

А.А. Медведев, Н.Н. Трусова, С.Г. Черный, С.В. Шаров

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСПИРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ПОТОКА В ЩЕЛЕВОЙ ПРОБООТБОРНИК***ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэриологии, пос. Кольцово, Новосибирской области  
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск*

Поступила в редакцию 03.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

С помощью численного решения трехмерных уравнений Навье–Стокса и уравнений движения частиц рассчитаны значения эффективности аспирации аэрозоля в пробоотборник, вход которого выполнен в виде кольцевой щели. Исследованы зависимости эффективности аспирации от следующих критериев подобия: числа Стокса, отношения скоростей потока воздуха, а также отношения характерных размеров пробоотборника. Полученные результаты могут быть использованы для оценки искажений дисперсного состава частиц и выбора оптимальных параметров пробоотборников.

**1. Введение**

Для отбора проб (аспирации) частиц аэрозоля используются зонды различных конструкций. При этом вследствие инерции частиц (несовпадения их траекторий с линиями тока воздуха) могут возникнуть значительные искажения концентрации и дисперсного состава аэрозоля, мерой которых служит эффективность аспирации  $A = c/c_0$ , где  $c$ ,  $c_0$  – поточные концентрации данной фракции аэрозоля внутри пробоотборного устройства и в окружающем воздухе соответственно. Для уменьшения ошибок аспирации были предложены пробоотборники, вход которых выполнен в виде осесимметричной щели [1, 2]. Выбор такой геометрии объясняется попыткой уменьшить аспирационные ошибки, возникающие за счет изменения направления ветра. Кроме того, щелевой вход позволяет создавать устройства с большим объемным расходом пробы. Вместе с тем данные об эффективности аспирации для щелевых пробоотборников практически отсутствуют.

Опубликованные разрозненные экспериментальные результаты [3, 4] трудно использовать для выбора параметров пробоотборников или оценки их эффективности аспирации. Систематическое исследование характеристик щелевых пробоотборников требует большого количества трудоемких экспериментов. Целью настоящей работы является математическое моделирование и численное исследование аспирации аэрозольных частиц в щелевой пробоотборник из внешнего потока с помощью решения трехмерных уравнений Навье–Стокса.

В данной работе использовалась простейшая модель щелевого пробоотборника: два параллельно расположенных диска, в зазор между которыми отсасывается воздух. Такая модель позволяет исследовать влияние на эффективность аспирации следующих параметров: ширина зазора между дисками, диаметр диска, средняя расходная скорость воздуха во входном сечении пробоотборника и скорость набегающего потока.

Для того чтобы результаты исследований можно было применить для пробоотборников с различными разме-

рами и расходами воздуха, необходимо определить зависимость эффективности аспирации от критериев подобия. Эффективность аспирации ( $A$ ) и щелевой пробоотборник можно представить в виде следующей функции:

$$A = f(D, h, W, V, d_p, \mu, \rho, \rho_p), \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр пробоотборника (диска);  $h$  – расстояние между дисками (ширина зазора);  $W$  – скорость внешнего потока;  $V = Q/\pi Dh$  – средняя скорость во входном сечении пробоотборника;  $Q$  – расход воздуха через пробоотборник;  $d_p$  – аэродинамический диаметр частиц аэрозоля;  $\rho_p$  – плотность частиц;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\mu$  – вязкость воздуха.

В соответствии с  $\pi$ -теоремой подобия (см., например, в [5]) уравнение, связывающее между собой 9 физических величин, имеющих 3 независимых размерности (масса, длина, время), может быть преобразовано к уравнению, связывающему ( $9 - 3 = 6$ ) безразмерных критериев, составленных из этих величин. Следовательно, уравнение (1) может быть переписано следующим образом:

$$A = f(\text{Stk}, L, k, \text{Re}, \text{Re}_p), \quad (2)$$

где  $\text{Stk} = \rho_p d_p^2 W / 18 \mu h$  – число Стокса;  $\text{Re} = \rho h W / \mu$  – число Рейнольдса пробоотборника;  $\text{Re}_p = \rho d_p W / \mu$  – число Рейнольдса частицы;  $L = D/h$  – отношение характерных размеров пробоотборника;  $k = V/W$  – отношение скоростей.

Число  $\text{Re}$  определяет особенности обтекания пробоотборника внешним потоком. Характер сопротивления воздуха движению частицы определяется числом Рейнольдса частицы  $\text{Re}_p$ . Если последнее меньше единицы, то сопротивление воздуха удовлетворяет закону Стокса и не зависит от числа  $\text{Re}$ . В ряде экспериментальных и теоретических работ, посвященных пробоотбору в трубку [6, 7], показано, что влияние чисел  $\text{Re}$  и  $\text{Re}_p$  на эффективность аспирации мало. Исходя из этого, в данной работе в первую очередь исследовались зависимости эффективности аспирации от числа Стокса ( $\text{St}$ ) отношения скоростей ( $k$ ) и отношения размеров пробоотборника ( $L$ ).

