

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ КОАГУЛЯЦИИ ИОНИЗИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Полетаев Н. И.

*Институт горения и нетрадиционных технологий Одесского
национального университета имени И.И. Мечникова, Одесса, 65082,
ул. Дворянская 2, incomb@ukr.net*

Первая стадия конденсации продуктов газофазного горения частиц металлов заканчивается образованием устойчивых зародышей, дальнейший рост которых в отсутствие молекул мономеров происходит путем коагуляции частиц. При высоких скоростях нуклеации, характерных для высокотемпературных пламен металлов, размер зародышей составляет несколько молекул и их концентрация в зоне конденсации может достигать значений $N \sim 10^{22}-10^{23} \text{ м}^{-3}$. Зарядка частиц в отсутствие легкоионизируемых примесей осуществляется в основном термоэлектронной эмиссией и в зоне конденсации присутствуют положительно заряженные (N_+) и нейтральные частицы с концентрацией $N_0 = N - N_+$. В этом случае уравнение коагуляции монодисперсных частиц можно аппроксимировать выражением:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{2} k_{00} N^2 \left[\frac{k_{++}}{k_{00}} \alpha^2 + 2 \cdot \frac{k_{+0}}{k_{00}} \alpha \cdot (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2 \right] \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{N_+}{N}$ степень ионизации частиц, $k_{++} = k_{00} \exp\left(-\frac{U_n}{k_B T_g}\right)$,

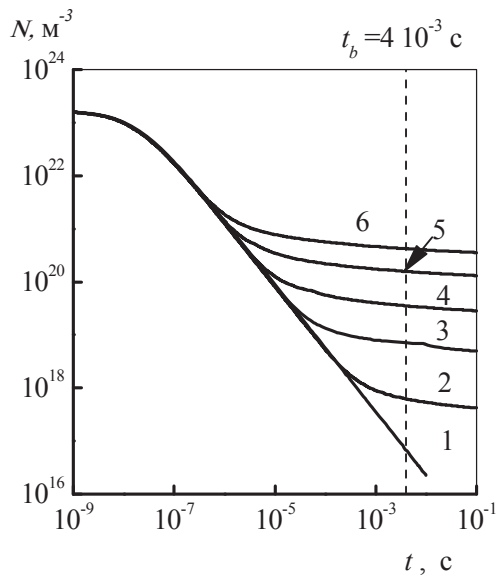
$$k_{+0} = k_{00} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{p E_n}{k_B T_g} \right)^2 \right], \quad k_{00} = 4 \sqrt{\frac{12 k_B T_g r_n}{\rho_k}} \quad \text{константы скорости}$$

коагуляции одноименно заряженных частиц, заряженных и нейтральных частиц и нейтральных частиц соответственно, U_n , p и E_n - потенциал взаимодействия частиц, индуцированный дипольный момент нейтральной частицы и напряженность электрического поля, создаваемого заряженной частицей.

Со временем концентрация частиц уменьшается, а их размер увеличивается. Это приводит к увеличению их заряда. Степень ионизации аэрозоля оценивалась с помощью уравнений Саха ($\alpha < 1$) и Эйбиндера для многократной ионизации. При добавлении в систему

легкоионизируемых примесей заряд частиц оценивался из условия баланса потоков электронов и ионов на поверхность частиц.

Анализ решения уравнения (1) позволил установить следующее: 1) как и в случае незаряженных частиц, скорость коагуляции ионизованного аэрозоля не зависит от начальной концентрации частиц. Другими словами предыстория образования исходного аэрозоля (скорость нуклеации, поверхностный рост частиц); не должны заметно влиять на дисперсность конечного аэрозоля; 2) в условиях постепенного повышения степени ионизации поляризационное взаимодействие заряженных и незаряженных частиц (k_{+-}) не оказывает заметного влияния на скорость коагуляции. 3) экспоненциальное уменьшение константы скорости коагуляции одноименно заряженных частиц (k_{++}) приводит к ранней ($t < t_b$ - время пребывания частиц в зоне горения) остановке коагуляции и уменьшению размера частиц; 4) экспоненциальная зависимость k_{++} от температуры среды приводит к существенному влиянию температуры на конечный размер частиц продуктов сгорания.



Таким образом, основное влияние на кинетику коагуляции продуктов сгорания металлов оказывает константа скорости коагуляции (k_{++}) одноименно заряженных частиц. На рисунке приведены результаты расчетов коагуляции продуктов сгорания факела частиц алюминия ($T_g = 3200$ К) с добавками соли карбоната калия (1 – незаряженные частицы; 2 – $n_A = 3.3 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$; 3 – $n_A = 3.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; 4 – $n_A = 3.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; 5 – $n_A =$

$3.3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; 6 – $n_A = 1.7 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, где n_A – концентрация атомов калия). Конечный размер частиц продуктов сгорания определялся по пересечению прямой $t_b = 4 \cdot 10^{-3}$ с зависимостью $N = f(t, n_A)$.

Полученные размеры частиц $r_n = (40, 20, 9, 5, 3, 2)$ нм свидетельствуют о достаточно высокой эффективности рассмотренного подхода к управлению размером продуктов сгорания металлов (целевых продуктов газодисперсного синтеза). Следует отметить, что при концентрации ионов в среде $n_i \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ начинает сказываться ионное увлечение частиц, что может приводить к увеличению скорости коагуляции и, следовательно, размера частиц.