

03

© 1991 г.

ЭВОЛЮЦИЯ ГРУБОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ, ПЕРЕМЕШИВАЕМОГО В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Н. Н. Белов

Построена теория эволюции грубодисперсного аэрозоля, перемешиваемого в камере на основании исходных выражений, предложенных Н. А. Фуксом, и связывающих концентрацию частиц аэрозоля с высотой камеры и скоростью падения частиц. Показано, что седиментационная эволюция аэрозоля с гауссовой начальной функцией распределения частиц по размерам сохраняет гауссов вид распределения на всем протяжении процесса. Найден аналитические соотношения, описывающие: 1) скорость падения частиц вне диапазона применимости закона Стокса, 2) взаимосвязь оптических и микрофизических параметров аэрозоля, 3) взаимосвязь скорости изменения концентрации частиц со средними характеристиками (средняя скорость падения, средняя площадь сечения частиц) аэрозоля в камере. Обоснована целесообразность использования регистрации вероятности оптического разряда для изучения концентрации аэрозоля в камере.

Для моделирования процессов, определяющих оптические свойства атмосферы, широко используются аэрозольные камеры [1]. Существенное влияние на микрофизические характеристики аэрозоля в камере оказывает выпадение крупных частиц на дно камеры [2]. В [2] показано, что при отсутствии конденсации пара на частицах и испарении частиц аэрозоля, перемешиваемого в аэрозольной камере, концентрация частиц в камере определяется соотношением

$$n(t) = n_0 \int_0^{\infty} f_0(a) \exp\left[-V_s'(a) \frac{t}{H}\right] da, \quad (1)$$

где n_0 , $f_0(a)$ — концентрация и функция распределения по радиусам частиц исходного аэрозоля (интеграл от $f_0(a)$ нормирован на единицу); H — высота камеры; t — время жизни аэрозоля, $V_s(a)$ — скорость седиментации частиц радиуса a .

В диапазоне справедливости закона Стокса величина V_s равна $V_{s'}$, определяемой соотношением [2]

$$V_{s'}(a) = \frac{2}{9} a^2 \frac{g\gamma}{\eta}, \quad (2)$$

где g — ускорение земного тяготения, γ — плотность вещества частицы, η — вязкость газа.

Из (1) следует, что функция распределения частиц по размерам, интеграл от которой нормирован на концентрацию частиц, изменяется во времени по следующему закону:

$$\varphi(a, t) = n_0 f_0(a) \exp\left[-V_s(a) \frac{t}{H}\right]. \quad (3)$$

Целью настоящей работы является нахождение точных аналитических решений, описывающих эволюцию аэрозоля, $f_0(a)$ которого описывает гауссиан. Кроме того, вне области применимости закона Стокса отсутствует аналитическое выражение V_s через параметры частицы и газа. Известные методы расчета V_s

по таблицам [2] и из формул, определяющих зависимость лобового сопротивления частицы от числа Рейнольдса, требуют значительного числа итераций и исключают возможность построения аналитической теории процесса для аэрозоля, содержащего крупные частицы. Поэтому для построения теории эволюции перемещаемого в камере аэрозоля, содержащего фракцию грубодисперсного аэрозоля, необходимо найти аналитическую зависимость $V_s(a)$, справедливую как для мелких, так и для крупных частиц. В этой статье такая формула найдена. Наиболее простым методом зондирования аэрозоля в камере является измерение ослабления излучения аэрозолем. В данной работе найдены взаимосвязи между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля в условиях применимости (1). Обсуждены требования к методу измерения аэрозольных характеристик в аэрозольных камерах малого объема.

1. Стоксовский аэрозоль с гауссовской функцией распределения. Пусть $f_0(a)$ описывается функцией Гаусса

$$f_0(a) = B_0 \exp\left[-\frac{1}{2}(a - a_0)^2 \beta_0^{-2}\right], \quad (4)$$

где B_0 — коэффициент, полученный из условия нормировки функции распределения частиц по размерам на единицу; a_0 — радиус частиц, соответствующий максимуму функции распределения; β_0 — ширина Гауссиана.

