

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТБОРА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ДВИЖУЩЕМСЯ ГАЗЕ

Ш.Х. Зарипов, Д.А. Фокин

*НИИММ Казанского государственного университета
shamil.zaripov@ksu.ru*

Прямые методы исследования аэрозолей предполагают отбор аэрозольных частиц в измерительное устройство. Пробоотбор может осуществляться в различных условиях (при наличии ветрового потока или из неподвижной среды). При этом концентрация частиц внутри прибора может отличаться от концентрации частиц в изучаемом аэрозоле вследствие возмущения газодинамического поля в окрестности входного отверстия пробоотборника. Для количественной оценки искажений в измеренных концентрациях вводится понятие коэффициента аспирации, представляющего собой отношение средней концентрации в измерительном устройстве к счетной концентрации частиц в невозмущенной среде. Коэффициент аспирации может определяться как экспериментально, так и теоретически. Найденное значение коэффициента аспирации используется затем для восстановления истинной величины концентрации частиц. Наиболее полный обзор работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса аспирации, содержится в [1]. В последнее время заметно возрос интерес к исследованию персональных пробоотборников, применяемых для анализа загрязненности воздушной среды в производственных помещениях [2,3]. Основное внимание при этом уделяется изучению влияния тела человека на процесс аспирации. Аспирация аэрозоля в персональные пробоотборники характеризуется тем, что входное отверстие прибора располагается в зоне торможения потока. В [2] для экспериментальных исследований аспирации в персональные пробоотборники вместо манекена человека для упрощения используется прямоугольное тело типа параллелепипеда. Результаты численного исследования коэффициента аспирации в трубку, расположенную на диске, в приближении потенциального течения несущей среды даются в [3], где показано слабое влияние на эффективность аспирации толщины диска. В настоящей работе развита математическая модель аспирации аэрозоля в трубку, расположенную на бесконечном цилиндрическом теле (упрощенная модель аспирации в персональные пробоотборники).

Постановка задачи. На рис. 1 показана схема расчетной области в

меридиональной плоскости (X, R) (R_i и R_i - внешний и внутренний радиусы пробоотборной трубки, R_c - радиус цилиндрического тела, L_s - длина трубки). Вдали от трубки газ движется равномерно параллельно оси симметрии трубки и цилиндра со скоростью U_0 . Скорость аспирации задается постоянной (равной U_a) на входе в трубку. При малых концентрациях частиц, что характерно для большинства аэрозольных образований, моделирование течения аэрозоля сводится к решению двух задач: определению поля скоростей течения несущей среды и расчету траекторий частиц в найденном поле скоростей. Течение несущей среды представляется ламинарным вязким осесимметричным течением несжимаемой жидкости. Для расчета поля скоростей газа в приближении уравнений Навье-Стокса используется CFD программа ANSYS/Flotran. Граничные условия записываются в виде

$$U_x = U_0, U_r = 0 \text{ при } \begin{cases} x = -5R_c, 0 \leq R \leq 10R_c \\ -5R_c \leq X \leq L_s + 20R_c, R = 10R_c \end{cases}, \quad (1)$$

$$U_x = U_a, U_r = 0 \text{ при } X = 0, 0 \leq R \leq R_i, \quad (2)$$

$$P = 0 \text{ при } X = L_s + 20R_c, R_c < R < 10R_c, \quad (3)$$

где U_x, U_r - составляющие скорости газа в плоскости (X, R) , P - давление. На внешней стенке и на поверхности цилиндра ставятся условия прилипания ($U_x = 0, U_r = 0$).

В предположении стоксового закона сопротивления безразмерные уравнения движения сферических частиц записываются в виде

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{u_x - v_x}{St}, \quad \frac{dv_r}{dt} = \frac{u_r - v_r}{St}, \quad (4)$$

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_r = \frac{dr}{dt},$$

$$u_x = \frac{U_x}{U_0}, u_r = \frac{U_r}{U_0}, v_x = \frac{V_x}{U_0}, v_r = \frac{V_r}{U_0}, x = \frac{X}{R_i}, r = \frac{R}{R_i}, St = \frac{d^2 \rho_p U_0}{18\mu(2R_i)},$$

где V_x, V_r - составляющие скорости частицы в плоскости (X, R) , t - время, d и ρ_p - диаметр и плотность частицы, μ - динамический коэффициент вязкости газа.

Уравнения (4) решаются численно методом Рунге-Кутты, на каждом шаге по времени текущие значения составляющих скорости газа определяются интерполированием. С помощью итераций находится предельная траектория, которая разделяет аспирируемые частицы от основного потока частиц. Начальная ордината предельной траектории r_0 позволяет рассчитать коэффициент аспирации по формуле

$$A = U_0 r_0^2 / U_a R_i^2.$$

Результаты расчетов. Значения геометрических параметров трубы и цилиндра взяты из [2]: $R_i = 0.75$ см; $R_i - R_0 = 0.05$ см; $R_0 = 10.5$ см. Для тестирования программы была решена задача об аспирации в свободную тонкостенную трубку. Такая задача была изучена в приближении уравнений Навье-Стокса в [4,5]. Кроме того, имеется признанная экспериментальная формула для эффективности аспирации, предложенная в [6]:

$$A = 1 + \left(\frac{U_0}{U_a} - 1 \right) \frac{2 + 0.617 U_a / U_0}{2 + 0.617 U_a / U_0 + St^{-1}}. \quad (5)$$

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента аспирации от числа Стокса для трех типичных случаев пробоотбора: $U_0 = 0.5$ м/с и $U_a = 1.16$ м/с, 0.5 м/с, 0.19 м/с. Штриховые кривые соответствуют коэффициенту аспирации, рассчитанному по формуле (5). В случае $U_0 > U_a$ коэффициент аспирации становится меньше единицы для чисел Стокса St , при которых начинает сказываться влияние инерционных свойств частицы на процесс аспирации, и падает до величины U_0 / U_a для очень больших чисел Стокса. Для случая $U_0 < U_a$ коэффициент аспирации больше единицы и в случае изокINETического отбора $U_0 = U_a$ величина A практически равняется единице. Наблюдается хорошее согласование между численными результатами и формулой (5). Некоторое отличие коэффициента аспирации от единицы в изокINETическом случае связано с влиянием толщины стенки трубы.

