

ПОДСЕКЦИЯ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ХАРАКТЕРИСТИКИ СФЕРИЧЕСКОГО ПРОБООТБОРНИКА В НИЗКОСКОРОСТНОЙ СРЕДЕ

Гильфанов А.К., Мухаметзанов И.Т., Зарипов Ш.Х.
Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
E-mail: artur.gilfanov@kpfu.ru

В настоящее время остается актуальным исследование пробоотбора аэрозольных частиц внутри помещений, где наблюдаются малые скорости движения воздуха (~0.1-0.2 м/с), сравнимые со скоростью V_s седиментации грубодисперсных частиц. В таких условиях, на эффективность аспирации значительное влияние может оказывать сила тяжести. В настоящей работе в приближении потенциального течения несжимаемого газа для несущей среды решена задача аспирации аэрозоля в сферический пробоотборник, ориентированный входным отверстием к набегающему потоку аэрозоля. Проведены исследования коэффициента аспирации при различных значениях отношения R_a скорости ветра к скорости аспирации. Изучено влияние силы тяжести. Построена приближенная формула для коэффициента аспирации.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу об аспирации аэрозоля в идеализированный сферический пробоотборник с круговым входным отверстием, направленным к потоку аэрозоля (рис. 1). Диаметр δ входного отверстия пробоотборника значительно меньше диаметра сферы D . Введем параметр H как отношение этих диаметров $H = \delta/D$. Скорость аспирации U_s (средняя скорость во входном отверстии пробоотборника) и скорость ветра U_0 вдали от сферы направлены вдоль оси X , проходящей через центр входного отверстия. Вдали от пробоотборника в невозмущенной среде частицы движутся со скоростью $\bar{U}_1 = \bar{U}_0 + \bar{V}_s$, где $\bar{V}_s = \bar{\tau}g$ – скорость стационарного оседания частицы, $\tau = d_p^2 \rho_p / 18\mu$ – время релаксации частицы (d_p , ρ_p – диаметр и плотность частицы, μ – вязкость несущей среды). Пусть S_p – площадь поперечного сечения трубки траекторий частиц, попадающих внутрь пробоотборника. Тогда при известных значениях S_p и расхода газа $Q = U_s \pi \delta^2$ коэффициент аспирации A , определяемый как отношение концентрации c частиц внутри пробоотборника к концентрации c_0 частиц в невозмущенной среде, вычисляется по формуле

$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} = \frac{S_p \sqrt{U_0^2 + V_s^2}}{U_s \pi \delta^2} = \frac{S_p \sqrt{R_a^2 + (\text{St} / \text{Fr}^2)^2}}{\pi \delta^2}$$

(1)

где $R_a = U_0/U_s$ – отношение скоростей. Безразмерные параметры число Стокса St и число Фруда Fr определяются по формулам

$$\text{St} = \frac{U_s \tau}{D/2}, \quad \text{Fr} = \frac{U_s}{\sqrt{g \cdot D/2}}$$

(2)

Определение площади S_p области захвата сводится к расчету предельных траекторий с помощью решения уравнений движения аэрозольной частицы в заданном поле скоростей несущей среды. В настоящей работе для описания поля течения несущей среды в рамках модели потенциального течения несжимаемой жидкости использован подход, детально описанный в работе (Galeev, Zaripov, 2003). В этом случае течение индуцируется N точечными стоками, равномерно расположенными на входном отверстии.

В предположении применимости закона Стокса для силы аэродинамического сопротивления уравнения движения аэрозольной частицы записываются в виде

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{u_x - v_x}{St}, \quad \frac{dv_y}{dt} = \frac{u_y - v_y}{St}, \quad \frac{dv_z}{dt} = \frac{u_z - v_z}{St} - \frac{1}{Fr^2},$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \quad \frac{dy}{dt} = v_y, \quad \frac{dz}{dt} = v_z$$
(3)

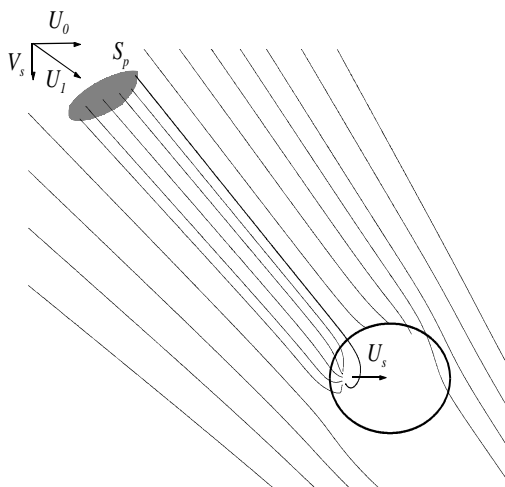


Рисунок 1. Схема задачи

где u_x, u_y, u_z и v_x, v_y, v_z – безразмерные компоненты скорости несущей среды и аэрозольной частицы соответственно, t – безразмерное время. Решение системы (3) с начальными условиями

$$v_x = R_a, \quad v_y = 0, \quad v_z = -R_c, \quad x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0$$
(4)

при $t=0$ позволяет рассчитать траекторию аэрозольной частицы ($R_c = V_s/U_s = St/Fr^2$ – безразмерная скорость стационарного оседания частицы).