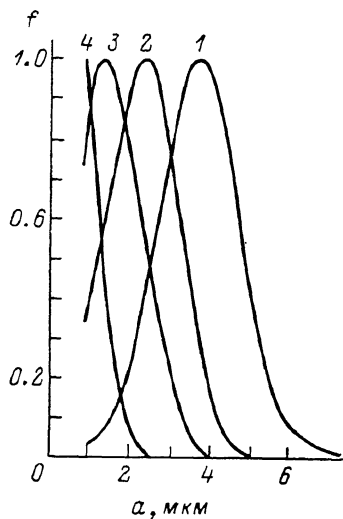


Рис. 1. Функция распределения по радиусам частиц аэрозоля в разные моменты времени эволюции.

t , мин: 1 — 0 (измерение проекций частиц под микроскопом), 2 — 5, 3 — 10, 4 — 30 (расчет по формуле (3)).

Подставляя (4) и (2) в (3), получим формулу, описывающую функцию распределения частиц по размерам рассматриваемого аэрозоля в любой момент времени t ,

$$\varphi(a, t) = n_0 B(t) \exp\left\{-\frac{1}{2}[a - a_m(t)]^2 \beta^2(t)\right\},$$

где

$$B(t) = B_0 \exp\left(\frac{Da_0^2 t}{1 + D\beta_0^2 t}\right),$$

$$a_m(t) = a_0 (1 + 2Dt\beta_0^2)^{-1},$$

$$\beta(t) = \beta_0 (1 + 2Dt\beta_0^2)^{-1/2}, \quad D = \frac{2g\gamma}{9\eta H}.$$

Таким образом, если при $t=0$ функция распределения частиц аэрозоля по размерам является гауссовой, а скорость падения определяется законом Стокса, то при любых t функция $\varphi(a, t)$ остается гауссовой. Это положение наглядно иллюстрируют результаты численного исследования характера измерения функции распределения частиц по размерам в аэрозольной камере объемом 240 л, проведенного на ЭВМ ЕС-1033 (подробнее обсуждение рис. 1 приведено в разделе 4 в связи с экспериментальной частью работы).

2. Функция распределения аэрозоля произвольного вида. Рассмотрим седиментационную эволюцию аэрозоля, для которого вид $f_0(a)$ существенно отличается от гауссова. Обозначим через $\langle V_s \rangle$ среднее значение скорости седиментации аэрозольных частиц в камере в момент времени t

$$\langle V_s \rangle = \int_0^{\infty} \varphi(a, t) V_s(a) da. \quad (5)$$

Дифференцируя (1) по времени и подставляя в полученный результат соотношение (5), получаем выражение, связывающее скорость изменения концентрации частиц со средней скоростью падения частиц в любой момент времени

$$\frac{dn}{dt} = -n(t) \frac{\langle V_s \rangle}{H}. \quad (6)$$

Любопытно, что в диапазоне закона Стокса имеется связь между средним квадратом радиуса $\langle a^2 \rangle$ аэрозольных частиц и кинетикой $n(t)$ в любой момент времени

$$\frac{dn}{dt} = -D \langle a^2 \rangle n(t), \quad (7)$$

где $D = 2g\gamma (9\eta H)^{-1}$.

