

УДК 532

## АСПИРАЦИЯ АЭРОЗОЛЯ В ТРУБКУ В НИЗКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ

© 2011 г.

А.К. Гильфанов, Ш.Х. Зарипов, Д.В. Маклаков

НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского федерального университета

artur.gilfanov@gmail.com

Поступила в редакцию 16.06.2011

В приближении потенциального течения несжимаемого газа для несущей среды решена задача аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку, ориентированную входным отверстием к набегающему потоку аэрозоля. Проведены исследования коэффициента аспирации при малых значениях отношения  $R_a$  скорости ветра к скорости аспирации. Изучено влияние силы тяжести. Построена приближенная формула для коэффициента аспирации в диапазоне  $R_a \in [0, 1]$ .

**Ключевые слова:** аэрозоль, коэффициент аспирации, потенциальное течение, сила тяжести.

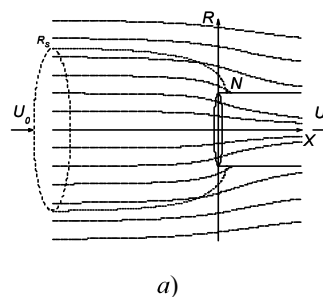
### Постановка задачи

Рассматривается течение аэрозоля при аспирации в круглую цилиндрическую трубку радиуса  $R_t$  и бесконечной длины (рис. 1а). Вдали от пробоотборника несущая среда движется равномерно со скоростью  $U_0$ . Направление вектора скорости ветра  $U_0$  совпадает с направлением скорости аспирации  $U_s$ . Поле скоростей течения несущей среды в приближении осесимметричного потенциального течения несжимаемой жидкости рассчитывается методом граничных элементов. В найденном поле скоростей решаются уравнения движения частиц в приближении закона сопротивления Стокса с учетом силы тяжести. В невозмущенной среде частицы двигаются параллельно вдоль направления, задаваемого вектором скорости  $\bar{U}_1 = \bar{U}_0 + \bar{V}_s$  (рис. 1б), где  $\bar{V}_s = \tau \bar{g}$  – скорость гравитационного оседания,  $\tau = d^2 \rho_p / 18 \mu$ ,  $d$  и  $\rho_p$  – диаметр и плотность частицы,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды. Предельная трубка траекторий разделяет дисперсную фазу на потоки аспирируемых частиц и частиц, проходящих мимо пробоотборника. При известной площади  $S_p$  поперечного сечения предельной трубки траекторий вдали от пробоотборника коэффициент аспирации вычисляется по формуле

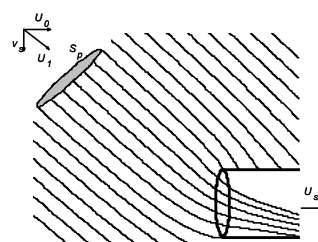
$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} = \frac{S_p \sqrt{U_0^2 + V_s^2}}{\pi R_t^2 U_a} = \frac{S_p R_a \sqrt{1 + (St/Fr^2)^2}}{\pi R_t^2}, \quad (1)$$

где  $Q = U_s \pi R_t^2$  – расход газа в трубке,  $R_a = U_0/U_s$ . Безразмерные числа Стокса  $St$  и Фруда  $Fr$  опре-

деляются как  $St = \tau U_s / D_p$ ,  $Fr = U_0 / \sqrt{g D_t}$ , где  $D_t = 2R_t$ .



а)



б)

Рис. 1

### Результаты

Проведены параметрические исследования коэффициента аспирации при варьировании величины  $R_a$ , чисел Стокса и Фруда. На рис. 2 даны области захвата аэрозольных частиц вдали от пробоотборника при уменьшении параметра  $R_a$  от 0.2 до 0 для  $St = 1$  и  $Fr = 10$ . Области захвата  $S_p$  показаны в плоскостях, перпендикулярных вектору скорости  $\bar{U}_1$ . С уменьшением  $R_a$  начинает сказываться влияние силы тяжести, первоначально

круговая область захвата ( $R_a = 0.2$ ) меняет свою форму. Появляется узкая область вокруг основного круга ( $R_a = 0.1$ ), которая затем соединяется с ним ( $R_a = 0.08$ ). Далее область захвата расширяется, и при этом внутри нее растет область, с которой стартуют частицы, оседающие на поверхности трубки ( $R_a = 0.0$ ). Полученные области захвата используются для расчета коэффициента аспирации по формуле (1).