Результаты

Параметр H принимался равным 0.1, что соответствует реальным сферическим пробоотборникам и геометрии человеческой головы. На рис. 2 показано, как меняется область захвата S_p частиц при уменьшении скорости ветра относительно скорости аспирации. Области захвата находились сканированием: с плоскости, перпендикулярной вектору \bar{U}_1 , запускалось большое количество равномерно распределенных частиц (с прямоугольника 200×100). При вычислении области S_p применялись параллельные вычисления на основе технологии CUDA. Начальные позиции частиц, попавших в пробоотборник, показаны на рис. 2. Зависимость $A(R_a)$ с учетом и без учета силы тяжести при $St=1$ приведена на рис.3. При $R_a > R_c$ влияние силы приводит в значительному уменьшению коэффициента аспирации. Полученные результаты, в целом, качественно согласуются с результатами для случая аспирации из тонкостенной трубки (Zaripov & Gilfanov, 2010).

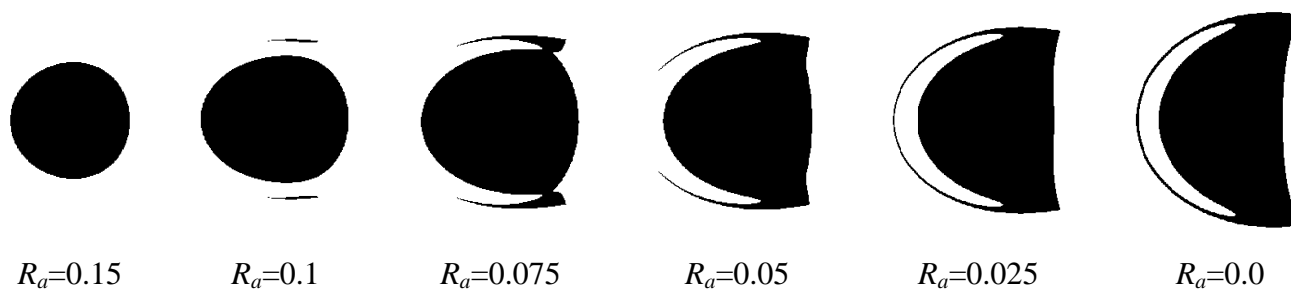


Рисунок 2. Области захвата частиц, $St=1$, $R_c=0.1$.

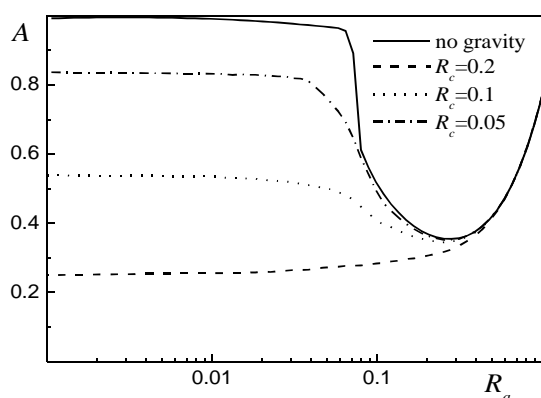


Рисунок 3. Зависимость $A(R_a)$ с учетом и без учета силы тяжести при $St=1$

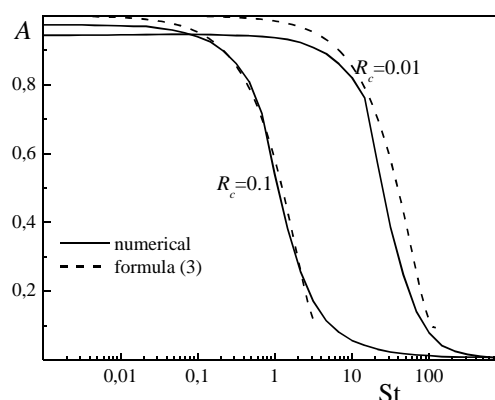


Рисунок 4. Зависимости $A(St)$, полученные численно и по формуле (3) при $R_c=0.01, 0.1$

В работе Su, Vincent (2004) на основе аналитического решения задачи аспирации для точечного стока (Levin, 1961), построена приближенная формула для коэффициента аспирации вертикально ориентированного сферического пробоотборника. В настоящей работе на основе аппроксимации численных расчетов получена формула для коэффициента аспирации сферического пробоотборника, ориентированного отверстием горизонтально, в случае неподвижного воздуха

$$A = 1 + \alpha k + \beta k^2, \quad (3)$$

где $k = St(R_a^2 + R_c^2)^{3/4} \ll 1$, $\alpha = -15.19$, $\beta = 63.6$. Сравнение кривых $A(St)$, полученных по численной модели и по формуле (3) при $R_c = 0.01, 0.1$ дано на рис.3. Формула (3) может быть использована для вычисления вдыхаемой фракции пылевых загрязнений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты N 12-01-00333, 12-07-00007).

Литература

1. Galeev, R.S., Zaripov, S.K. A theoretical study by an idealized spherical samplers in calm air // J. Aerosol Sci. 2003. V.34. – P.1135-1150.
2. Levin, L.M. Studies on the Physics of Coarse Aerosols 1961: Izd. AN USSR, Moscow, 267 p.
3. Su, W.C., Vincent, J.H. Towards a general semi-empirical model for the aspiration efficiencies of aerosol samplers in perfectly calm air // J. Aerosol Sci. 2004 – V.35 – P.1119-1134.
4. Vincent, J. Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications, 2007: John Wiley&Sons. 616 p.
5. Zaripov, S.K., Gilfanov, A.K., Maklakov, D.V. Numerical study of thin-walled sampler performance for aerosols in low windspeed environments // Aerosol Sci. and Techn., 2010. – V.44. P.152-160.