

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСПИРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ТОНКОСТЕННУЮ ТРУБКУ, ОРИЕНТИРОВАННУЮ ПОД ПРЯМЫМ УГЛОМ К ПОТОКУ

С помощью численного решения трехмерных уравнений Навье–Стокса и уравнений движения частиц рассчитаны значения эффективности аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку из поперечного к ней потока. Проведено сравнение результатов расчетов с опубликованными полуэмпирическими формулами.

1. Введение

Для анализа аэрозолей, в том числе атмосферных, широко используются контактные методы, связанные с необходимостью отбора проб частиц внутрь различных приборов. При этом возникают искажения дисперсного состава исходного аэрозоля, которые могут намного превышать ошибки используемых приборов. Основными источниками искажений являются отклонения траекторий частиц от линий тока воздуха вследствие инерции, отскок частиц от внешних поверхностей зонда, осаждение частиц во внутреннем тракте пробоотборника. Мерой искажения дисперсного состава аэрозоля при пробоотборе является эффективность аспирации, $A = c/c_0$, где c , c_0 – средние поточные концентрации данной фракции аэрозоля внутри зонда и в невозмущенном потоке соответственно.

Определению ошибок аспирации в простейший зонд – цилиндрическую трубку – посвящено большое количество работ (см., например, обзор в [1]), однако для многих случаев, в частности для пробоотбора в трубку, ориентированную под произвольным углом к внешнему потоку, до сих пор не получено надежных данных, которые можно было бы использовать для выбора конструктивных параметров и рабочих режимов пробоотборников, а также для определения ошибок аспирации из турбулентной атмосферы. Полуэмпирические соотношения, полученные в [1–4] на основе экспериментальных данных, не перекрывают весь диапазон возможного изменения определяющих параметров и плохо согласуются друг с другом. Экспериментальные исследования процесса аспирации, в основном, были выполнены методом сравнения, когда эффективность аспирации определялась как отношение поточных концентраций монодисперсного аэрозоля, измеренных исследуемым и эталонным зондами. Следует отметить, что указанный метод имеет довольно большую степень неопределенности из-за различных возможных вариантов поведения частиц при контакте с внешними и внутренними поверхностями трубки: частицы могут прилипнуть, катиться, сдуваться, от-

скакивать, дробиться. Таким образом, измеренная концентрация частиц будет зависеть от физико-химических свойств частиц и поверхностей трубки. Возможно, указанными факторами вызван большой разброс, характерный для данных, полученных с помощью метода сравнения.

В работах [5–6] процесс аспирации в трубку, ориентированную параллельно набегающему потоку (соосный пробоотбор), исследовался с помощью метода предельных траекторий, в котором оптическими методами определялись траектории частиц, замыкающиеся на торцевых кромках зонда и ограничивающие область частиц, входящих в него. При этом измерялась эффективность внешней аспирации $A_e = c_e/c_0$, где c_e – средняя поточная концентрация частиц данной фракции на входе в зонд, которая близка к полной эффективности аспирации A , когда влияние отскока и вторичной аспирации частиц, а также их осаждения внутри трубки незначительно. В случае, когда направление потока не параллельно оси, сечение трубки предельных траекторий имеет сложную форму и экспериментально измерить его площадь очень трудно (таких работ пока нет). Кроме того, в этом случае необходимо учитывать прямое осаждение частиц внутри трубки.

Исследование с помощью численных методов позволяет учитывать влияние различных факторов. В частности, можно рассчитать эффективность аспирации для следующих предельных случаев: все частицы, коснувшиеся твердой стенки, не попадают в пробу или частицы испытывают упругое отражение от стенки. Однако для точного учета возникающих в потоке особенностей, таких как отрывы и вихри, необходимо использовать модель, учитывающую вязкие эффекты. В трехмерном случае это связано с большими вычислительными трудностями. Поэтому до сих пор численное моделирование аспирации с использованием уравнений Навье–Стокса проводилось только для двумерных случаев, таких как соосный пробоотбор [7, 8].

