

МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА ЧАСТИЦ КАПЛЕЙ ПРИ ЕЁ ДВИЖЕНИИ В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗЕ

Т.Аманбаев, А.Джумагалиева, Г.Тилеуов
ЮКГУ им. М.Ауезова, г. Шымкент

Рассмотрим случай, когда крупная капля с диаметром d_d движется с некоторой постоянной скоростью \vec{v}_d в неподвижном аэрозоле, содержащем частицы диаметром d_p . При этом будем считать, что объемная концентрация частиц достаточно мала (каждая частица движется независимо от другой); капля движется с постоянной скоростью, сохраняя при этом свою сферическую форму; диаметр частиц намного меньше диаметра капли. В системе координат, связанной с каплей, рассматриваемая ситуация эквивалентна задаче обтекания неподвижной капли потоком аэрозоля, имеющим на бесконечности скорость $\vec{v}_\infty = -\vec{v}_d$. Уравнения движения частицы (с учетом поправки Каннингема-Милликена C_c) можно записать в виде:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = -\frac{C_p}{C_c} \frac{\pi d^2}{8} \rho_g^0 |\vec{v}_p - \vec{v}_g| (\vec{v}_p - \vec{v}_g), \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}_p, \quad (1)$$

где $m_p, \vec{r}, \vec{v}_p, C_p$ - масса, радиус-вектор, скорость и коэффициент сопротивления частицы; \vec{v}_g - скорость газа.

Введем следующие безразмерные величины:

$$\vec{R} = \vec{r} / (d_d / 2), \quad \vec{V}_g = \vec{v}_g / v_d, \quad \vec{V}_p = \vec{v}_p / v_d, \quad \tau = t / t_0, \quad t_0 = (d_d / 2) / v_d \quad (2)$$

Тогда уравнения (1) в безразмерных переменных (2) примут вид:

$$\frac{48}{C_p} \frac{Stk}{Re_p} \frac{d^2 \vec{R}}{d\tau^2} + \frac{d\vec{R}}{d\tau} = \vec{V}_g, \quad \frac{d\vec{R}}{d\tau} = \vec{V}_p \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления частицы зависит от числа Рейнольдса частицы [1]:

$$C_p = 24 / Re_p + 4,4 / Re_p^{0,5} + 0,42; \quad Re_p = Re_{p\infty} |\vec{v}_p - \vec{v}_g|, \quad Re_{p\infty} = \rho_g d_p v_\infty / \mu \quad (4)$$

Из уравнения (3) видно, что в случае выполнения закона Стокса (когда $C_p = 24 / Re_p$) единственным параметром подобия движения частицы является число Стокса Stk . Если движение частицы не подчиняется закону Стокса, то в число параметров подобия войдет также характерное число Рейнольдса частицы $Re_{p\infty}$. Система уравнений (3) с замыкающим соотношением (4) и начальным условием

$$\tau = 0: \quad \vec{R} = \vec{R}_0, \quad \vec{V}_p = \vec{V}_{p0}$$

представляет собой задачу о движении частицы в потоке газа с полем скорости \vec{V}_g .

Процесс осаждения мелких частиц на крупные капли зависит от характера обтекания капли запыленным потоком. В уравнениях движения частицы это обстоятельство проявляется через поле вектора скорости газа \vec{V}_g . При малых значениях числа Рейнольдса капли реализуется вязкое обтекание. В этом случае в сферической системе координат для компонентов скорости газа имеем [2]:

$$V_{gr} = \left(1 - \frac{3}{2R} + \frac{1}{2R^3}\right) \cos \theta, \quad V_{g\theta} = -\left(1 - \frac{3}{4R} - \frac{1}{4R^3}\right) \sin \theta$$

По мере увеличения скорости газа (числа Рейнольдса капли) режим течения приближается к потенциальному режиму, при котором распределение скоростей запишется в виде [2]:

$$V_{gr} = \left(1 - \frac{1}{R^3}\right) \cos \theta, \quad V_{g\theta} = -\left(1 + \frac{1}{2R^3}\right) \sin \theta$$

Отметим, что в отличие от вязкого обтекания, когда скорость газа на поверхности сферы равна нулю, в случае потенциального обтекания она не равна нулю.