## 2. Численный метод

Использовался численный метод, аналогичный тому, что был разработан в [8] для исследования аспирации в трубку. Процесс аспирации моделируется в два этапа. На первом этапе с помощью численного решения уравнений Навье–Стокса рассчитывалось поле скоростей воздуха в окрестности дисков и внутри зазора между ними. Течение воздуха принималось ламинарным, стационарным и несжимаемым. На втором этапе путем интегрирования уравнений движения частиц рассчитывались траектории отдельных частиц и эффективность аспирации.

Трехмерные уравнения Навье–Стокса решались с помощью оригинального конечно-разностного метода, основанного на концепции искусственной вязкости [9]. Расчетная область была разбита на контрольные объемы сеткой, построенной в цилиндрической системе координат, ось  $z$  которой совпадает с осью симметрии. Дальнейшие расчеты траекторий частиц проводились в декартовой системе, ось  $z$  которой совпадает с осью симметрии, ось  $x$  – параллельна скорости внешнего потока, а нулевая точка расположена между дисками на одинаковом от них расстоянии. Рассматриваемая задача имеет две плоскости симметрии:  $y = 0$  и  $z = 0$ . В силу этого расчет течения проводился в одной четвертой части исследуемой области, а потом в целом восстанавливался симметричным отображением полученного поля относительно указанных плоскостей.

На рис. 1 приведено сечение расчетной области в плоскости симметрии  $y = 0$ , а также показаны основные геометрические параметры. Расчетная область представляет собой цилиндр радиусом  $R$  и высотой  $H_0$ . Воздух с расходом  $Q$  отсасывается в зазор шириной  $h$  между дисками диаметром  $D$ . Выходной границей для отсасываемого потока является цилиндрическая поверхность радиусом  $r = 0,1D$ , расположенная между дисками.

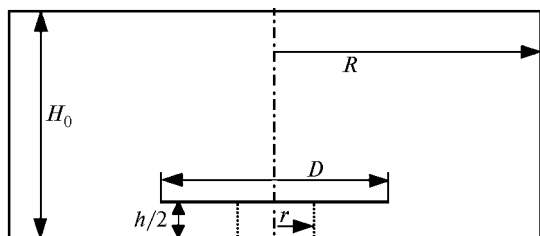


Рис. 1

Значения  $R$  и  $H_0$  выбирались достаточно большими, чтобы возмущения от пробоотборника не достигали внешних границ. Граничные условия на внешних границах расчетной области ставились в предположении, что влияние вязкости на течение вдали от трубки незначительно. На внешней и внутренней поверхности диска задавались условия равенства нулю скорости и градиента давления по нормали. На выходной границе внутри пробоотборника задавалось давление, обеспечивающее нужный расход отсасываемого воздуха, а компоненты скорости находились экстраполяцией их значений изнутри расчетной области.

Уравнения движения частиц, записанные в соответствии с законом Стокса, интегрировались с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка. Стартовые позиции траекторий выбирались в плоскости, перпендикулярной вектору скорости набегающего потока, расположенной достаточно далеко от пробоотборника, чтобы поток можно было считать невозмущенным. Считалось, что частица попала внутрь

пробоотборника, если она достигла внутри зазора поверхности цилиндра, диаметр которого равен  $D/3$ . Частицы, которые коснулись поверхности диска, считаются потерянными, т.е. отскок частиц и их вторичная аспирация не учитываются. Входное сечение зазора не может служить контрольной границей, поскольку инерционные частицы при определенных условиях могут пролететь зазор насквозь. Пусть  $S$  – площадь области стартовых позиций, из которых частицы попадают внутрь пробоотборника. Поточная концентрация частиц внутри пробоотборника равна отношению потока частиц через площадь  $S$  к объемному расходу воздуха через пробоотборник. Таким образом, по определению эффективности аспирации

$$A = WS/Q. \quad (4)$$

Площадь  $S$  вычислялась путем суммирования площадей элементарных ячеек, содержащих стартовые точки, из которых частицы попадали внутрь пробоотборника. Значение площади  $S$  уточнялось с помощью измельчения ячеек, расположенных вдоль границ определяемой области.

## 3. Результаты расчетов

Были проведены расчеты эффективности аспирации в пробоотборник со следующими параметрами:  $D = 0,1$  м,  $h = 0,01, 0,005$  м, расход воздуха  $Q = 0,02$  м<sup>3</sup>/с,  $V = 6,4$  и  $12,7$  м/с. Скорость внешнего потока  $W = 1, 2, 5, 7, 10, 15$  м/с.

В ходе предварительных расчетов были подобраны размеры расчетной области  $R = 0,3$  м и  $H_0 = 0,06$  м, дальнейшее увеличение которых не влияло на решение, а также оптимальное количество узлов сетки: 60 по радиальному направлению, 25 или 35 (для  $h = 0,01$  и  $0,005$  м соответственно) по оси  $z$  и 40 по углу. Все дальнейшие результаты получены при указанных параметрах области и сетки.