В настоящей статье с помощью решения трехмерных уравнений Навье–Стокса проводится числен-

ное моделирование пробоотбора в тонкостенную трубку, ориентированную под прямым углом к внешнему потоку. Рассчитывались эффективности внешней и полной аспирации при условии, что все частицы, коснувшиеся твердой стенки, не попадают в пробу.

2. Численный метод

Предполагается, что концентрация частиц в потоке воздуха низкая и они не оказывают заметного влияния на течение воздуха, которое принимается ламинарным, стационарным и несжимаемым. Процесс аспирации моделируется в два этапа. На первом этапе с помощью численного решения уравнений Навье–Стокса рассчитывается поле скоростей воздуха в окрестности трубки и внутри нее. На втором этапе путем интегрирования уравнений движения частиц рассчитываются траектории отдельных частиц и эффективности аспирации.

Трехмерные уравнения Навье–Стокса решаются с помощью оригинального конечно-разностного метода, основанного на концепции искусственной сжимаемости [9]. Расчетная область разбита на контрольные объемы сеткой, построенной в цилиндрической системе координат, ось z которой совпадает с осью симметрии. Дальнейшие расчеты скоростей воздуха в узлах сетки, а также траекторий частиц проводятся в декартовой системе.

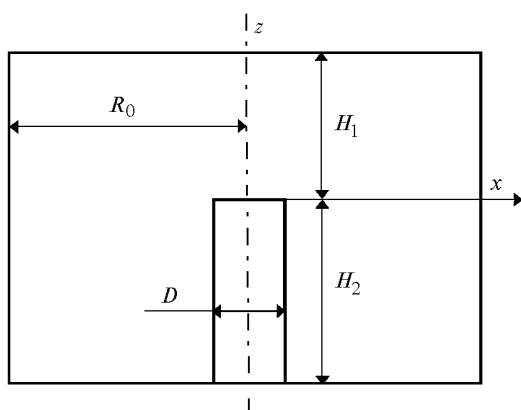


Рис. 1. Расчетная область

На рис. 1 приведено сечение расчетной области в плоскости оси симметрии трубки, а также показаны основные геометрические параметры: D – диаметр трубки; R_0 – радиус внешней боковой границы; H_1 и H_2 – расстояния от входной кромки трубки до верхней и нижней внешних границ расчетной области соответственно. Значения R_0 , H_1 и H_2 выбираются достаточно большими, чтобы возмущения от трубки не достигали внешних границ. Граничные условия на внешних границах ставятся в предположении, что влияние вязкости на течение вдали от трубки незначительно. На внешней и внутренней поверхности трубки задаются условия равенства нулю скорости и градиента давления по нормали к стенке. На выход-

ном сечении трубки задается давление, обеспечивающее нужный расход воздуха через пробоотборник, а компоненты скорости экстраполируются на него из расчетной области.

Траектории частиц рассчитываются путем решения уравнений движения, записанных в соответствии с законом Стокса:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C} (\mathbf{v} - \mathbf{u}), \quad (1)$$

где m , d_p – масса и диаметр частицы; \mathbf{v} – вектор скорости воздуха; \mathbf{u} – вектор скорости частицы; μ – вязкость воздуха; C – поправка Каннинггема на молекулярное скольжение. Используя диаметр отверстия трубки D и скорость внешнего потока W в качестве характерных длины и скорости, уравнение (1) можно записать в безразмерном виде:

$$\text{St} \frac{d\mathbf{u}'}{dt'} = \mathbf{v}' - \mathbf{u}', \quad (2)$$

где $\text{St} = \rho_p C d_p^2 W / 18\mu$ $D = \tau W / D$ – число Стокса; $\mathbf{v}' = \mathbf{v} / W$, $\mathbf{u}' = \mathbf{u} / W$, $t' = tW / D$ – безразмерные скорости воздуха, частицы и время; τ – время релаксации частицы.

