

А.А. Медведев, В.С. Топорков

Численное исследование отбора проб аэрозольных частиц из высокоскоростных потоков воздуха

ГНЦ ВБ «Вектор», НИИ аэриобиологии, пос. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Отбор проб аэрозольных частиц из высокоскоростных потоков воздуха моделировался с помощью численного решения уравнений Навье – Стокса. Проведено численное исследование влияния коаксиального экрана, установленного вокруг входной части пробоотборной трубки, а также толщины стенок трубки на величину аспирационных искажений дисперсного состава аэрозоля. На основании результатов расчетов разработана схема устройства для отбора проб аэрозольных частиц и разделения их на две фракции по размеру. Результаты работы могут быть использованы при создании авиационных пробоотборников для исследований аэрозольных частиц в атмосфере.

Введение

Исследования дисперсного состава, физических, химических и биологических свойств частиц атмосферного аэрозоля являются актуальными для экологии, медицины, метеорологии, климатологии. Отбор проб атмосферных аэрозолей обычно производится с помощью пробоотборников, установленных на самолете. При этом частицы засасываются в трубку, обращенную навстречу высокоскоростному потоку воздуха. Перед входным отверстием поток тормозится, поскольку скорость воздуха в трубке меньше, чем скорость потока. Вследствие инерции частицы не могут следовать за несущим их потоком и проскакивают в трубку. Следовательно, концентрация частиц в пробе больше, чем в окружающем воздухе, причем коэффициент увеличения зависит от размера частиц. Если нас интересует истинное распределение атмосферных частиц по размерам в широком диапазоне, то пробоотборник нужно сконструировать так, чтобы влияние указанного эффекта уменьшилось. С этой целью впереди и вокруг трубки можно установить цилиндрический экран, который будет плавно тормозить поток, а кроме того, сглаживать его поперечные пульсации [1].

С другой стороны, исследователей могут интересовать частицы в определенном диапазоне размеров, например меньше 10 или 2,5 мкм. При этом обычно используется какое-нибудь устройство для разделения частиц на фракции, например импактор, установленный последовательно с пробоотборником. В процессе отбора проб воздух сначала тормозится на входе в трубку, а затем вновь ускоряется в импакторе. Это приводит к потерям частиц и дополнительным затратам энергии. Возможно, более рационально разделять частицы на фракции одновременно с отбором проб аэрозоля. Однако в настоящее время такого устройства не существует.

Известен противоточный виртуальный импактор [2], в котором из трубки навстречу внешнему потоку выдувается воздух, который препятствует проникновению в трубку мелких частиц, т.е. данное устройство обеспечивает отбор частиц только крупнее некоторого порогового размера.

Цель данной работы – численное исследование процесса аспирации из высокоскоростного потока воздуха и разработка схемы устройства для одновременного отбо-

ра проб и разделения частиц на фракции в соответствии с их размером.

Численный метод

Процесс аспирации частиц аэрозоля моделировался в два этапа. Сначала с помощью численного решения уравнений Навье – Стокса, записанных в переменных «вихрь – функция тока», рассчитывалось поле скоростей воздуха на входе в пробоотборник. Уравнения решались численно с помощью конечно-разностного итерационного метода Гаусса – Зейделя [3]. Было принято допущение, что внешний поток направлен параллельно оси трубки, а его скорость не превышает 100 м/с, т.е. сжимаемостью воздуха можно пренебречь. Для лучшей аппроксимации конечно-разностная сетка имела неравномерный шаг со сгущением вблизи стенок и входных отверстий, где градиенты скорости и давления максимальны.

Уравнения движения частиц, записанные в соответствии с законом Стокса, интегрировались в полученном поле скоростей воздуха с помощью метода Рунге – Кутты четвертого порядка. При этом рассчитывались траектории и потоки частиц, входящих в трубку без соприкосновения с ее стенками или ударяющихся о внутреннюю поверхность стенки. Эффективность аспирации, определенная как отношение концентрации частиц внутри трубки к их концентрации в невозмущенном воздухе, рассчитывалась с помощью соотношения $A = S/S_0$, где S – площадь области в невозмущенном потоке, из которой частицы проникают внутрь трубки; $S_0 = Q/W$ – площадь области, из которой воздух засасывается в трубку с объемным расходом Q ; W – скорость внешнего потока воздуха. Аналогично рассчитывается коэффициент осаждения частиц на внутреннюю стенку трубки.