На рис. 3-5 приведены результаты расчетов коэффициента аспирации в трубку, расположенную на цилиндре, для трех значений скорости набегающего потока $U_a = 1.16$ м/с, 0.5 м/с, 0.19 м/с и различных длин трубы $L_s = 7.5, 2.8, 0$ см. Кружочками отмечены кривые, соответствующие случаю свободной трубки. Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии тела за трубкой на коэффициент аспирации. Это эффект усиливается при уменьшении длины трубки. В присутствии цилиндра сзади аспирирующей трубки зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса носит немонотонный характер. Даже в изокINETическом случае эффективность аспирации оказывается отличной от единицы. Приведенные кривые качественно близки к результатам [3], где была использована модель потенциального течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект N 99-01-00169)

ЛИТЕРАТУРА

1. Vincent J.H. *Aerosol Sampling Science and Practice*. – London: Wiley. – 1989.

2. Witschger O., Willeke K., Grinshpun S.A., Aizenberg V., Smith J., Baron P.A. *Simplified method for testing personal inhalable aerosol samplers*// *J. Aerosol Sci.* – 1998. – V.29. – N7. – P.855–874.

3. Ingham D.B., Yan B. *The effect of a cylindrical backing body on the sampling efficiency of a cylindrical sampler*// *J. Aerosol Sci.* – 1994. – V.25. – N.3. – P.535–541.

4. Rader D.J., Marple V.A. *A study of the effects of anisokinetics sampling*// *Aerosol Science and Technology*. – 1988. – N8. – P.283–299.

5. Liu B.Y.H., Zhang Z.Q., Kuehn T.H. *A numerical study of inertial errors in anisokinetic sampling*// *J. Aerosol Sci.* – 1989. – V.20. – N3. – P.367–380.

6. Belyaev S.P., Levin L. *Techniques for collection of representative aerosol samples*// *J. Aerosol Sci.* – 1974. – V.5. – P.325–338.

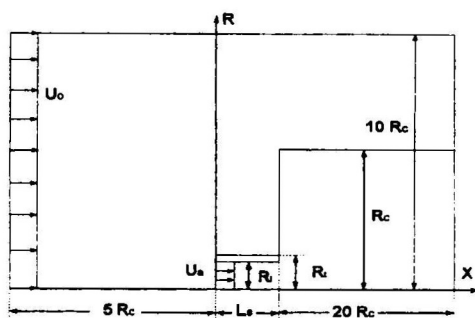


Рис. 1

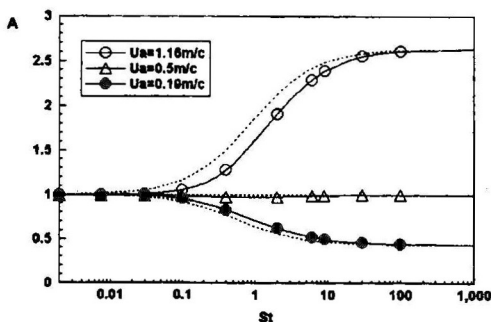


Рис. 2

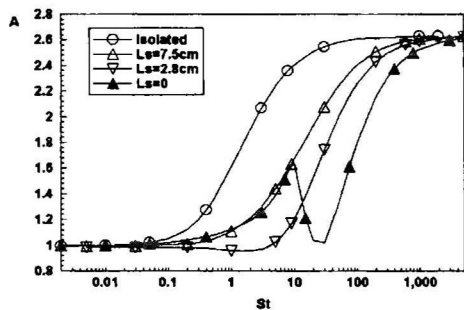


Рис. 3

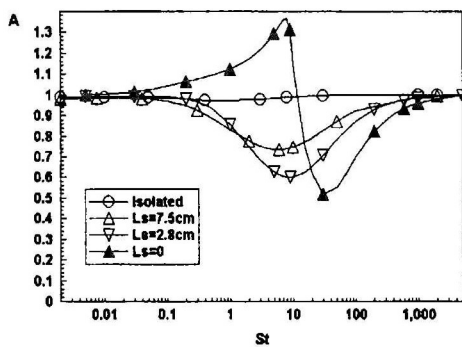


Рис. 4

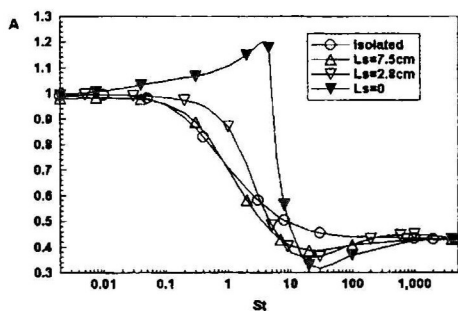


Рис. 5