Следуя [1–4], эффективность аспирации будем рассматривать как функцию трех безразмерных переменных, а именно числа Стокса St , коэффициента анизокинетичности $R = W / V_0$, где V_0 – средняя скорость воздуха в трубке, и угла α между направлением внешнего потока и осью трубки. Вследствие нарушения ламинарности обтекания потоком трубки, а также отклонений от закона Стокса сопротивления воздуха движению частиц, эффективность аспирации может зависеть от абсолютных значений размеров трубки и частиц, а также скоростей потоков воздуха. Кроме того, при определенных условиях на процесс аспирации может влиять гравитационное оседание частиц. Данные вопросы требуют дополнительных исследований, которые будут проведены в следующих работах.

Уравнение (2) интегрируется с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка. Стартовые позиции траекторий находятся в плоскости, перпендикулярной вектору скорости набегающего потока, расположенной достаточно далеко от трубки, чтобы поток можно было считать невозмущенным. Пусть S_e – площадь области стартовых позиций, из которой частицы попадают во входное отверстие трубки, а S – площадь области, из которой частицы пролетают внутрь трубки на расстояние два диаметра трубки, не коснувшись стенки. Тогда эффективность внешней аспирации

$$A_e = \frac{c_e}{c_0} = \frac{4W S_e}{\pi D^2 V_0}. \quad (3)$$

Заменив в выражении (3) S_e на S , получим эффективность полной аспирации A .

Поскольку форма указанных областей, как будет показано ниже, достаточно сложна, площади S , S_e вычислялись простым суммированием площадей элементарных ячеек, содержащих стартовые точки:

$$S = \sum_{i=1}^I \delta S_i K_i, \quad (4)$$

где δS_i – площадь i -й ячейки ($i = 1, \dots, I$), на которые разбита вся область стартовых позиций частиц. Каждой ячейке соответствует единственная траектория. При этом $K_i = 0$, если частица пролетела мимо трубки или коснулась стенки; $K_i = 1$, если частица попала во входное отверстие или на заданное расстояние внутрь трубки. Для экономии времени и повышения точности расчетов значения S или S_e последовательно уточнялись путем измельчения ячеек, расположенных вдоль границ указанных областей.

3. Результаты расчетов

Были проведены расчеты эффективности аспирации в трубку с диаметром $D = 0,01$ м при скорости внешнего потока $W = 5$ м/с. Соответствующее этим параметрам число Рейнольдса трубки имело значение $Re = WD/\nu = 3450$, где ν – кинетическая вязкость воздуха. При этом средняя скорость отсоса воздуха в трубке V_0 изменялась в диапазоне от 1,7 до 20 м/с, а число St – от 0,01 до 0,4, что для данных значений D и W соответствует диапазону размеров частиц $d_p = 2,5 \cdot 10^{-6} \div 16 \cdot 10^{-6}$ м.

В ходе предварительных расчетов были подобраны значения $R_0 = 18D$, $H_1 = 10D$ и $H_2 = 10D$, дальнейшее увеличение которых не влияло на получаемое решение. Также расчеты на последовательности сеток позволили выбрать оптимальное количество узлов общей сетки: 54 – по радиальному направлению, 47 – по высоте области (ось z) и 20 – по углу. Все дальнейшие результаты получены при указанных размерах области и сетки.

На рис. 2 приведены в изометрии отдельные траектории частиц для $V_0 = 10$ м/с и числа Стокса $St = 0,1$.

На рис. 3 представлена область стартовых точек, из которой частицы попадают во входное сечение трубки при $V_0 = 20$ м/с и $St = 0,3$. Для сопоставления

размеров на приведенную область спроецирован контур трубки. Следует обратить внимание на узкие полосы стартовых точек, расположенных на некотором расстоянии от сечения основной трубки траекторий. Их появление можно объяснить тем, что при большом значении V_0 частицы могут засасываться в трубку, разворачиваясь у ее подветренной стороны. При этом частицы, траектории которых располагаются ближе к отверстию, могут не «вписаться» в поворот и осесть на внешней поверхности стенки.