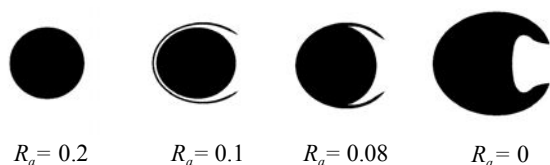


Рис. 2

На рис. 3 даны зависимости  $A(R_a)$ , рассчитанные с учетом (сплошные кривые) и без учета силы тяжести (штриховые кривые). При  $R_a < R_c$  ( $R_c = St/Fr^2$ ) начинает сказываться влияние силы тяжести. Для рассматриваемой задачи – аспирации из движущегося воздуха в трубку, горизонтально ориентированную в пространстве, – коэффициент аспирации уменьшается при учете силы тяжести. С увеличением числа Стокса влияние силы тяжести растет.

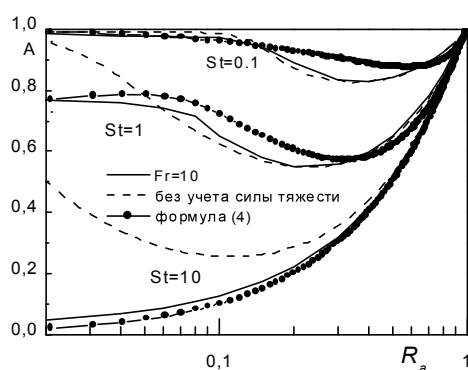


Рис. 3

Расчеты показали, что коэффициент аспирации в отсутствие влияния силы тяжести в области  $R_a$  хорошо описывается приближенной формулой, предложенной в [1]:

$$A_m = 1 + \beta(R_a - 1), \quad (2)$$

$$\beta = 1 - \left( 1 + St \frac{\sqrt{R_a}}{1 - \sqrt{R_a}} + 4St \right)^{-1}.$$

В то же время в [3] на основе аппроксимации экспериментальных данных получена формула для коэффициента аспирации в неподвижном воздухе ( $R_a = 0$ )

$$A_0 = 1 - 0.8(4StR_c^{3/2}) + 0.08(4StR_c^{3/2})^2 - 0.8(0.5StR_c^{1/2})^2 - 0.2\{0.12StR_c^{-0.4}(e^{-p} - e^{-q})\},$$

$$p = 2.2StR_c^{1/3}St, \quad q = 75StR_c^{1.7}St. \quad (3)$$

Для вычисления коэффициента аспирации во всем диапазоне  $R_a \in [0, 1]$  может быть использована комбинация формул (2) и (3) в виде

$$A = \begin{cases} A_0 + R_a(A_{mc} - A_0)/R_c, & R_a < R_c, \\ A = A_m, & R_a > R_c, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A_{mc} = A_m(R_c)$ . Как видно из рис. 3, зависимости  $A(R_a)$ , рассчитанные по (4), удовлетворительно согласуются с кривыми, полученными из описанной численной модели.

#### Список литературы

1. Medvedev A.A. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2002. V.15, No 8. P. 663–666.
2. Schmees D.K., Wu Y.-H., Vincent J.H. // J. Environ. Monitoring. 2008. V. 10. P. 1426–1436.
3. Vincent J. Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications. John Wiley & Sons, 2007. 616 p.

#### AEROSOL SAMPLING INTO A TUBE IN A LOW-VELOCITY FLOW

A.K. Gilfanov, Sh.Kh. Zaripov, D.V. Maklakov

The problem of aerosol aspiration into a thin-walled tube horizontally oriented in low velocity air flow is solved. The air flow is assumed to be incompressible potential. The aspiration efficiency is calculated in the region of a very small ratio  $Ra$  of wind and sampling velocities when the gravity influence becomes noticeable. The approximate formula for the aspiration efficiency is constructed for  $R_a \in [0, 1]$ .

**Keywords:** aerosol, aspiration efficiency, potential flow, gravity force.