Система (3) является системой нелинейных уравнений, и решить ее аналитически не удается. Однако ее можно решить численными методами. При этом допустимые значения чисел Стокса Stk и Рейнольдса частицы $Re_{p\infty}$ контролировались при помощи очевидной связи между ними:

$$Stk = \frac{C_c \rho_p Re_{p\infty}^2}{18 \rho_g Re_{d\infty}}$$

Анализ показал, что вязкий режим обтекания капли имеет место только в очень узкой области значений ($Re_{p\infty}, Stk$). В связи с этим расчеты траектории движения частицы проводились для потенциального режима обтекания капли запыленным газом. Расчеты показали, что при $Stk \geq 10$ частицы двигаются почти по прямолинейной траектории, а увеличение числа $Re_{p\infty}$ от 1 до 10 практически не влияет на движение частиц.

Важно иметь данные о нормальной к поверхности капли составляющей скорости частицы. Зная распределение нормальной составляющей скорости частиц по поверхности шара, можно вычислить поток частиц через ее поверхность за единицу времени, т.е. интенсивность выпадения частиц на каплю:

$$j = n \int_S v_{pn} d\sigma = n \int_0^\pi v_{pn} 2\pi a^2 \sin \theta d\theta, \quad a = d_d / 2; \quad J = \frac{j}{n\pi a^2 v_\infty} = 2 \int_0^\pi v_{pn} \sin \theta d\theta \quad (5)$$

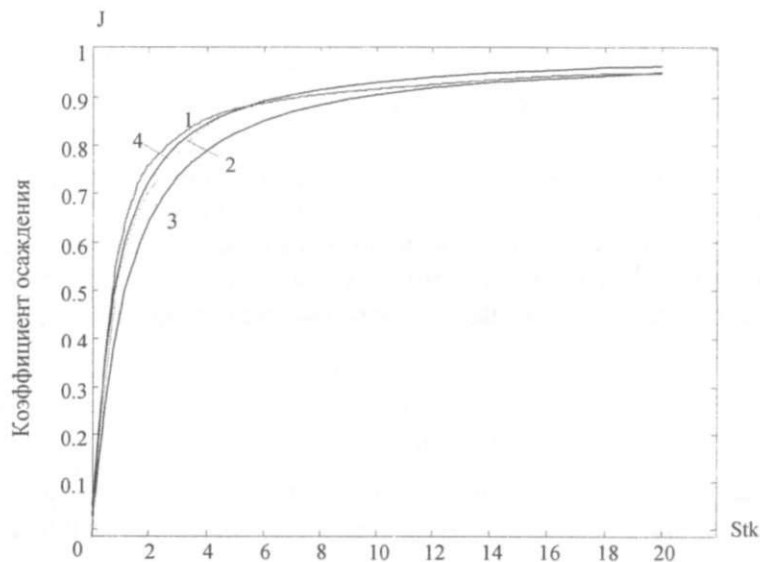
Величина J определяет долю частиц, выпавших на поверхность капли из всех частиц, находящихся в цилиндре с основанием πa^2 (площадь миделева сечения капли) и высотой v_∞ , т.е. коэффициент осаждения пыли на каплю. Она отличается от коэффициента η , устанавливаемого в [3] более точным определением, поскольку для ее вычисления используется эффективность осаждения частиц на каждую элементарную площадку поверхности капли. Анализ результатов расчетов показал, что критерий $Re_{p\infty}$ слабо влияет на поведение зависимости $J(Stk)$. Сравнение с известными зависимостями Ленгмюра-Блоджетта [3] и Швыдкого [4] для коэффициента η при потенциальном обтекании шара показало, что зависимость [4] хорошо аппроксимирует численные данные, полученные по формуле (5), тогда как зависимость Ленгмюра-Блоджетта дает заниженные значения (рисунок 1).