Формула (7) получена подстановкой (3) в (6). Для обеспечения возможности расчета по (6) кинетики осаждения частиц в камере для аэрозоля с грубодисперсной фракцией проведены широкие расчеты V_s методом интерполирования табличных данных [2] по лобовому сопротивлению аэрозольных частиц. В результате найдена аппроксимационная формула, позволяющая определить значение радиуса a_c частицы, скорость падения которой вдвое меньше стоксовского значения

$$a_c [\text{см}] = (96.57\gamma^{0.309} [\text{г/см}^3])^{-1}. \quad (8)$$

Кроме того, обнаружено, что скорость падения частиц радиусом от десятков ангстрем до сотен микрон может быть описана с точностью не хуже 10 % аппроксимационной формулой вида

$$V_s(a) = V_{st}(a) \frac{\rho}{\pi} \operatorname{arccotg} \left(2.85 \ln \frac{a}{a_c} \right), \quad (9)$$

где $\rho = \left[1 + R \frac{l}{a} + Q \frac{l}{a} \exp \left(-b \frac{a}{l} \right) \right]^{-1}$ — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления падению частиц в молекулярном режиме и в области, переходной от молекулярного к гидродинамическому [2]; l — длина свободного пробега молекул воздуха; R , Q и b — экспериментальные коэффициенты [2].

Таким образом, найденный в настоящей работе последний сомножитель в формулу (9) обеспечивает возможность расчета V_s для частиц размером $a \leq a_c$, т. е. далеко вне области применимости закона Стокса. Соотношения (5), (6), (8) и (9) позволяют проводить численные исследования эволюции аэрозоля с произвольной функцией распределения частиц по размерам.

На практике желательно зависимость $n(t)$ записать возможно более компактно. Для этой цели были рассчитаны коэффициенты аппроксимационной зависимости $V_s(a)$ вида

$$V_s(a) = \rho V_{st}(a) \ln \left[\left(0.351 + \frac{0.188a}{a_c} [\text{см}] \right)^{-1} \right], \quad (10)$$

которая пригодна для $a \leq a_c$. Подставляя (10) и (5) в (1) для $f_0(a)$ произвольного вида, получаем выражение

$$n(t) = n_0 \int_0^{\infty} f_0(a) \left(0.351 + \frac{0.188a}{a_c} \right)^{\beta} da, \quad (11)$$

(где $\beta = \rho V_{st}(a) t H^{-1}$), которое позволяет численное исследование общего случая седиментационной эволюции аэрозоля и облегчает поиск аналитических решений для частных случаев $f_0(t)$.

3. Связь между ослаблением излучения в аэрозольной камере и концентрацией частиц аэрозоля. Зондирование аэрозоля в камере, как правило, осуществляют с помощью маломощных лазеров. В пределах применимости закона Бугера кратность ослабления света в камере равна

$$k(t) = \frac{I_0(t)}{I_L(t)} = \exp [L \langle \sigma(t) \rangle n(t)], \quad (12)$$

где L — длина пути света в камере, $I_0(t)$ и $I_l(t)$ — интенсивности света до и после камеры соответственно, $\langle \sigma(t) \rangle$ — среднее сечение ослабления излучения частицей аэрозоля в камере в момент t . Величина $\langle \sigma(t) \rangle$ определена аналогично $\langle V_s(t) \rangle$ (см. (5)).

Предположим, что для всех a , при которых $f(a) \neq 0$, сечение ослабления света $\sigma(a)$ пропорционально площади частиц, т. е. $\sigma(a) = \text{const } \pi a^2$. Тогда из (12) и (7) получаем соотношение

$$\frac{dn}{dt} = \frac{D}{L \text{ const}} \ln [k(t)],$$

связывающее кинетику изменения счетной концентрации аэрозоля с ослаблением излучения в камере. Последнее выражение позволяет восстановить скорость изменения концентрации частиц в камере по данным измерения ослабления излучения в камере.

