

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ПОТОКА С ДОЖДЕВЫМИ ОСАДКАМИ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Б.Н.Корганбаев
ЮКГУ им.М.Ауезова, г.Шымкент

Атмосфера является основным источником загрязнения окружающей природной среды. В атмосферный воздух поступают выбросы от промышленных предприятий, объектов энергетики, агропромышленного комплекса, транспорта и т.д. Определенную часть загрязняющих веществ составляют аэрозоли, имеющие различное происхождение.

Среди них наибольшую опасность для здоровья людей представляет пыль, поднимаемая транспортом с автомобильных дорог. Подвергаясь многократному измельчению движущимся транспортом, такая пыль за счет процесса механоактивации имеет значительную поверхность межфазного контакта и адсорбирует в себе газообразные примеси из окружающей среды. В результате этого агрессивность такой пыли значительно увеличивается. В период дождевых осадков концентрация аэрозолей, находящихся в воздушном потоке, снижается и экологическая обстановка улучшается.

Рассмотрим взаимодействие аэрозольного потока с дождевыми осадками.

Структура дождевого потока на селитебных территориях отличается разнообразием структурных составляющих, долей их вклада в процесс осаждения аэрозолей.

Современные методы моделирования процессов улавливания аэрозолей и пыли базируются на определении суммарной эффективности улавливания частиц под воздействием различных механизмов осаждения, основными из которых являются инерционный и диффузионный. В такой постановке для определения суммарной эффективности наиболее приемлемо уравнение:

$$\eta_{\text{общ}} = 1 - (1 - \eta_{\text{stk}})(1 - \eta_D), \quad (1)$$

где η_{stk} , η_D – эффективность улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения, соответственно.

Рассмотрим механизмы улавливания частиц за счет инерционного и диффузионного осаждения.

Модель инерционного осаждения

Как известно, основными факторами, влияющими на процесс инерционного осаждения, являются размер и плотность частиц, скорость их движения относительно поверхности осаждения и т.д. В общем случае, эффективность инерционного механизма осаждения связывают с коэффициентом захвата K_z [1].

Рассмотрим зону ячейки объемом $t_p t_g h$. Количество газа, проходящего через ячейку, равно:

$$V_r = G_r \cdot h \cdot t_p \quad (2)$$

Количество жидкости в виде дождевых капель, находящейся в той же ячейке, составит:

$$V_{\text{жс}} = u_{\text{жс}} \cdot V'_{\text{жс}} \cdot t_p \cdot h \quad (3)$$

где $u_{\text{жс}}$ – скорость движения дождевых капель, м/с; $V'_{\text{жс}}$ – количество жидкости в виде капель, находящихся в ветровом потоке, м³/м³.

Тогда при прохождении ветрового потока с начальной концентрацией (c_n) через ячейку общее количество пыли, осевшей на каплях, составит:

$$m_4 = c_n \cdot K_z \cdot S_k \cdot G_{\text{отп}} \cdot n_k \cdot S \cdot dt_g \quad (4)$$

где m_q – масса осевшей пыли, кг/с; K_z – коэффициент захвата; c_n – концентрация пыли на входе в ячейку, кг/м³; S_k – миделево сечение капли, м²; $\mathcal{G}_{отн} = |u_q + u_k|$ – скорость осаждения частиц на капли, м/с; n_k – количество капель в ячейке, $n_k = V'_{жс} / V_k$, шт/м³; $V_k = \frac{\pi d_k^3}{6}$ – объем капли, м³; S – площадь сечения ячейки, м²; dt_s – длина пути движения потока воздуха, м.

Исходя из материального баланса по газовой фазе, можно записать:

$$V_r \cdot c_n - V_r (c_n - dc_n) - c_n \cdot K_z \cdot S_k \cdot \mathcal{G}_{отн} \cdot n_k \cdot S \cdot dt_s = 0 \quad (5)$$

Подставляя значения величин S_k , n_k , V_k и $V'_{жс}$ в уравнение (5) и проводя преобразования, получим:

$$\frac{dc_n}{c} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{u_D \cdot K_z \cdot \mathcal{G}_{отн} \cdot dt_s}{u_k \cdot d_k} \quad (6)$$

где u_D – интенсивность дождя, м³/м³.

