

А.А. Медведев

Численное исследование отбора проб аэрозольных частиц из низкоскоростного потока

ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэриологии, пос. Кольцово Новосибирской обл.

Поступила в редакцию 11.03.2002 г.

Отбор проб аэрозольных частиц в тонкостенную трубку, ориентированную навстречу внешнему потоку воздуха, исследован численно с помощью решения уравнений Навье–Стокса, интегрирования уравнений движения частиц и расчетов эффективности аспирации. Основное внимание уделено случаю, когда скорость свободного потока воздуха значительно меньше, чем средняя скорость пробоотбора. Показано, что когда отношение скоростей стремится к нулю, эффективность аспирации определяется осаждением частиц на стенку трубки и зависит только от числа Стокса. На основе результатов расчетов построена полуэмпирическая формула для эффективности аспирации аэрозольных частиц в зависимости от числа Стокса и отношения скоростей. Результаты расчетов и полученная полуэмпирическая формула могут быть использованы при выборе режимов отбора проб аэрозольных частиц из окружающего воздуха.

Введение

Исследование аэрозолей чаще всего начинается с того, что воздух, содержащий частицы, засасывается внутрь измерительного прибора с помощью устройства для отбора проб. Простейшим и чаще всего используемым пробоотборником является тонкостенная цилиндрическая трубка. Скорость ветра во время отбора проб из приземного слоя атмосферы постоянно меняется, и часто возникает ситуация, когда скорость внешнего потока много меньше скорости воздуха на входе в трубку. При этом поток, засасываемый в трубку, ускоряется, а частицы вследствие инерции отклоняются от линий тока воздуха. Вследствие этого могут возникать искажения дисперсного состава аэрозоля, мерой которых служит эффективность аспирации $A = c/c_0$, где c , c_0 – поточные концентрации данной фракции аэрозоля внутри трубки и во внешнем потоке соответственно. Чтобы минимизировать аспирационные искажения, трубку ориентируют против вектора скорости внешнего потока.

Для оценки эффективности аспирации в трубку, обращенную навстречу потоку, обычно используется полуэмпирическая формула Беляева и Левина [1, 2], полученная на основе данных экспериментов:

$$A = 1 + (R - 1) \left[1 - \frac{1}{1 + \left(2 + \frac{0,62}{R} \right) Stk} \right], \quad (1)$$

где $R = W/V_0$ – отношение скоростей; W – скорость внешнего потока; V_0 – средняя скорость воздуха в трубке; $Stk = \tau W/D$ – число Стокса, D – внутренний диаметр трубки, τ – время релаксации частицы. В работах [1, 2] фотографировались траектории отдельных частиц и определялся диаметр Φ трубки предельных траекторий в невозмущенном потоке. Предельными здесь называются траектории, разграничивающие частицы, попадающие во входное отверстие трубки, и частицы, пролетающие мимо него. Эффективность аспирации определялась далее с помощью соотношения

$$A = \frac{\Phi^2}{D^2} R, \quad (2)$$

полученного из условия сохранения потока частиц внутри трубки предельных траекторий.

Формула (1) аппроксимирует данные, полученные при $R > 0,17$, и в этом диапазоне она хорошо согласуется с опубликованными экспериментальными данными и теоретическими расчетами. Для меньших значений R опубликованные данные противоречивы.

Результаты работ [3, 4], также полученные с помощью метода предельных траекторий, хорошо согласуются с уравнением (1) вплоть до $R = 0,03$, однако существенно расходятся с экспериментальными данными [5, 6]. Легко видеть, что при стремлении R к нулю и постоянном значении Stk , например, при повышении скорости аспирации в трубку, значение эффективности аспирации, согласно уравнению (1), стремится к нулю. В то же время экспериментальные данные [5, 6] демонстрируют качественно иное, немонотонное, поведение эффективности аспирации, которая с уменьшением R достигает некоторого минимума, а затем повышается. В работах [3, 4] данное расхождение объясняется тем, что частицы, отскочившие от внешней поверхности трубки, могли быть засосанными в трубку, увеличивая эффективность аспирации, определяющуюся в работах [5, 6] путем сравнения концентрации частиц на выходе трубки с независимо измеренной концентрацией в потоке. В то же время данные работ [1–4] свободны от влияния вторичной аспирации вследствие того, что предельные траектории частиц регистрировались визуально.