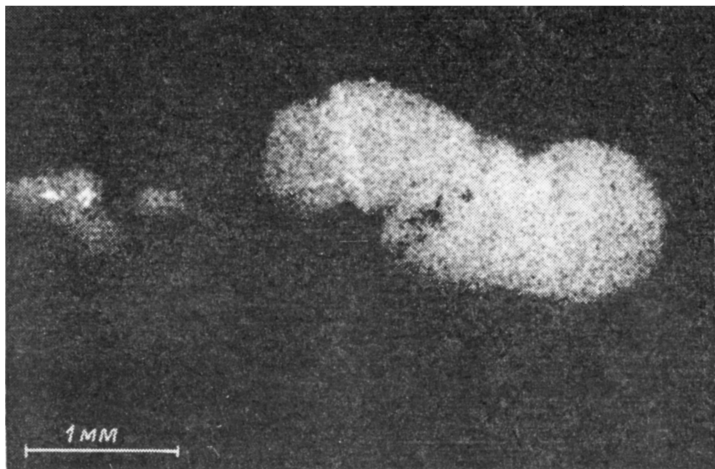


Рис. 2. Плазма оптического разряда, образованная вокруг корундовой частицы под действием излучения ТЕА CO_2 лазера.

4. Измерение концентрации частиц по вероятности появления сгустков плазмы оптического разряда. Экспериментальное исследование эволюции грубодисперсного аэрозоля проведено в камере высотой 60 см и объемом 240 л. В течение короткого времени (2—4 с) в камере распылялась навеска порошка МП-5, состоящего из частиц корунда. Кривая I на рис. 1 характеризует исходную функцию распределения частиц по радиусу. Функция распределения частиц по радиусу построена по данным измерения проекционных размеров ~ 1500 фотографий частиц. Отсутствие среди исследуемых частиц с развитой поверхностью (волокон, дисков, агрегатов и т. п.) позволило сопоставить полученные данные с результатами расчета для сферических частиц. Для измерения концентрации аэрозольных частиц использовано измерение вероятности W оптического разряда в аэрозоле в серии одинаковых импульсов одномодового излучения ТЕА CO_2 лазера [2]

$$n = \frac{9\Delta_1}{2\pi\theta^3 f^2} [(A-1)^{1/2} (A+5) - 6 \arctg (A-1)^{1/2}]^{-1} \ln [(1-W)^{-1}], \quad (13)$$

где $f=5.1$ см — фокусное расстояние линзы из NaCl , фокусирующей лазерное излучение в аэрозоле; $\theta=7.6 \cdot 10^{-3}$ рад — половина угла расходимости лазерного излучения по спаду интенсивности в e^2 раз; $A=q_f q_b^{-1}$, $q_b=40$ Дж/см² — порог оптического разряда при наличии аэрозольной частицы в лазерном луче ($\lambda=10.6$ мкм, длительность импульса 1.5 мкс); $q_f=2\pi^{-1}E(f\theta)^{-2}$ — плотность

энергии лазерного излучения в фокусе; $E=0.214 \pm 0.013$ Дж — среднее значение энергии в серии лазерных импульсов.

Плазма оптического разряда возникает в фокальном объеме при попадании частицы в область с достаточной интенсивностью излучения. На рис. 2 приведена микрофотография плазмы, возникающей в фокальной области. Объем, занимаемый плазмой, весьма невелик — порядка нескольких мм³, время ее существования очень мало ($\sim 10^{-5}$ с) по сравнению с периодом лазерных импульсов (1—2 с). Сильная конвекция, вызываемая импульсным разогревом микрообласти аэрозоля лазерным излучением, улучшает перемешивание аэрозоля в камере. При выполнении измерений $n(t)$ в аэрозольных камерах малого объема желательно избежать откачки аэрозоля из камеры. В противном случае происходит загрязнение исследуемого аэрозоля частицами, содержащимися в газе,

втекающем в аэрозольную камеру через неплотности. Кроме того, втекающий в камеру воздух, поток которого компенсирует отбор аэрозоля на измерение, нарушает однородное распределение концентрации частиц по объему. В случае применения фотоэлектрического счетчика с объемным расходом прокачиваемого аэрозоля j [см³/с], кроме условия хорошего перемешивания исследуемого аэрозоля, на объем v камеры и общую продолжительность измерения накладывается условие $v \gg jt_m$. Этим недостатком лишен способ [3], который не требует отбора аэрозоля в ходе анализа концентрации.