Следует отметить, что для погружения в жидкость частице необходимо преодолеть силу поверхностного натяжения. При этом существует минимальная скорость, с которой частица должна удариться о поверхность капли, чтобы утонуть в ней. Эту скорость можно найти, приравняв работу полного погружения частицы к ее кинетической энергии. Таким образом, для минимального значения нормальной скорости частицы имеем:

$$v_{\min} = \sqrt{24\sigma / \rho_p d_p},$$

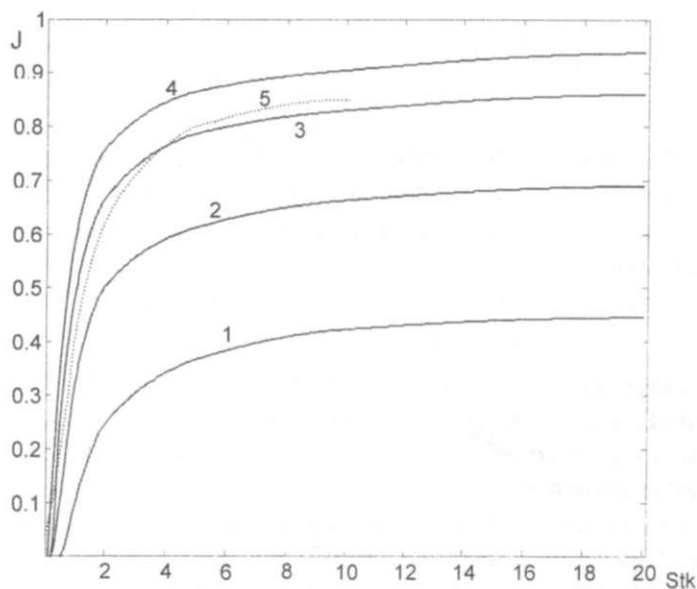
где σ – коэффициент поверхностного натяжения капли.

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента осаждения пыли на каплю, вычисленного по формуле (5), от числа Стокса при разных значениях минимальной скорости частиц $V_{min}=v_{min}/v_{\infty}$. Видно, что с уменьшением минимальной скорости частиц коэффициент осаждения растет. Причем удовлетворительное согласие с экспериментальными данными [4] получается при $V_{min}=0,3$.



1 - $Re_{p\infty} = 1$; 2 - $Re_{p\infty} = 10$; 3 – зависимость Ленгмюра-Блоджетта;
4 – зависимость Швыдкого

Рисунок 1 - Зависимость коэффициента осаждения от числа Стокса



1 - $V_{min}=0.7$; 2 - $V_{min}=0.5$; 3 - $V_{min}=0.3$; 4 - $V_{min}=0.1$; 5 – экспериментальные данные

Рисунок 2 - Коэффициент осаждения пыли на каплю при различных значениях V_{min}

Литература

- 1 Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т.1.-М.: Наука, 1987.- 456с.
- 2 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.- М.: Наука, 1987.- 840 с.
- 3 Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. -М.: Химия, 1972.-248 с.
- 4 Швыдкий В.С. Очистка газов. -М.: ООО «Теплоэнергетик», 2002.- 640 с.

Қорытынды

Тамшының тозаңданған газда қозғалу барысында бөлшектердің траекториясы мен олардың тамшыға қону коэффициенті зерттелген. Тамшының бетіне қонатын бөлшектің нормалдық жылдамдығы арқылы қону коэффициенті табылған. Оның мәндері белгілі және эксперименталдық мәндермен, формулалармен салыстырылған.

Summary

The trajectories and precipitations coefficient of small particles when the drop streamlined by aerosol was calculated. By means of normal a surface of a drop of speed of partiles we shaal find factor of sedimentation. Its value are compared to mrown formulas and experimental data.