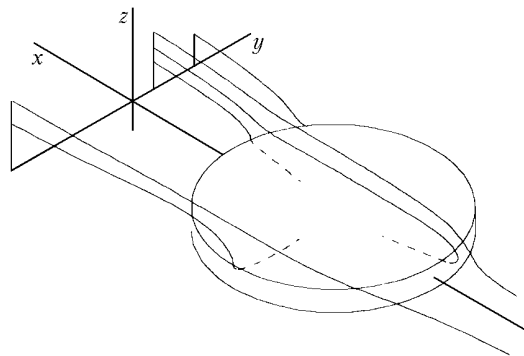


Рис. 2

На рис. 2 приведены в изометрии отдельные траектории частиц, рассчитанные для  $W = 2$  м/с и  $Stk = 0,01$ ,  $h = 0,01$  м. Расчеты показали, что частицы могут попадать в зазор с наветренной стороны или осаждаться на поверхности диска, или пролетать над диском и засасываться в зазор с подветренной стороны.



Рис. 3

На рис. 3 представлена область стартовых точек, из которых частицы попадают внутрь пробоотборника, рассчитанная для следующих параметров:  $Stk = 0,4$ ,  $W = 2$  м/с,  $h = 0,01$  м,  $D = 0,1$  м,  $k = 3,2$ . Для наглядности на указанную область нанесена проекция кольцевой щели. Следует обратить внимание на то, что область не является односвязной. Пробелы внутри области соответствуют стартовым позициям, из которых частицы не попадают внутрь пробоотборника, а осаждаются на внешнюю поверхность диска.

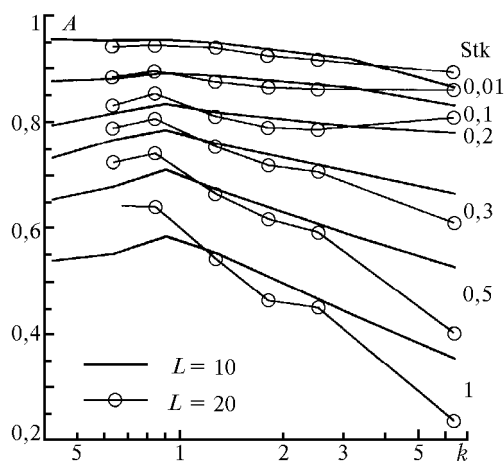


Рис. 4

Результаты расчетов зависимости эффективности аспирации от отношения скоростей  $k$  приведены на рис. 4. Видно, что значения эффективности аспирации  $A$ , рассчитанные для  $L=10$  и  $20$ , близки друг к другу при  $Stk \leq 0,1$ .

При этом  $A > 0,85$ . Таким образом,  $Stk \leq 0,1$  можно использовать в качестве критерия малости аспирационных искажений для исследованных значений  $D/h$ . Характер зависимости эффективности аспирации – один и тот же для всего диапазона  $Stk$ , а именно  $A$  достигает максимума при  $k \approx 1$ . При  $k > 1$  ( $W < V$ ) частицы начинают осаждаться на внешнюю поверхность диска, а при  $k < 1$  ( $W > V$ ) – проскакивать зазор насквозь, поэтому эффективность аспирации снижается, причем влияние этих эффектов зависит от отношения характерных размеров пробоотборника  $L$ .

Исследование зависимости эффективности аспирации от  $L$ , а также проверка достаточности использованных критериев подобия ( $Stk$ ,  $k$ ,  $L$ ) будут предметом дальнейших исследований.

1. Беляев С.П., Никифоров Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. McFarland A.R., Wedding J.B., Cermak J.E. // Atmos. Environ. 1977. V. 11. № 3. P. 535–539.
3. Липатов Г.Н., Шингарев Г.Л., Гринштун С.А., Сутугин А.Г. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. № 3. С. 320–324.
4. Кустов В.Т. // Труды Института экспериментальной метеорологии. 1984. № 7 (112). С. 87.
5. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
6. Беляев С.П., Левин Л.М. // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 20. С. 3–33.
7. Rader D.J. and Marple V.A. // Aerosol Sci. Technol. 1988. V. 8. P. 283–299.
8. Медведев А.А., Трусова Н.Н., Черный С.Г., Шаров С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 9. С. 1026–1030.
9. Грязин Ю.А., Черный С.Г., Шаров С.В., Шашкин П.А. // Доклады академии наук России. 1997. Т. 353. № 4. С. 478–483.

*A.A. Medvedev, N.N. Trusova, S.G. Cherny, S.V. Sharov. Numerical Study of Aerosol Particles Aspiration from Air Flow into the Annular Slot Sampler.*

Aspiration efficiency of aerosol into the annular slot inlet has been calculated using a numerical solution of three-dimensional Navier-Stokes equations. The aspiration efficiency has been presented as a function of the following similarity criteria, i.e., the Stokes number, flow velocities ratio, ratio of the sampler characteristic dimensions. The results of calculations can be used for estimation of the aspiration errors and a choice of the sampler optimal parameters.