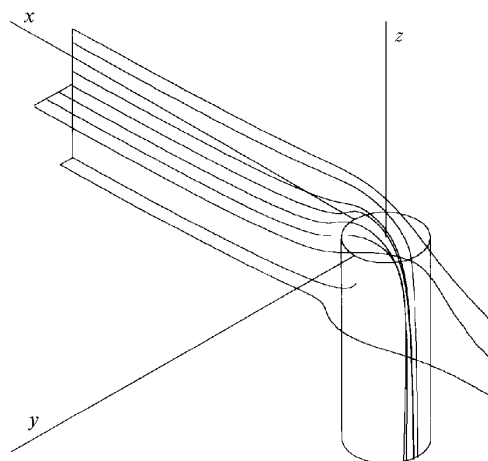


Рис. 2. Траектории частиц

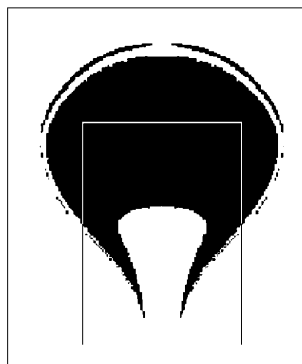


Рис. 3. Область стартовых точек, из которой частицы попадают во входное сечение трубки

Результаты расчетов эффективности аспирации приведены в таблице.

Рассчитанные значения эффективности внешней A_e и полной A аспирации в зависимости от числа Стокса St и коэффициента анизокинетичности R

St	R											
	2,9		1,7		1		0,5		0,36		0,25	
	A_e	A	A_e	A	A_e	A	A_e	A	A_e	A	A_e	A
0,01	0,865	0,849	0,888	0,876	0,984	0,981	0,976	0,976	0,951	0,951	0,938	0,938
0,02	0,790	0,771	0,835	0,819	0,943	0,936	0,951	0,951	0,932	0,932	0,923	0,923
0,05	0,575	0,535	0,668	0,631	0,828	0,806	0,874	0,874	0,868	0,868	0,867	0,867
0,07	0,452	0,387	0,566	0,495	0,747	0,702	0,822	0,822	0,824	0,824	0,825	0,825
0,10	0,307	0,206	0,421	0,274	0,631	0,497	0,744	0,742	0,757	0,757	0,763	0,763
0,20	0,100	0,016	0,148	0,020	0,299	0,021	0,507	0,019	0,553	0,135	0,585	0,269
0,30	0,036	0,000	0,073	0,003	0,139	0,003	0,332	0,003	0,398	0,006	0,450	0,082
0,40	0,004	0,000	0,044	0,000	0,084	0,001	0,221	0,001	0,293	0,002	0,378	0,049

Далее было проведено сравнение результатов расчетов со следующими опубликованными данными

ми. В [4] авторы на основе своих экспериментальных данных вывели для эффективности аспирации в ци-

цилиндрическую трубку, расположенную под углом α к набегающему потоку, полуэмпирическое соотношение

$$A = 1 + 3(R \cos \alpha - 1) St^{\sqrt{R}}, \quad (5)$$

где $0,02 \leq St \leq 0,2$; $0,5 \leq R \leq 2$; $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

В работе [1] получено следующее соотношение:

$$A = 1 + \left[1 - \frac{1}{1 + G(\alpha) St(\cos \alpha + 4\sqrt{R \sin \alpha})} \right] (R \cos \alpha - 1), \quad (6)$$

которое для $\alpha = 90^\circ$ упрощается и, с учетом значения коэффициента $G = 2,1$, полученного автором в результате анализа опубликованных экспериментальных данных, имеет вид

$$A = 1 / (1 + 8,4 St \sqrt{R}). \quad (7)$$

На рис. 4 представлены зависимости эффективности аспирации от числа St при различных значениях параметра R , полученные по формулам (5) и (7) (сплошные линии), а также значения внешней эффективности аспирации, рассчитанные предложенным в работе методом (символы). Видно, что рассчитанные данные удовлетворительно согласуются с формулой (5) при $R = 1,7$ и 1 , т.е. при малых скоростях отсоса $V_0 = 3$ и 5 м/с. При $R = 0,5$ и $V_0 = 10$ м/с совпадение значительно хуже. Возможно, это связано с тем, что на экспериментальные данные, аппроксимированные формулой (5), повлияла вторичная аспирация, т.е. втягивание в трубку частиц, отскочивших от ее внешней поверхности. Этот эффект обычно проявляется при больших значениях скорости воздуха на входе в трубку и при малых R , когда воздух в трубку засасывается из широкой пространственной области. В расчетах частицы, коснувшиеся поверхности трубки, считались потерянными. Качественно результаты расчетов согласуются и с формулой (7), которая, с одной стороны, выведена на основе теоретической модели, не учитывающей вторичную аспирацию, а с другой – включает в себя коэффициент G , полученный из большой совокупности экспериментальных данных, на которые, возможно, повлияла вторичная аспирация. Таким образом, учитывая большой разброс экспериментальных данных и трудности их интерпретации, лучшего совпадения с результатами расчетов нельзя было и ожидать. Возможно, экспериментальная проверка предложенной математической модели потребует более высокого уровня проведения экспериментов.

ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэриобиологии, Новосибирская область
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Поступила в редакцию
4 февраля 1998 г.

A.A. Medvedev, N.N. Trusova, S.G. Cherny, S.V. Sharov. Numerical Study of Aspiration of Aerosol Particles into Thin-Walled Tube Oriented at Right Angle to Flow.

Efficiencies of aerosol aspiration into thin-walled tube at right angle to flow are calculated with the help of numerical solution of three-dimensional Navier-Stokes equations and particle motion equations. The calculated values are compared with the published semi-empirical equations.

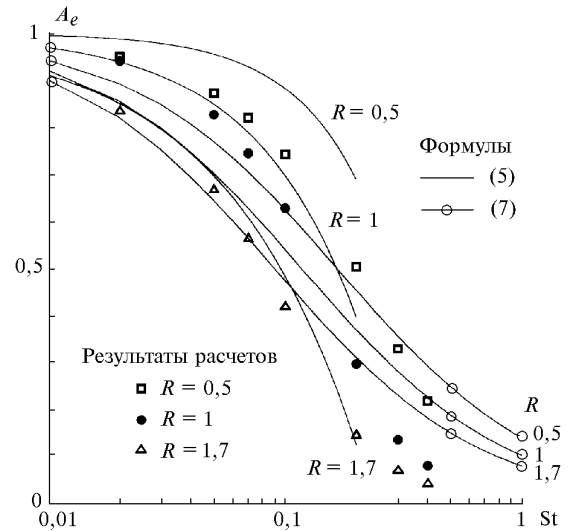


Рис. 4. Результаты расчетов эффективности внешней аспирации

4. Заключение

Таким образом, в данной статье предложен численный метод, с помощью которого рассчитаны значения эффективностей внешней и полной аспирации для тонкостенной трубки, ориентированной под углом 90° к потоку. Поскольку результаты расчетов представлены в виде функции от безразмерных переменных St и R , они могут применяться для коррекции результатов и выбора рабочих режимов различных пробоотборных трубок. Предложенный численный метод применим и для исследования более общего случая – аспирации из произвольно ориентированного потока.

Данная работа частично финансировалась РФФИ (грант 96-01-01934) и РФФИ-ИНТАС (грант 95-1149).

1. Vincent J.H. Aerosol Sampling: Science and Practice, New York: Wiley, 1989. 385 p.
2. Лактионов А.Г. // Труды ИПГ. 1973. Вып. 7. С. 83–87.
3. Durham M.D., Lundgren D.A. // J. Aerosol Sci. 1980. V. 11. N 2. P. 179–188.
4. Hangal S., Willeke K. // Atmos. Environ. 1990. V. 24. N 9. P. 2379–2386.
5. Беляев С.П., Левин Л.М. // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 20. С. 3–33.
6. Lipatov G.N., Grinshpun S.A., Shingaryov G.L., Sutugin A.G. // J. Aerosol Sci. 1986. V. 17. N 5. P. 763–769.
7. Rader D.J. and Marple V.A. // Aerosol Sci. & Technol. 1988. N 8. P. 283–299.
8. Liu B.Y.H., Zhang Z.Q., Kuehn T.H. // J. Atmos. Sci. 1989. V. 20. № 3. P. 367–380.
9. Грязин Ю.А., Черный С.Г., Шаров С.В., Шапкин П.А. // Доклады Академии наук России. 1997. Т. 353 № 4. С. 478–483.