В ряде работ аспирация частиц в трубку исследовалась теоретически. В работе [7], где поле скоростей воздуха рассчитывалось с помощью модели точечного стока, показано, что при уменьшении скорости внешнего потока эффективность аспирации стремится к единице. Следует отметить, что в используемой модели не учитывалось влияние стенок трубки. В работах [8, 9] поле скоростей воздуха вблизи трубки рассчитывалось путем решения уравнений Навье–Стокса. Затем с помощью интегрирования уравнений движения частиц в полученном поле скоро-

стей воздуха рассчитывались траектории движения частиц, определялись предельные их траектории и эффективность аспирации. Результаты работ [8, 9] хорошо согласуются с уравнением (1) для $R > 0,2$, а результаты [9] демонстрируют определенное расхождение при $R = 0,1$. Следует отметить, что в работах [8, 9] нижняя граница исследуемого диапазона R составляла 0,2 и 0,1 соответственно.

Вопрос о поведении эффективности аспирации при малых значениях отношения скоростей является практически важным для выбора режимов работы пробоотборников и анализа полученных результатов. На эффективность аспирации влияют различные факторы, включая инерцию, отскок частиц от стенки трубки, гравитационное оседание, потери частиц внутри трубки. Действием силы тяжести можно пренебречь, если скорость внешнего потока много больше скорости седиментации частиц. Отскок частиц вносит значительную неопределенность, поскольку зависит от взаимодействия частиц с поверхностью трубки. Чтобы оценить пределы указанной неопределенности, необходимо корректно учитывать влияние других факторов. В то же время данные о влиянии инерции частиц на поведение эффективности аспирации при $R < 0,2$ недостаточно. Целью настоящей работы является численное исследование эффективности аспирации во входное отверстие трубки при малых значениях отношения скоростей с учетом только эффектов инерции частиц.

1. Метод

Процедура теоретического определения эффективности аспирации заключалась в следующем. Сначала рассчитывалось поле скоростей потока воздуха в отсутствие частиц, затем определялись траектории частиц.

Поле скоростей потока рассчитывалось путем решения уравнений Навье–Стокса для стационарного осесимметричного течения вязкого несжимаемого воздуха в цилиндрической системе координат:

$$\rho \left(v_r' \frac{\partial v_r'}{\partial r'} + v_z' \frac{\partial v_r'}{\partial z'} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r'} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_r'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_r'}{\partial r'} - \frac{v_r'}{r'^2} + \frac{\partial^2 v_r'}{\partial z'^2} \right); \quad (3)$$

$$\rho \left(v_r' \frac{\partial v_z'}{\partial r'} + v_z' \frac{\partial v_z'}{\partial z'} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z'} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_z'}{\partial r'} + \frac{\partial^2 v_z'}{\partial z'^2} \right), \quad (4)$$

замкнутой с помощью уравнения неразрывности

$$\frac{\partial v_r'}{\partial r'} + \frac{v_r'}{r'} + \frac{\partial v_z'}{\partial z'} = 0, \quad (5)$$

где v_r' , v_z' – компоненты скорости воздуха; P – давление; ρ и μ – плотность и вязкость воздуха.

Уравнения (3)–(5) были переписаны в виде переменных «вихрь – функция тока»:

$$\begin{aligned} r'^2 \left[\frac{\partial}{\partial r'} \left(\frac{w}{r'} \frac{\partial \Psi}{\partial z'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{w}{r'} \frac{\partial \Psi}{\partial r'} \right) \right] = \\ = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial r'} \left(r'^3 \frac{\partial (w/r')}{\partial r'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} \left(r'^3 \frac{\partial (w/r')}{\partial z'} \right) \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\left(\frac{w}{r'} \right) r' = - \frac{\partial}{\partial r'} \left(\frac{1}{r'} \frac{\partial \Psi}{\partial r'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{1}{r'} \frac{\partial \Psi}{\partial z'} \right). \quad (7)$$

Напряженность вихря (w/r) и функция тока Ψ определены с помощью следующих соотношений:

$$\frac{w}{r} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \quad (8)$$

$$v_z = - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \quad v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad (9)$$

где

$$v_z = \frac{\partial v_z'}{V_0}, \quad v_r = \frac{\partial v_r'}{V_0}; \quad r = \frac{r'}{D}; \quad z = \frac{z'}{D} \quad (10)$$

– скорость и координаты, обезразмеренные с использованием средней скорости воздуха V_0 в трубке и внутреннего диаметра трубки D в качестве масштабов; $\text{Re} = \rho V_0 D / \mu$ – число Рейнольдса.

Уравнения (6), (7) были преобразованы в конечно-разностную форму и решены с помощью итерационного метода, описанного в [10].