Аспирация частиц в трубке

Численное исследование аспирации аэрозольных частиц в тонкостенную трубку было проведено для следующих параметров: диаметр трубки $D = 1$ см, средняя скорость воздуха на входе в трубку $V = 2$ м/с, скорость набегающего потока $W = 100$ м/с. На рис. 1, а, б представлены рассчитанные линии тока воздуха на входе в трубку и траектории частиц с диаметром $d_p = 4$ мкм. Видно, что линии

тока воздуха вблизи входа в трубку резко расширяются, что приводит к осаждению значительной доли частиц на внутреннюю стенку трубки. Для того чтобы плавно затормозить поток перед входом в трубку и выровнять поперечные флуктуации потока, входной участок трубки можно окружить цилиндрическим экраном [1].

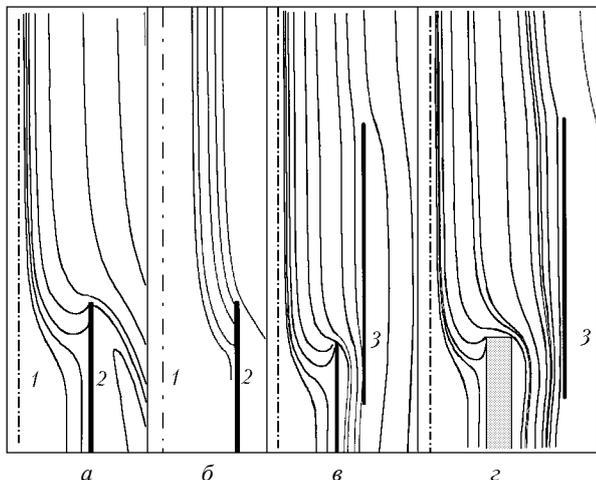


Рис. 1. Поля течения воздуха (а, в, г) и траектории частиц (б); 1 – ось симметрии; 2 – стенка трубки; 3 – экран

На рис. 1, в, г представлены линии тока воздуха, рассчитанные для двух вариантов трубки с экраном.

На рис. 2 показаны зависимости эффективности аспирации от диаметра частиц, рассчитанные для трубок с различной толщиной стенки при различных предположениях о характере взаимодействия частиц и поверхности стенки: частицы, коснувшись внутренней стенки трубки, отскакивают и засасываются в пробоотборник или прилипают и, следовательно, не учитываются как отобранные.

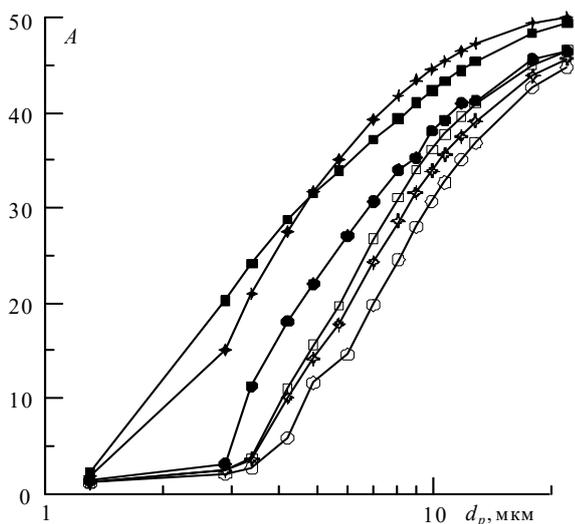


Рис. 2. Эффективности аспирации для различных конфигураций пробоотборника, рассчитанные при следующих предположениях: частицы, коснувшись внутренней поверхности трубки, считаются 1) – попавшими в пробу: ■ – тонкостенная трубка; ♦ – тонкостенная трубка с экраном; ● – толстостенная трубка с экраном, и 2) – потерянными: □ – тонкостенная трубка; ☆ – тонкостенная трубка с экраном; ○ – толстостенная трубка с экраном