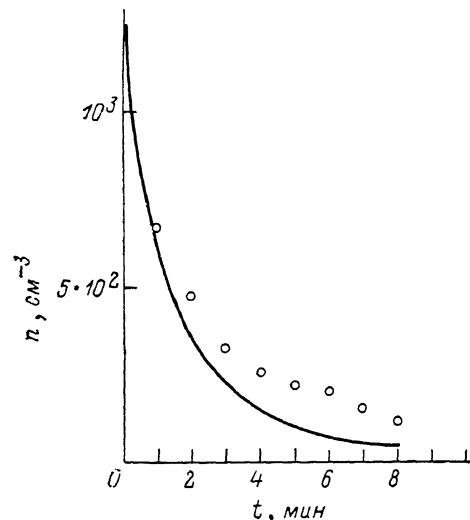


Рис. 3. Изменение во времени счетной концентрации аэрозольных частиц в камере.

1 — рассчитано по формуле (4), 2 — измерено методом [2].

На рис. 3 приведены результаты расчета изменения счетной концентрации аэрозольных частиц (кривая 1) по формуле (1) и экспериментальные значения n , полученные пересчетом данных по вероятности пробоа по (12). Хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных для счетной концентрации аэрозольных частиц является важным аргументом достоверности результатов расчетов функций распределения, представленных на рис. 1. Результаты работы доложены на заседании аэрозольной секции Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева, а также на конференции [4].

Выводы

1. Впервые найдена взаимосвязь оптических и микрофизических характеристик аэрозоля, перемешиваемого в замкнутом объеме. Показано, что в пределах применимости закона Стокса для скорости падения частиц из кинетики ослабления излучения аэрозодем можно найти кинетику счетной концентрации аэрозоля, если сечение ослабления излучения частицей аэрозоля пропорционально квадрату ее радиуса. Обнаружено, что аэрозоль с гауссовым начальным распределением частиц по размерам остается гауссовым во все последующие времена, пока скорость падения основной массы частиц описывается стоксовской формулой. Найдены точные соотношения, описывающие зависимость от времени параметров гауссовой функции распределения частиц аэрозоля по размерам.

2. Построены аппроксимационные зависимости скорости падения частиц в газе, справедливые для частиц радиусом от десятков ангстрем до сотен микрон.

3. Найдена взаимосвязь между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля, перемешиваемого в камере, позволяющая восстановить

скорость выпадения частиц на дно камеры из данных измерения ослабления излучения в камере. Найдены соотношения между средними характеристиками частиц (средняя площадь сечения частиц, средняя скорость падения) с концентрацией частиц в камере в произвольный момент времени.

4. Обоснована целесообразность использования для измерения концентрации аэрозольных частиц в камере способа, основанного на регистрации вероятности оптического разряда в камере под действием фокусированного излучения ТЕА CO_2 лазера. Результаты экспериментального измерения этим методом кинетики изменения концентрации частиц в камере удовлетворительно согласуются с результатами расчета.

Список литературы

- [1] Вилочкин Г. М., Козлов В. С., Ошлаков В. Г. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1983. С. 269—273.
- [2] Фукс Н. А. Механика аэрозоля. М., 1955. 351 с.
- [3] Белов Н. Н., Мотягин В. А., Негин А. Е. Способ измерения концентрации твердых аэрозольных частиц. А. С. 705849. БИ. 1985. № 23.
- [4] Белов Н. Н. // Тез. докл. V Всесоюз. конф. «Аэрозоли и их применение в народном хозяйстве». М., 1987. С. 77.

Научно-исследовательский
физико-химический институт
им. И. Я. Карпова
Москва

Поступила в Редакцию
6 апреля 1988 г.
В окончательной редакции
26 июля 1990 г.