После интегрирования уравнения (6) имеем:

$$c_k = c_n \cdot \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \frac{u_D \cdot K_z \cdot \mathcal{G}_{отн} \cdot dt_s}{u_k \cdot d_k}\right) \quad (7)$$

В общем виде эффективность улавливания частиц за счет сил инерции может быть определена по уравнению:

$$\eta_{Stk} = \frac{c_n - c_k}{c_n} \quad (8)$$

или с учетом уравнения (7):

$$\eta_{Stk} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \frac{u_D \cdot K_z \cdot \mathcal{G}_{отн} \cdot dt_s}{u_k \cdot d_k}\right) \quad (9)$$

Входящий в уравнение (9) коэффициент захвата K_z зависит от многих гидродинамических параметров. Согласно [1], процесс взаимодействия частиц аэрозоля с каплями и пленками жидкости происходит в три стадии: сначала частица подходит к поверхности капли (пленки), затем в зависимости от величины физико-химических сил наблюдается адгезионный захват либо упругое отталкивание. В случае отталкивания частица вновь возвращается в воздушный поток. Если произошел захват, то в результате смачивания частицы имеет место третья стадия – внедрение в слой жидкости.

Для расчета величины K_z примем уравнение, полученное в работе [1]:

$$K_z = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,25)^2} \left(e^{-5,1 \cdot 10^{-4} \frac{d_k}{d_k}} - e^{-4,5 \frac{\ell_k}{d_k}} \right) \quad (10)$$

где $Stk = \frac{\rho_q \cdot d_q^2 \cdot u_q}{18\mu_r \cdot d_k}$ – критерий Стокса; ρ_q – плотность материала частиц, кг/м³; u_q – скорость

движения частиц, м/с; μ_r – динамическая вязкость газа, Па·с; $\ell_k = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_r - \rho_{жс})}}$; σ – поверхностное натяжение, Н/м.

Диффузионная модель

Известно [2, 3], что улавливание частиц размером менее 0,1 мкм происходит вследствие молекулярной диффузии.

При движении воздушного потока через систему сооружений реализуется турбулентный режим, характеризующийся вихреобразованием. Твердые частицы аэрозолей имеют размер значительно меньше масштаба турбулентных пульсаций и поэтому вовлекаются в пульсационное движение воздушного потока. Причем, степень увлечения зависит также от диаметра и

плотности частиц, т.е. от его инерционности [1]. Следовательно, при расчете эффективности осаждения в условиях вихревого движения воздушного потока необходимо учитывать, наряду с инерционным механизмом осаждения и молекулярной диффузией, также турбулентную диффузию, которая вносит существенный вклад в эффективность улавливания частиц размером 1-2 мкм.

Рассмотрим диффузию частиц аэрозоля к поверхности осаждения, которая представлена пленками, струями и каплями жидкости.

Согласно [4], уравнение, описывающее перенос массы за счет молекулярной и турбулентной диффузии, имеет вид:

$$\frac{dm}{d\tau} = D_3 \cdot A \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x}, \quad (11)$$

где m – количество уловленной аэрозоли, кг; τ – время, с; D_3 – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; Δz – разность концентраций (движущая сила процесса), кг/м³; Δx – размер ячейки, в которой происходит осаждение, м; A – поверхность контакта фаз, м².

Эффективный коэффициент диффузии определяется по уравнению:

$$D_3 = D_M + D_T, \quad (12)$$

в котором D_M , D_T – соответственно, коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, м²/с.

Коэффициент молекулярной диффузии для частиц размером $d_q > \ell_i$ равен [5]:

$$D_M = \frac{K_\sigma \cdot T \cdot C_{KM}}{3\pi \cdot \nu_\Gamma \cdot d_q}, \quad (13)$$

где K_σ – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К; C_{KM} – поправка Кенингема-Меликена:

$$C_{KM} = 1 + \frac{10^{-4}}{p \cdot d_q} \cdot [6,32 + 2,01 \exp(-1095 \cdot p \cdot d_q)] \quad (14)$$

Здесь p – давление среды, Па.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц является функцией пульсационной скорости потока $\bar{u}'$ и его определяющего размера ℓ и не зависит от физических свойств потока [2]:

$$D_T \approx 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \ell, \quad (15)$$

где $\ell = \frac{\zeta_q \cdot d_q^2 \cdot u_q}{18\mu_\Gamma}$ – длина инерционного пробега частицы, м.

