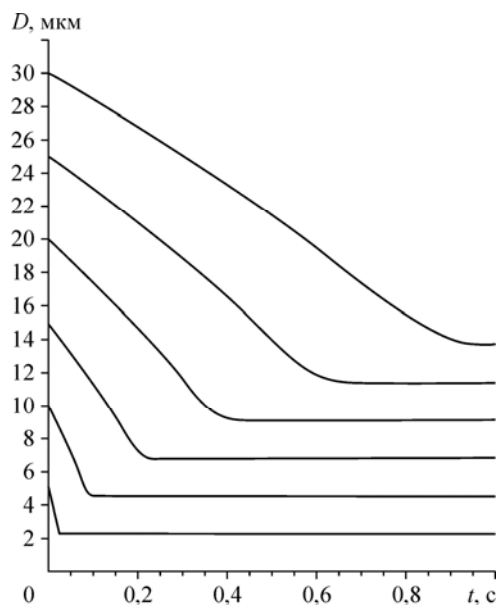


Рис. 4. Динамика испарения капель 20-процентного раствора NaCl (результаты численного расчета).

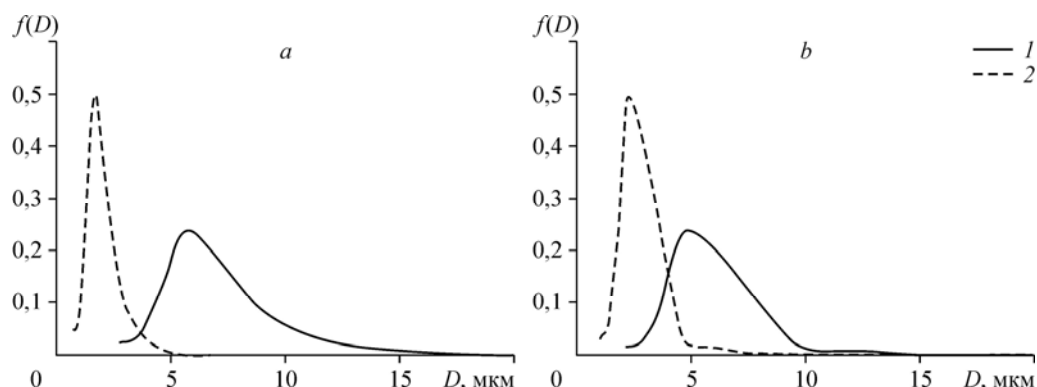


Рис. 5. Восстановление начальной функции распределения (1) по распределению частиц солевого остатка (2) при ультразвуковом распылении модельных растворов NaCl.  
*a* — 10-процентный раствор NaCl, *b* — 20-процентный раствор NaCl.

Различное содержание NaCl в воде обуславливает отличие по вязкости ( $\mu_d$ ) и по плотности раствора (10-процентный раствор NaCl:  $\mu_d = 1,19$  Па·с,  $\rho_d = 1071$  кг/м<sup>3</sup>, 20-процентный раствор NaCl:  $\mu_d = 1,56$  Па·с,  $\rho_d = 1148$  кг/м<sup>3</sup> [20]), этим объясняется (с учетом особенностей ультразвукового распыления [21]) смещение размеров капель в сторону меньших значений при распылении 20-процентного раствора. Таким образом, во избежание существенных погрешностей для проведения исследований следует использовать растворы с малой концентрацией. Описанный способ применялся также для исследования дисперсности импульсного распыления [8]. Метод распыления обусловлен скоростью процессов формирования жидкокапельной среды (менее 8 мс) и сложен для исследования [3, 8, 11, 22, 23]. В результате электронно-микроскопического исследования частиц, образованных при импульсном распылении, установлено, что их морфология может быть различной — сплошные поликристаллические и монокристаллические образования, пустотелые сферы (рис. 6, *a*). Эти результаты не соотносятся с морфологией частиц,

