

УДК 532.517.

**К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ЧАСТИЦ
ПОЛИДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ**

М.З.Ескенди́ров, Т.М.Сманов, Б.А.Ки́икбаев
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

Характер течения газового потока является одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность осаждения частиц аэрозоля в турбулентных потоках, в которых случайные хаотические пульсации среды вызывают аналогичные пульсации у взвешенных частиц, но с тем или иным запаздыванием, зависящим от их инерционности. Такой характер взаимодействия частиц с турбулентными пульсациями можно оценить при помощи

индекса инерционности $\omega\tau_v [1]$, где ω - частота пульсаций среды; τ_v - время релаксации частицы.

Исходя из закона «двух - третей» Колмогорова – Обухова, пульсационная скорость потока определяется из соотношения:

$$\bar{U} = B_k \mathcal{E}^{1/3} \ell^{1/3}, \quad (1)$$

где B_k - коэффициент; $\mathcal{E}$ - энергия диссипации; ℓ - масштаб пульсаций.

Уравнение (1) справедливо в диапазоне масштабов вихрей $\ell_0 \ll \ell \ll L$, где ℓ_0 - масштаб микровихрей, в которых энергия рассеивается за счет вязкости среды [2]:

$$\ell_0 = (\nu^3 / \mathcal{E})^{1/4}, \quad (2)$$

где ν - кинематическая вязкость среды.

В интенсивных режимах течения газового потока доминирующая роль турбулентной диффузии в перемещении аэрозольных частиц ($\rho_v \approx 1000 \text{ кг/м}^3$) однозначна и она на несколько порядков может превосходить молекулярную диффузию. Отмеченное, иными словами, указывает, что интенсивная турбулентность газового потока обеспечивает постоянство концентрации частиц у поверхности осаждения ($\omega\tau_v < 1$), т.е. в области масштабов пульсаций $\ell > \ell_0$. При этом в пульсационное движение вовлекаются, главным образом, частицы, индекс инерционности которых меньше единицы, то есть высокодисперсная и тонкодисперсная фракции полидисперсного аэрозоля. Грубодисперсные же частицы в силу своей большой инерционности ($\omega\tau_v > 1$) мигрируют за счет инерционных сил аэродинамического сопротивления.

В непосредственной близости к поверхности осаждения, а именно, в пограничном слое, характер перемещения аэрозольных частиц претерпевает значительные изменения и имеет сложный вид.

Турбулентные пульсации в пограничном слое интенсивно затухают и масштаб их становится меньше внутреннего масштаба турбулентности, т.е. $\ell < \ell_0$, но в то же время происходит увеличение частоты пульсаций $\omega_{n.c.}$, вследствие чего изменяется индекс инерционности частиц. Частицы, внедрившиеся в пограничный слой и для которых длина прямолинейного инерционного пробега пропорциональна $\ell > \ell_0$, не увлекаются пульсациями $\ell < \ell_0$. Следовательно, эти частицы должны без каких-либо видимых изменений в движении пройти сквозь пограничный слой и достигнуть поверхности осаждения.

Аэрозольные же частицы, длина прямолинейного инерционного пробега которых меньше ℓ_0 , с тем или иным запаздыванием будут увлекаться пульсациями с масштабом $\ell < \ell_0$. При этом, вследствие интенсивного затухания пульсаций в пограничном слое, а именно, в его турбулентной зоне [4], будет иметь место появление значительного градиента пульсационных скоростей, направленного по нормали к поверхности осаждения. Это вызовет диффузию частиц в том же направлении, которая обеспечит постоянство концентрации на границе турбулентной зоны и вязкого подслоя, т.е. в буферной зоне, где пульсации затухают окончательно. Причем, частицы с длиной инерционного пробега $\ell > \ell_i$ - длины свободного молекулярного пробега за счет приобретенной инерции не будут вовлекаться в Броуновское движение, которое имеет приоритет в вязком подслое, а пройдут через него и достигнут поверхности осаждения.

Для всех частиц, индекс инерционности которых приближается к нулю, основное диффузионное сопротивление будет лежать в области вязкого подслоя, где они достигнут поверхности осаждения только за счет Броуновской диффузии.

Величина эффективного коэффициента диффузии частиц определяется следующим образом:

$$D_{эф} = D_m + D_{mz} + D_m, \quad (3)$$

Здесь D_m, D_{mz}, D_m - соответственно коэффициенты турбулентной диффузии в потоке и в турбулентной зоне пограничного слоя, коэффициент молекулярной диффузии в вязком подслое пограничного слоя.

Коэффициент молекулярной диффузии определяется по формуле [1,5]:

$$D_m = K \frac{k_B T}{3\pi \nu_c d_c}, \quad (4)$$

где K - коэффициент; k_B - константа Больцмана; d_c - диаметр частицы.