Расчетная область, показанная на рис. 1, представляет собой цилиндр, ось которого совпадает с осью симметрии трубки. Поток воздуха поступает в область через торец цилиндра ab и покидает ее через внутреннее сечение трубки dh и внешнее сечение gc . На входной ab и боковой bc границах расчетной области предполагается, что поток невозмущенный и его скорость равна скорости внешнего потока.

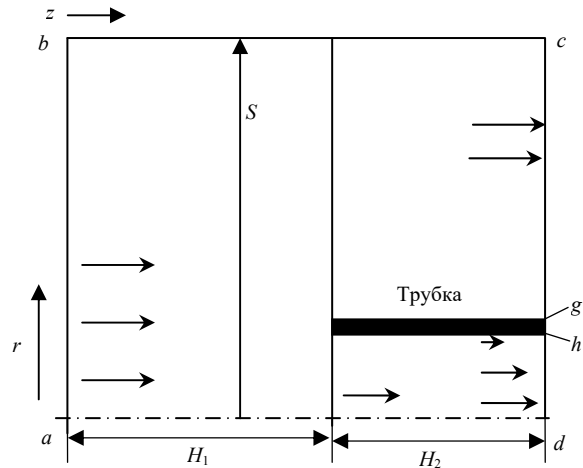


Рис. 1. Область расчетов поля потока воздуха вблизи трубки

На поверхности стенки трубки и на оси симметрии функция тока постоянна. Поскольку функция тока определена с точностью до аддитивной постоянной, на поверхности трубки она была принята равной нулю. Значения функции тока для границ ab , ad , bc вычислялись заранее путем интегрирования соотношений (9), (10) для заданных выше профилей скорости воздуха:

$$\Psi_{ad} = 0,125, \quad \Psi_{ab(r)} = 0,125 - Rr^2/2, \quad \Psi_{bc} = 0,125 - RS^2/2,$$

где S – радиус расчетной области. Напряженность вихря на границах ab , bc равна нулю. Указанные значения не меняются во время итерационного процесса в отличие от значений напряженности вихря на поверхности стенки трубки и на оси симметрии, которые вычисляются на каждой итерации с помощью конечно-разностных формул. На выход

ных границах области gc и dh распределение скорости не известно. Предполагалось, только, что радиальная компонента скорости воздуха здесь равна нулю, т.е. линии тока параллельны оси трубки. Таким образом, на каждой итерации значения функции тока и вихря на выходных границах приравнивались соответствующим значениям в узлах сетки выше по потоку.

После того как значения функции тока были рассчитаны в каждом узле конечно-разностной сетки, скорость определялась с помощью соотношений (9), (10). Уравнения движения частиц записаны в соответствии с законом Стокса:

$$\text{Stk} \frac{d^2 r}{dt^2} = v_r - \frac{dr}{dt}, \quad (11)$$

$$\text{Stk} \frac{d^2 z}{dt^2} = v_z - \frac{dz}{dt}. \quad (12)$$

Траектории частиц рассчитывались путем интегрирования уравнений движения частиц с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка. Начальные точки траекторий располагались на границе ab . Начальная скорость частиц была равна скорости внешнего потока W .

Следуя большому количеству работ по аспирации (см., например, [1]), эффективность аспирации рассматривают как функцию безразмерных параметров подобия, а именно числа Стокса и отношения скоростей. Расчеты проводились при фиксированном числе $\text{Re} = 1000$. Предварительные расчеты, а также данные работы [8] показывают, что эффективность аспирации слабо зависит от числа Рейнольдса в диапазоне $500 < \text{Re} < 10000$.

На рис. 2 показаны предельная линия тока воздуха, засасываемого в трубку (сплошная линия), и траектории частиц (пунктирные линии), рассчитанные для следующих параметров: $R = 0,02$; $\text{Stk} = 2$. Частицы, коснувшиеся стенки трубки, считались выбывшими из пробы. Частицы, которые пересекли сечение входного отверстия трубки, считались попавшими в пробу. Предельные траектории определялись методом деления пополам. Эффективность аспирации рассчитывалась с помощью соотношения (2).