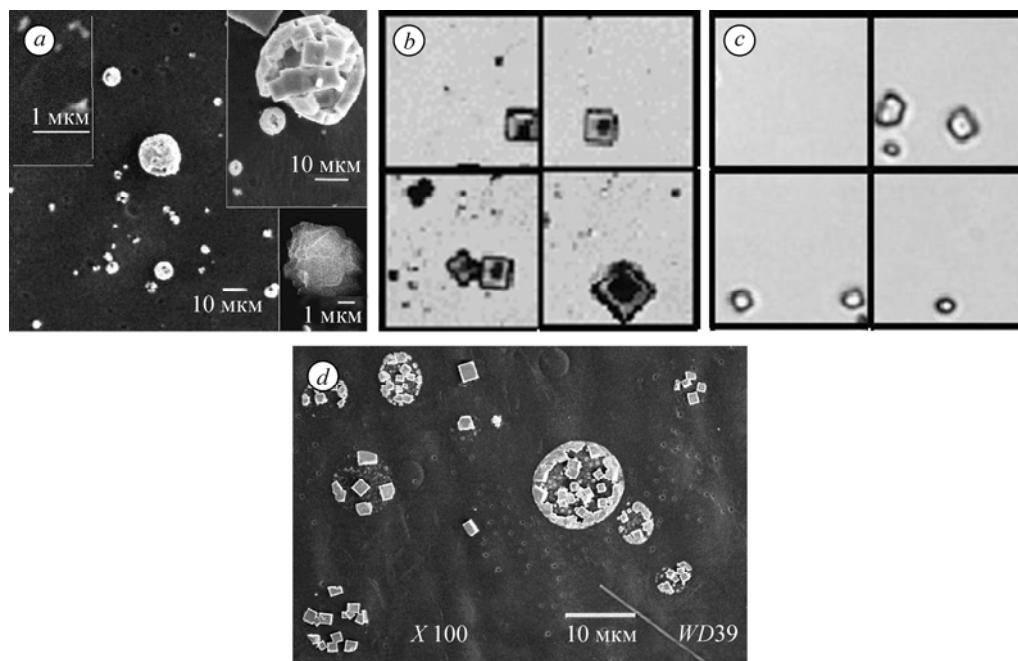


Рис. 6. Структура солевого остатка.  
*a* — импульсное распыление, *b* — аэродинамическое распыление (шаг сетки 30 мкм), *c* — ультразвуковое распыление (шаг сетки 30 мкм), *d* — испарение капель с подложки.

сформированных в результате аэродинамического (рис. 6, *b*), ультразвукового (рис. 6, *c*) распыления растворов NaCl (шаг сетки 30 мкм) и испарения капель с подложки (рис. 6, *d*).

Очевидно, что морфология определяется скоростью испарения воды из капли, обусловленной концентрацией раствора, дисперсностью капель и скоростью их движения, температурным режимом, аэродинамической структурой дисперсного потока.

Морфология частиц солевого остатка, сформированного при импульсном распылении, указывает на то, что создаются условия быстрого испарения капель за счет высоких скоростей выброса (~200 м/с [8]). Характерное время скоростной релаксации движения 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 NaCl на внутренней поверхности солевой корки. Причем при отработке и конструировании распылительных устройств импульсного типа наличие пустотелых сфероидов может служить индикатором максимально эффективного взаимодействия дисперсного потока с окружающей средой на начальном этапе его формирования, а следовательно, и более эффективного диспергирования жидкости.

В отличие от экспериментальных методик (с использованием камеры-ловушки с синхронизацией ее открытия/закрытия) [3], позволяющих решить задачи исследования первоначальных капель, методика солевого остатка по своей сущности близка к методу парафинового моделирования [9], 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 одном эксперименте. Например, использование методов электронной микроскопии при исследовании жидких капель затруднительно, а при исследовании частиц твердого остатка вполне возможно, что значительно расширяет возможности при исследовании субмикронных и наноразмерных частиц и их морфологии.

### **Заключение**

По результатам применения методики показано, что предложенный способ позволяет восстанавливать реальную функцию распределения начальных капель по частицам их солевого остатка, дает возможность использование комплекса методов исследования, что существенно увеличивает информативность измерений.

