

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ «ПРЕДЕЛЬНОЙ» ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Скапцов А.С., Светлова Т.В., Болашенко Т.И.
Могилевский государственный университет продовольствия
г. Могилев, Беларусь

Одной из важных и наиболее интересных задач физики аэродисперсных систем является задача об осаждении наноразмерных аэрозольных частиц в каналах различной геометрии. Решение этой задачи требуется для расчета и проектирования целого ряда аэрозольных приборов (счетчиков аэрозольных частиц, электростатических классификаторов частиц, дифференциальных анализаторов подвижности частиц, диффузионных батарей сеточного и канального типов и др.), а также используется при разработке фильтрующих устройств для очистки газов от ультратонких аэрозольных примесей.

При описании осаждения наноразмерных аэрозольных частиц в каналах применяют различные подходы. В общем случае решается система уравнений конвективной диффузии для частиц, неразрывности и движения двух или многокомпонентной смеси. Зачастую решение такой системы связано с определенными математическими сложностями. Поэтому для упрощения решения задачи используют определенные приближения, например, диффузионное приближение для описания двух или многокомпонентных смесей, которое предполагает, что движение компонент относительно смеси происходит только вследствие процессов диффузии. Помимо этого накладываются ограничения и на взаимодействие компонент смеси.

Более упрощенный подход, в частности, расчет траектории движения частиц, допустим, если пренебречь броуновским движением и вращением наночастиц. Численные оценки показывают, что при нормальных условиях частица размером 10 нм имеет коэффициент диффузии равный $5,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и скорость теплового движения не более 4,4 м/с. Для сравнения, коэффициент диффузии молекул азота в тех же условиях составляет $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а среднеквадратичная скорость – 460 м/с. Таким образом, учет броуновской диффузии частиц исключительно важен в двух случаях: при рассмотрении поведения частиц, находящихся вблизи поверхностей осаждения и когда частицы настолько малы, что их коэффициент диффузии приближается к значению коэффициента молекулярной диффузии. Рассмотрим применение указанного подхода к расчету осаждения аэрозольных частиц в плоском щелевом изотермическом канале с фазовыми превращениями на стенках.

Предположим, что газовая смесь является бинарной, а концентрация активной (диффундирующей) компоненты на верхней поверхности канала выше, чем на нижней. Под действием градиента концентрации активной компоненты аэрозольные частицы, поступающие в канал, будут смещаться по направлению к нижней поверхности. Для решения задачи об осаждении частиц используем следующие допущения:

- на входе в канал и по всей длине канала течения газа является ламинарным, а распределение скорости рассчитывается с учетом фазовых переходов на поверхностях канала;
- на входе в канал концентрация аэрозольных частиц одинакова по всему сечению канала;

- концентрация аэрозоля такова, что взаимодействие между частицами отсутствует, так что каждая частица движется независимо от других и траектории частиц не пересекаются.

Последнее допущение позволяет ввести понятие «предельной» траектории, то есть такой траектории, длина проекции которой на горизонтальную плоскость определяет длину канала, при которой происходит полное осаждение частиц. Если x^* - начальная координата предельной траектории, то все частицы, координаты которых лежат в пределах $x^* \leq x \leq d$ (где d - высота канала и координата нижней поверхности), достигнут нижней стенки канала. В этом случае осаждение частиц в канале удобно описывать с помощью параметра, называемого коэффициентом захвата, который представляет собой отношение потока частиц с координатами на входе от x^* до d , к потоку частиц через входное сечение канала ($0 - d$). Начальная координата «предельной» траектории может быть рассчитана из уравнения траектории движения одиночной частицы в плоском канале с соответствующими граничными условиями. При интегрировании уравнения траектории предполагалось, что продольная составляющая скорости наноразмерной частицы равна соответствующей проекции скорости газовой компоненты, а поперечная составляющая - определяется только градиентом концентрации на стенках канала и не зависит от координаты частицы. Используя выражения для коэффициента захвата и предельной длины траектории частицы, получено соотношение, позволяющее оценить осаждение частиц в канале:

$$V_x \{A[1 - C_1(0)] - B[C_1(d) - C_1(0)]\} = K \frac{QA\rho_2}{Lb\rho}, \quad (1)$$

где V_x - поперечная составляющая скорости частиц; $C_1(0)$ и $C_1(d)$ - концентрации активной компоненты газовой смеси на верхней и нижней поверхностях канала; ρ_2 и ρ - плотности второй компоненты и газовой смеси; L , b и d - длина, ширина и высота канала; K - коэффициент захвата частиц; Q - объемный расход газовой смеси; A и B - численные коэффициенты, значение которых зависит от физико-химических свойств газовой смеси и условий на стенках канала. Так как $\frac{Q}{bd} = \langle V_z \rangle_{z=0}$, где $\langle V_z \rangle_{z=0}$ - средняя скорость течения газовой смеси в канале, то удобно ввести безразмерную поперечную скорость частиц $\hat{V} = \frac{V_x}{\langle V_z \rangle_{z=0}}$. С учетом введенных обозначений из формулы (1) можно найти коэффициент захвата частиц:

$$K = \hat{V} \frac{L\rho}{d\rho_2} \cdot [1 - C_1(0)] - \frac{B}{A} [C_1(d) - C_1(0)]. \quad (2)$$

Как следует из полученного выражения (2), зависимость коэффициента захвата от безразмерной скорости частиц \hat{V} является линейной функцией. Угол наклона прямой определяется множителем при \hat{V} , который зависит от свойств газовой смеси, условий на стенках канала и геометрических размеров канала. Следует заметить, что линейный характер зависимости K от \hat{V} сохраняется только в определенном диапазоне значений диффузионных чисел Pe , установить который можно путем численных расчетов.

Если коэффициент захвата K равен 1, то используя выражение (2) можно оценить пороговую длину канала L^* , при которой все частицы, поступающие на вход камеры, осаждаются на нижней поверхности канала. Таким образом, задавая размеры канала и условия на его стенках, можно рассчитать либо коэффициент захвата частиц K или пороговую длину канала L^* . При выполнении расчетов следует принять во внимание, что скорость поперечного движения частиц не зависит от их размера, а определяется только величиной градиента концентрации активной компоненты газовой смеси.