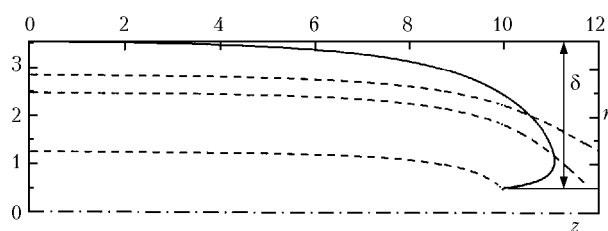


Рис. 2

В ходе предварительных расчетов были выбраны размеры области и число узлов сетки, такие, что их дальнейшее увеличение не влияло на значение рассчитанной эффективности аспирации. Длина расчетной области составляла двадцать диаметров трубки вверх по потоку и десять – вниз от входного отверстия трубки ($H_1 = 20$, $H_2 = 10$). Толщина стенки трубки равнялась минимальному шагу сетки, поскольку ее влияние на эффективность аспирации в данной работе не исследовалось. Радиус расчетной области ($S = 16$) был принят достаточно большим, чтобы поток воздуха, отсасываемый в трубку, составлял менее 5% от общего потока, входящего в область. Число узлов сетки в радиальном направле-

нии равно 91, а вдоль оси – 109. Для лучшей аппроксимации конечно-разностная сетка имела неравномерный шаг со сгущением вблизи стенки трубки и входного отверстия, где градиенты скорости и давления максимальны.

2. Результаты

После завершения предварительных исследований была проведена серия расчетов, в которых эффективность аспирации определялась в зависимости от отношения скоростей $R = 0,02 \div 0,9$ и числа Стокса $\text{Stk} = 0,01 \div 2$. Нижний предел диапазона отношения скоростей выбран таким образом, чтобы можно было пренебречь влиянием гравитационного оседания для типичных скоростей аспирации и размеров частиц. Например, при $V_0 = 10$ м/с и $R = 0,02$ скорость внешнего потока $W = 0,2$ м/с, что много больше скорости седиментации частиц диаметром 10 мкм (0,003 м/с). Результаты расчетов, представленные точками на рис. 3, хорошо согласуются с полуэмпирическим уравнением (1) для $W/V_0 > 0,2$ в отличие от случая $W/V_0 < 0,2$, для которого наблюдается значительное расхождение.

Аспирационные потери можно рассматривать как результат осаждения частиц на воображаемое кольцо шириной δ вне трубки (см. рис. 2), внутренний диаметр которого равен диаметру трубки, а внешний – диаметру трубки предельных линий тока воздуха в невозмущенном потоке. Общее выражение для эффективности аспирации выглядит следующим образом [2]:

$$A = 1 + \alpha (R - 1), \quad (13)$$

где α – безразмерный параметр, который можно интерпретировать как эффективность осаждения на указанное кольцо.

В работе [11] предложено следующее выражение для эффективности осаждения частиц на тела различной формы:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + k \text{St}}, \quad (14)$$

где k – безразмерный параметр, зависящий от формы препятствия; St – модифицированное число Стокса, которое в данном случае определяется как отношение между дистанцией остановки частицы τW и шириной препятствия δ .

Используя диаметр граничной поверхности потока воздуха, полученный из соотношения (2) при эффективности аспирации $A = 1$, имеем следующие выражения для ширины кольца:

$$\delta = D \frac{1 - \sqrt{R}}{2\sqrt{R}} \quad (15)$$

и для модифицированного числа Стокса:

$$\text{St} = \frac{\tau W}{\delta} = 2\text{Stk} \frac{\sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}. \quad (16)$$

Комбинируя (13), (14) и (16), получим

$$A = 1 + \left[1 - \left(1 + 2k \text{Stk} \frac{\sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^{-1} \right] (R - 1). \quad (17)$$

С помощью подгонки уравнения (17) к рассчитанным значениям эффективности аспирации было выведено следующее соотношение для коэффициента k :

$$k = \frac{1}{2} + 2 \left(\frac{1 - \sqrt{R}}{\sqrt{R}} \right). \quad (18)$$

После подстановки (18) в (17) было получено полуэмпирическое уравнение для эффективности аспирации

$$A = 1 + \left[1 - \left(1 + \text{Stk} \frac{\sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} + 4\text{Stk} \right)^{-1} \right] (R - 1). \quad (19)$$

На рис. 3 сплошными линиями показаны зависимости эффективности аспирации от R , рассчитанные для нескольких значений Stk по уравнению (19), точки – значения эффективности аспирации, полученные численно, штриховые линии соответствуют уравнению (1). Видно, что уравнение (19) хорошо аппроксимирует численные значения, полученные для $\text{Stk} \geq 0,2$, и удовлетворительно – для меньших значений числа Стокса.