Установлено, что основными определяющими процессами при формировании частиц солевого остатка являются испарение и диффузия соли в капле. При восстановлении начальной функции распределения важным является условие полного испарения капель при их осаждении — если формирование частиц сухого остатка не успевает проходить в воздухе, то их форма может быть искажена в результате растекания испаряющейся жидкой капли на пробоотборной пластине.

В случае исследования импульсного распыления показано, что частицы солевого остатка являются артефактами, отражающими в себе следы процессов, протекавших при диспергировании. При должном подходе к исследованию морфологии частиц вполне возможно составить и описать особенности формирования дисперсной фазы в результате быстротечных процессов, когда прямые измерения развития дисперсного потока на начальных этапах невозможны ввиду высоких плотностей аэрозоля и скоростей выброса.

### **Список литературы**

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



2. **Пажи Д.Г., Галустов В.С.** Основы техники распыливания жидкостей / Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1984. 256 с.
3. **Стебновский С.В.** Импульсное диспергирование как предельный режим разрушения жидкого объема // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 2. С. 117–128.
4. **Renliang Xu.** Particle characterization: light scattering methods. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 397 p.
5. **Merkus H.G.** Particle size measurements: fundamentals, practice, quality. New York: Springer, 2009. Particle Technology Series. 536 p.
6. **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. Vol. 18, № 1. P. 33–49.
7. **Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р.** Применение метода малоуглового рассеяния лазерного излучения при исследовании импульсного распыления жидкостей // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 81–84.
8. **Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Сакович Г.В.** Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 6. С. 1084–1104.
9. **Вольнский М.С.** Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.
10. **Асланов С.К., Колпаков А.В.** Влияние электрического поля на процесс диспергирования жидкой поверхности // Физика аэродисперсных систем. 2002. Вып. 39. С. 7–13.
11. **Ishmatov A.N., Vorozhtsov V.I.** Experimental study of the droplets evolution upon impulse spray formation // ICLASS 2012, 12th Triennial Intern. Conf. on Liquid Atomization and Systems: Proceedings of Conference, Heidelberg, Germany, September 2–6, 2012. # 1112 b [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.iclass2012.org/Downloads/ICLASS2012.zip/> (SBN 978-88-903712-1-9).
12. **Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И.** Метод исследования тонкодисперсного распыления жидкостей // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 653–656.
13. **Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф.** Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во ТГУ, 1986. 264 с.
14. **Рид Р., Праусник Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1982. 592 с.
15. **Жуков А.С.** Термохимия синтеза оксидов металлов плазмохимическим методом // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53, № 11/3. С. 104–108.
16. **Васильев Д.Д.** Математическое моделирование кристаллизации из аэрозоля водного раствора // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 465–470.
17. **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.
18. **Ролдугин В.И.** Физикохимия поверхности: учебник-монография. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 568 с.
19. **Иванов В.М., Семененко К.А., Прохорова Г.В., Симонов Е.Ф.** Аналитическая химия натрия. М.: Наука, 1986. 245 с.
20. **Ведерникова М.И., Старцева Л.Г., Юрьев Ю.Л., Орлов В.П.** Примеры и задачи по массообменным процессам химической технологии: справочное пособие в 4 ч. Ч. IV: Основные физические, химические и теплофизические свойства веществ. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. 154 с.
21. **Хмельёв В.Н., Попова О.В.** Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве: научная монография. Барнаул: АлтГТУ, 1997. 160 с.
22. **Kudryashova O.V., Vorozhtsov V.I., Muravlev E.V., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Titov S.S.** Physico-mathematical modeling of explosive dispersion of liquid and powders // Propellant, Explosives, Pyrotechnic. 2011. No. 36, P. 524–529.
23. **Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И., Архипов В.А.** Эволюция капель при импульсном формировании аэрозольных сред // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/3. С. 51–57.

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2012 г.,  
после доработки — 26 декабря 2012 г.*