Видно, что для всех рассчитанных вариантов эффективность аспирации возрастает с размером частиц и стремится к предельной величине, равной отношению скорости внешнего потока к средней скорости воздуха на входе в трубку. Установка экрана для тонкостенной трубки приводит к тому, что эффективность аспирации, рассчитанная с учетом частиц, коснувшихся внутренней поверхности трубки, несколько снижается для малых частиц, но для частиц с диаметром больше 5 мкм возрастает.

Эффективность аспирации, рассчитанная в предположении, что частицы, коснувшись внутренней поверхности трубки, не учитываются, снижается для всех диаметров частиц. Это можно объяснить тем, что из-за влияния экрана на поток перед входным отверстием движется более прямолинейно и доля крупных частиц, попавших в устройство, повышается, однако многие из них далее касаются внутренней стенки трубки и учитываются в разных вариантах расчетов по-разному. Повышение толщины стенки трубки до 0,25 см приводит к тому, что поток внутри экрана тормозится перед ее торцом, а это приводит к дополнительному снижению эффективности аспирации.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что сочетание экрана с толстостенной трубкой обеспечивает наименьшие искажения дисперсного состава частиц.

Селективный пробоотборник

Далее была разработана схема и проведено численное исследование устройства для одновременного отбора проб аэрозоля из высокоскоростного потока и их одновременно-го разделения на фракции.

Линии тока воздуха и траектории частиц, рассчитанные для аспирации в трубку, показывают, что во входном участке трубки поток воздуха разделяется на две части, меньшая из которых поступает дальше в трубку, а большая разворачивается и выходит обратно. При этом скорость воздуха направлена к стенке, что вызывает осаждение частиц определенных размеров, поскольку крупные частицы пролетают по инерции внутрь трубки, а мелкие вместе с потоком выносятся наружу. На основе этого наблюдения была предложена схема, показанная на рис. 3, а.

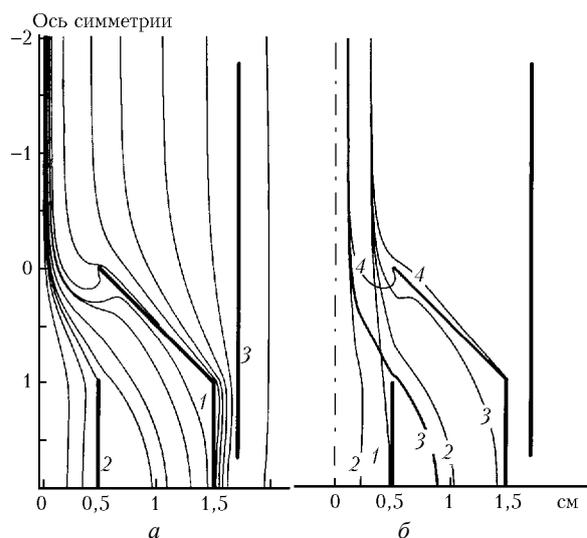


Рис. 3. Схема селективного пробоотборника и поле течения воздуха (а): 1 – корпус; 2 – трубка; 3 – экран; траектории частиц со следующими диаметрами (б): 1 – 8; 2 – 5,7; 3 – 4,3; 4 – 1,8 мкм

Устройство состоит из корпуса 1, входная часть которого выполнена в виде усеченного конуса. Внутри корпуса коаксиально установлена трубка 2. Диаметр трубки должен быть больше или равен диаметру входного отверстия корпуса. Входная часть корпуса может быть окружена цилиндрическим экраном 3.

Большая часть воздуха (80%), поступающего в устройство, вместе с мелкими частицами отсасывается в зазор между трубкой 2 и внутренней поверхностью корпуса 1, а оставшая часть воздуха вместе с крупной фракцией частиц выводится через трубку 2.