Количественное значение ℓ зависит от величины инерционной силы, которая воздействует на твердую частицу в момент ее выброса из турбулентного потока. Следовательно:

$$D_T = 0,7 \cdot \bar{u}' \cdot \frac{\zeta_q \cdot d_q^2 \cdot u_q}{18\mu_\Gamma} \quad (16)$$

При обтекании системы строений реализуется турбулентный режим течения и выброс пыли из турбулентного ядра осуществляется только за счет сил инерции. В воздушном потоке преобладает вихревая структура слоя и мощность потока определяется мощностью образующихся вихрей:

$$N_v = C_D \cdot A \cdot \zeta_\Gamma \frac{g_\Gamma^3}{2} \quad (17)$$

Среднюю пульсационную скорость можно выразить согласно закону «двух третей» [4, 6] следующим образом:

$$\bar{u}' = \mathfrak{D}^{1/3} \cdot \ell_n^{1/3} = \mathfrak{D}^{1/3} \cdot d_n^{1/3}, \quad (18)$$

где ℓ_n – масштаб пульсаций, соизмеримый с диаметром капли, т.е. $\ell_n = d_k$.

Диссипацию энергии в массе жидкости определим как:

$$\Theta = \frac{N_\theta}{V_{жс} \cdot \zeta_{жс}}, \quad (19)$$

где $V_{жс}$ – объем жидкости (m^3), определяемый по формуле:

$$V_{жс} = A \cdot h_{жс} \quad (20)$$

Здесь A – поверхность (m^2) и $h_{жс}$ – толщина слоя жидкости, находящейся в ячейке (количество выпавших осадков) (m). Тогда уравнение для расчета пульсационной скорости примет вид:

$$\bar{u}' = \left(\frac{C_D}{2} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\zeta_\Gamma}{\zeta_{жс}} \right)^{1/3} \left(\frac{d_k}{h_{жс}} \right)^{1/3} \cdot g_\Gamma \quad (21)$$

После подстановки (21) в уравнение (16) получим:

$$D_T = B(C_D)^{1/3} \cdot \left(\frac{\zeta_\Gamma}{\zeta_{жс}} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{h_{жс}} \right)^{1/3} \cdot d_k^{4/3} \cdot Stk \cdot g_\Gamma, \quad (22)$$

где $B = 0,22$ – опытный коэффициент.

Эффективность улавливания аэрозоля по диффузионной модели определим по уравнению:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_v), \quad (23)$$

в котором:

$$\eta_T = \left(\frac{g_\Gamma \cdot d_k}{D_T} \right)^{-1/4} \quad (24)$$

Таким образом, полученные уравнения позволяют оценить долю вклада инерционного механизма осаждения частиц аэрозоля и молекулярной диффузии, а также суммарную эффективность осаждения аэрозолей на селитебных территориях во время выпадения дождевых осадков.

Литература

- 1 Шарыгин М.П. Разработка и расчет устройств для разрушения отложений и пылеулавливания с управляемым вихревым потоком: дис... докт. техн. наук. - М., 1992. -386с.
- 2 Фукс Н.А. Механика аэрозолей.- М.: АН СССР, 1955. – 352с.
- 3 Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей.- М.: АН СССР, 1961. – 160с.
- 4 Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локально-изотропной турбулентности //Докл. АН СССР. – 1941. – Т.32, № 1. – С.19-21.
- 5 Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Под ред. Н.А.Фукса. – Л.: Химия, 1969. – 428с.
- 6 Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока //Докл. АН СССР. – 1941. – Т.32, № 1. – С.22-24.

Қорытынды

Мақалада алынған өрнек қала аумағындағы аэрозоль түйіршіктерінің екпінді тұну механизмі мен молекулярлық диффузияның, сондай-ақ аэрозольдардың тұнуының жалпы тиімділігінің жауын-шашынның кезіндегі қосар үлесін бағалауға мүмкіндік береді.

Summary

Given equation permit to estimate share contribution mechanism of besiege aerosol small particles and molecular diffusion and also summary effectiveness of besiege aerosol on seletable territory when rain precipitation are fall out.