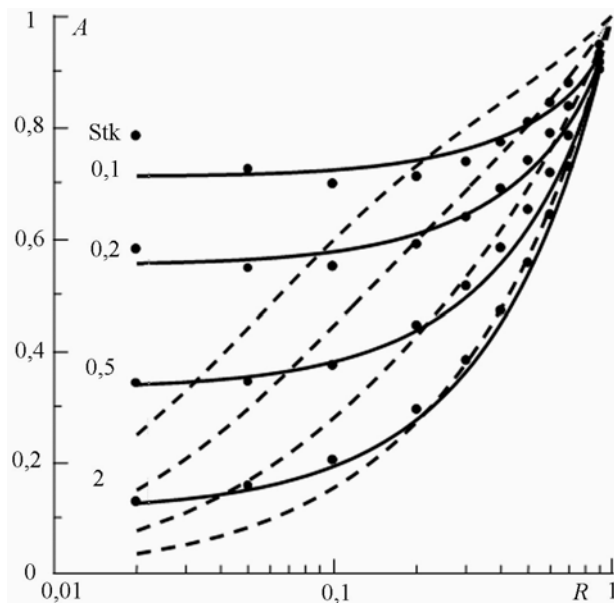


Рис. 3. Эффективность аспирации в зависимости от отношения скоростей R и числа Стокса

На основе полученных результатов можно сделать следующий вывод. При постоянном числе Стокса, т.е. при

постоянной скорости ветра, эффективность аспирации с увеличением ее скорости снижается и при $R \rightarrow 0$ стремится к постоянному значению, которое определяется осаждением частиц на стенку трубки и зависит от числа Стокса:

$$A = \frac{1}{1 + 4\text{Stk}}. \quad (20)$$

Модель точечного стока [7] учитывает только захват частиц полем скоростей засасываемого воздуха. Для трубки эффективность аспирации может быть представлена в виде разности между эффективностью аспирации в точечный сток и эффективностью осаждения частиц на стенку трубки. Следует отметить, что уравнение (20) может быть непосредственно получено из (13) и (14) с учетом значения параметра $k = 4$, полученного в [11] для осаждения частиц на поверхность цилиндра. Из уравнения (20) следует, что $A > 0,9$ при $\text{Stk} < 0,1$, это можно использовать как критерий неискаженного отбора проб.

1. Беляев С.П., Левин Л.М. Экспериментальное исследование аспирации аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1970. Т. 6. № 11. С. 1137–1152.
2. Belyaev S.P., Levin L.M. Techniques for collection of representative aerosol samples // J. Aerosol Sci. 1974. V. 5. P. 325–338.
3. Lipatov G.N., Grinshpun S.A., Shingaryov G.L., Sutugin A.G. Aspiration of coarse aerosol by a thin-walled sampler // J. Aerosol Sci. 1986. V. 17. P. 763–769.
4. Grinshpun S.A., Lipatov G.N., Sutugin A.G. Sampling errors in cylindrical nozzles // Aerosol Sci. & Technol. 1990. V. 12. P. 716–740.
5. Gibson H. and Ogden T.L. Some entry efficiencies for sharp-edged samplers in calm air // J. Aerosol Sci. 1977. V. 8. P. 361–365.
6. Davies C.N. and Subari M. Aspiration above wind velocity of aerosol with thin-walled nozzles facing and at right angles to the wind direction // J. Aerosol Sci. 1982. V. 13. P. 59–71.
7. Левин Л.М. О заборе проб аэрозоля // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 7. С. 914–925.
8. Rader D.J., Marple V.A. A study of the effects of anisokinetic sampling // Aerosol Sci. & Technol. 1988. V. 8. P. 283–299.
9. 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. P. 367–380.
10. Численные методы исследования течений вязкой жидкости // А.Д. Госмен, В.М. Пан, А.К. Ранчел, Д.Б. Сполдинг, М.М. Вольфштейн. М.: Мир, 1972. 328 с.
11. May K.R. and Clifford R.C. The impaction of aerosol particles on cylinders, spheres, ribbons and discs // Ann. Occup. Hyg. 1967. V. 10. P. 83–95.

A.A. Medvedev. Numerical study of aerosol particle sampling from low-velocity flows.

Aspiration of aerosol by a thin-walled tube facing the wind has been studied numerically by solving the Navier–Stokes equations, integrating the equations of particle motion and calculating the aspiration efficiency. The main attention was given to the case when the free stream air velocity is much less than the mean sampling velocity, because the experimental and theoretical results for this case are lacking. It is shown that when the velocity ratio tends to zero the aspiration efficiency is determined by the particle deposition on the tube wall and depends on the Stokes number only. A fitting equation for the aspiration efficiency as depending on the Stokes number and velocity ratio was derived using the calculated results. The results of the study can be used to choose the regime of the particle sampling from ambient air.