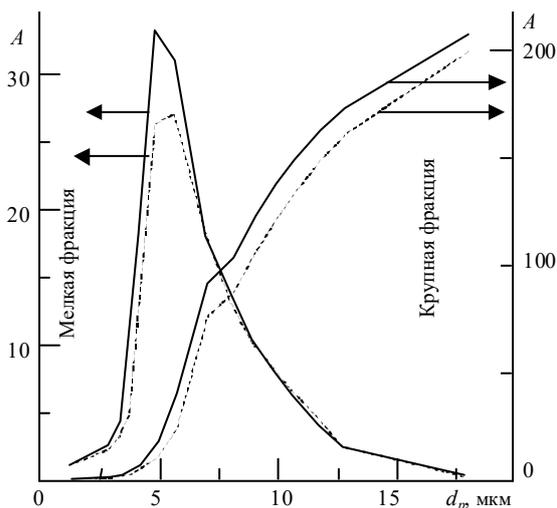


Рис. 4. Эффективность аспирации крупной и мелкой фракций частиц, рассчитанная для селективного пробоотборника: — устройство с экраном; - - - устройство без экрана

Расчеты проводились для следующих параметров: диаметр трубки и входного отверстия корпуса 1 см, диаметр цилиндрической части корпуса 3 см, расстояние от сечения входного отверстия до среза трубки 1 см, длина конического участка корпуса вдоль оси 1 см, средняя скорость воздуха на входе в трубку 2 м/с, скорость внешнего потока 100 м/с. Рассчитанное поле потока воздуха вблизи и внутри устройства

показано на рис. 3,а. Траектории частиц различного диаметра представлены на рис. 3,б.

Видно, что крупные частицы (5,7 и 8 мкм) попадают в трубку 2, мелкие частицы (1,8 мкм) оседают на внешней поверхности конической части корпуса 1, а средние частицы (4,3 и 5,7 мкм) отсасываются в зазор между трубкой 2 и корпусом 1. Эффективности аспирации частиц крупной и мелкой фракции в зависимости от размера частиц для двух вариантов пробоотборника (без экрана и с экраном) показаны на рис. 4.

Видно, что пробоотборник позволяет выделять две фракции частиц: в диапазонах 1–15 и больше 5 мкм. Результаты расчетов показали также, что установленный вокруг входной части корпуса экран заметно увеличивает эффективность аспирации частиц мелкой фракции за счет эффекта выравнивания и поджатия потока к оси устройства перед входным отверстием, который отмечался выше для трубки.

Заключение

Проведенные численные исследования показали, что искажения дисперсного состава, возникающие при отборе проб аэрозольных частиц, могут быть уменьшены путем увеличения толщины стенки трубки и установки цилиндрического экрана перед ее входом.

На основе результатов расчетов предложена схема устройства, позволяющего одновременно отбирать частицы аэрозоля из высокоскоростных потоков и разделять их на две фракции по размеру. Выбор оптимальных геометрических параметров устройства, а также моделирование пробоотбора при более высоких скоростях, где необходимо учитывать сжимаемость воздуха, могут быть предметом дальнейших исследований.

1. *Twohy C.H.* Model calculations and wind tunnel testing of an isokinetic shroud for high-speed sampling // *Aerosol Sci. And Technol.* 1998. V. 29. № 4. P. 261–280.
2. *Lin H., Heintzenberg J.* A theoretical study of the counterflow virtual impactor // *J. Aerosol Sci.* 1995. V. 26. № 6. P. 903–914.
3. *Численные методы исследования течений вязкой жидкости /* Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольфштейн М. М.: Мир, 1972. 328 с.

A.A. Medvedev, V.S. Toporkov. Numerical study of aerosol particles sampling from high-velocity flows.

Sampling of aerosol particles from high-velocity flows was modeled with the help of numerical solution of Navier – Stokes equations. Effects of a coaxial shield mounted around the sampling tube inlet and influence of the tube wall width on aspiration distortions of aerosol dispersion composition have been studied. Based on the results of calculations, a scheme of device is developed for sampling and separation of aerosol particles into two fractions. The results of work can be used in development of samplers for aircraft studies of atmospheric aerosols.