

ЭФФЕКТ ПОПЕРЕЧНОЙ МИГРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ЛАМИНАРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ

Скапцов А.С., Пусовская Т.И.

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
г. Могилев, Беларусь

Первые работы по исследованию поперечной миграции частиц в сдвиговых потоках были связаны с изучением движения крови в каналах. По результатам многочисленных экспериментов в 1836 году Пуазейлем была опубликована работа, в которой впервые было показано, что вблизи стенок каналов формируется область, свободная от частиц. В последующих исследованиях обращено внимание на неоднородное распределение частиц крови в сосудах. В работе [1] экспериментально исследовалось движение частиц «нейтральной плавучести» (плотность вещества частиц совпадает с плотностью несущей фазы) в течении Пуазейля в трубе при низких значениях чисел Рейнольдса основного течения. Опытным путем установлено, что частицы в таком течении собираются в равновесном положении на расстоянии $0,6$ радиуса трубы от оси симметрии. Этот эффект получил название Пинч-эффекта, сущность которого заключается в том, что частицы суспензии медленно мигрируют поперек основного потока и ниже по течению собираются в узкое кольцо, коаксиальное трубе.

Позднее аналогичный эффект был обнаружен при движении аэрозолей в каналах. В сдвиговых потоках у стенки аэрозольные частицы могут оседать на начальном участке течения, а также накапливаться на определенном расстоянии от стенки. Если влияние инерционных и гравитационных сил на характер движения частиц достаточно исследовано, то вопрос о вкладе подъемной силы, действующей на частицу в сдвиговом потоке, требует дополнительного изучения.

Выражение для расчета подъемной силы, обеспечивающей смещение частиц поперек линий тока, впервые представлено в работе [2]. Автором [2] отмечается, что эффект поперечной миграции частиц зависит от характера течения, размера и формы частиц, плотностей частиц и среды. В дальнейшем появились работы, посвященные изучению действия подъемной силы на аэрозольные частицы, в частности, применительно к изокинетическому отбору пробы аэрозолей [3]. В работе [4] экспериментально подтверждено влияние подъемной силы на осаждение частиц в пограничном слое в вертикальном канале с восходящим потоком. Эффект миграции частиц приводит к осаждению частиц на стенках и искажению информации при отборе аэрозольных проб. В настоящей работе выполнены оценки осаждения аэрозольных частиц в результате действия подъемной силы, используя безразмерный параметр Pl .

Рассмотрим движение аэрозольных частиц в вертикально ориентированном цилиндрическом канале. Предположим, что течение внутри трубки является ламинарным, полностью развитым, обладает осевой симметрией, а профиль скорости описывается формулой Пуазейля. Система координат и поле течения газа внутри канала представлены на рисунке, где использованы следующие обозначения: V_r и V_z – проекции скорости частицы поперек и вдоль канала; U_z – продольная составляющая скорости газового потока, r_o и r_e – начальная и конечная безразмерные координаты частицы, δ_d – смещение частицы в канале с линии тока.

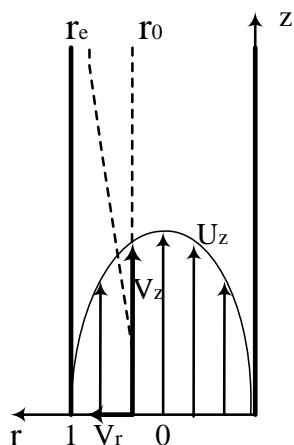


Рисунок -1 Движение частиц в цилиндрическом канале с течением Пуазейля

Безразмерная форма уравнения движения аэрозольной частицы в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{1}{Stk}(U_z - V_z), \quad (1)$$

$$\frac{dV_r}{dt} = -\left(\frac{1}{Stk}V_r + \frac{\sqrt{r}}{Pl}(U_z - V_z)\right), \quad (2)$$

где Stk – число Стокса, Pl – параметр, определяющий смещение частицы поперек линий тока. Система уравнений (1-2) является нелинейной из-за рассматриваемого профиля скорости газового потока. Поэтому ее решение уравнение проще искать либо

приближенным, либо численным методами. Приближенное аналитическое решение может быть получено путем линеаризации профиля скорости в окрестности стенки. В пространстве вблизи поверхности стенки линейным приближением скорости является: $U_z = 4(1-r)$; $U_r = 0$. Для линейного профиля скорости уравнение движения (2) принимает вид:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\left[\frac{1}{Stk} \frac{dr}{dt} + \frac{1}{Pl}\left(4(1-r) - \frac{dz}{dt}\right)\right]. \quad (3)$$

Решая (3), можно получить выражение для величины максимального смещения частицы с линий тока. Анализ этого выражения показывает, что все частицы, имеющие начальное положение $(r_0, 0)$ при условии, что $(1-r_0) \leq \delta_a$, будут осаждаться на стенках. Если положение частиц на входе в канал удовлетворяет условию $(1-r_0) > \delta_a$, то частицы не соударяются со стенкой и достигают равновесного положения $(r_0 + \delta_d)$. Это условие является своеобразным ограничением, устанавливающим длину трубы, при которой частицы достигают равновесного положения.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по осаждению монодисперсного аэрозоля в вертикально ориентированной цилиндрической трубке при изокINETическом отборе проб [4] свидетельствует об удовлетворительном согласии теории с экспериментом.

Выполнена оценка подъемной силы и силы сопротивления, действующих на аэрозольные частицы в потоке. Показано, что в известных экспериментальных работах подъемная сила составляет не более 10% от силы сопротивления.

Список использованных источников

1. Segre, G. Behaviour of microscopic rigid spheres in Poiseuille flow / G. Segre, A. Silberberg // J. Fluid Mech. – 1962. - Vol. 14. - P. 136-157.
2. Saffman, P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow / P. G. Saffman // J. Fluid Mech. – 1965. - Vol. 22. - P. 385-400.
3. Fan, B. J. Aerosol particle loss in isokinetic sampling probe inlets / B. J. Fan, A. R. McFarland, N. K. Anand // Env. Sci. Technol. – 1992. - Vol. 26, No. 4. - P. 390-395.
4. Lipatov, G. N. Properties of crosswise migration of particles in ducts and inner aerosol deposition / G. N. Lipatov, S. A. Grinshpun, T. I. Semenyuk // J. Aerosol Sci. – 1989. - Vol. 20, No. 8. - P. 935-938.