Значение коэффициента турбулентной диффузии можно определить из соотношения [1,3]:

$$D_m = \mu^2 D_c \quad (5)$$

где D_c - коэффициент турбулентной диффузии среды; μ - степень увлечения аэрозольных частиц турбулентными пульсациями, которую определяют по формуле [3]:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega \tau_c}}. \quad (6)$$

Для основного потока частота ω пропорциональна характерной пульсационной скорости

$$\omega = kU', \quad (7)$$

Здесь $k = 2\pi/\ell$ - волновое число.

Произведение соответствующей частоты пульсаций на квадрат размера пульсаций дает нам соответствующий коэффициент турбулентной диффузии среды

$$D_c = \omega \ell^2. \quad (8)$$

Тогда, с учетом уравнений (2) и (7), получим:

$$D_c = B_m \mathcal{E}^{1/3} \ell^{4/3}, \quad (9)$$

в котором $B_m = 2\pi B_{о.к.}$, а $B_{к.о.}$ - опытный коэффициент.

Скорость диссипации турбулентной энергии $\mathcal{E}$ пропорциональна отношению мощности вихря, характерного для данного течения, к массе вихря

$$\mathcal{E} = \frac{N_v}{m_v}, \quad (10)$$

где $m_v = V_v \rho_v$, а мощность вихря определяется следующим образом:

$$N_v = \psi_m S \frac{\rho_v U_v^3}{2}, \quad (11)$$

в котором ψ_m - коэффициент сопротивления тела, генерирующего турбулентность, S - площадь характерного сечения тела.

Принимая во внимание, что размер крупномасштабных пульсаций пропорционален наибольшему диаметру вихря, характерному для данного потока, т.е. $\ell \sim d_v$, зависимость (5) с учетом уравнений (9-11) преобразуется к виду:

$$D_m = 0,86 B_m \psi_m^2 d_v U_v. \quad (12)$$

Для определения коэффициента турбулентной диффузии в турбулентной зоне диффузионного пограничного слоя уравнение (8) переписывается следующим образом:

$$D_{m.z.} = \Gamma(U') \ell_0^2, \quad (13)$$

в котором $\Gamma(U')$ – градиент пульсационной скорости, характерной для данного турбулентного потока.

Характер движения аэрозольных частиц у элементов поверхности осаждения (капли, пленки, струн, волокна фильтра и т.п.), определяемый градиентом пульсационной скорости у той же поверхности, будет практически идентичен их движению у плоской стенки. Такое допущение вполне обосновано, так как масштаб градиента скорости будет пропорционален размеру микровихрей, которые в несколько десятков раз меньше размера структурных элементов поверхности осаждения. Тогда, согласно [4], для градиента пульсационной скорости запишем:

$$\Gamma(U') = \frac{(\overline{U'})^2}{\nu_z}, \quad (1)$$

Теперь, решая зависимость (13) совместно с уравнениями (2,10,11,14), получим формулу для определения коэффициента турбулентной диффузии в турбулентной зоне диффузионного пограничного слоя:

$$D_{m.z.} = 0,74 \psi^2 \frac{d_a^2 U_z^2}{\nu_z}. \quad (1)$$

Толщина турбулентной зоны диффузионного слоя будет пропорциональна масштабу микровихрей данного потока, то есть $\delta_{m.z.} \sim \ell_0$, тогда определяя $\delta_{m.z.}$ по формуле (1) уравнение (2) перепишется следующим образом:

$$\delta_{m.z.} = 1,2 \left(\frac{d_a}{\psi_m} \right)^{1/4} \left(\frac{\nu_z}{U_z} \right)^{1/4}. \quad (1)$$

Таким образом, исходя из принципа каскадного переноса энергии в турбулентных потоках, формализована задача о доминирующем влиянии соответствующего спектра флуктуаций несущей среды на характер и интенсивность миграции частиц полидисперсного аэрозоля.

Полученный комплекс уравнений для расчета эффективного коэффициента диффузии полидисперсного аэрозоля может быть использован как при определении фракционной так и общей степени осаждения аэрозоля.

Сопоставление экспериментальных данных [6] с расчетными показывает хорошую сходимость ($\leq 12\%$) в широком диапазоне изменения конструктивных, режимных и физико-химических параметров.

Литература

- 1 Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 352с.
- 2 Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. - М.: Физматгиз, 1959. - 700с.
- 3 Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. - М.: Наука, 1980. - 176с.
- 4 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя /Пер. с немец. под ред. Л.Г.Лойцянского. - М.: Физмат, 1969. - 744с.
- 5 Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. - М.: Химия, 1975. - 216с.
- 6 Ескендеров М.З., Горбунов В.А., Рустемов К.М. Исследование работы инерционно-турбулентного туманоуловителя в опытно-промышленных условиях // Современные машины и аппараты химических производств: Сб. тр. IV Всес. научн. конф. - Чимкент, 1988, ч.3. - С.98 - 99.

Қорытынды

Турбуленттік ағындағы энергиясының сатылы берілу тұрғысынан, аэрозольдің тиісті фракциясы қозғалысының сипаты мен қарқындылығына алып жүруші ортаның флукуациялану спектрына бәсебі кезіндегі полидисперсті аэрозольдің диффузиялануының тиімділік коэффициентін есептеуге налған тендендеу ұсынылды.