

УДК 551.508.95

Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Ковалевский В. К.

Изокинетический заборник воздуха и результаты его натурных испытаний

Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Ковалевский В. К.

Изокинетический заборник воздуха и результаты его натурных испытаний

Б. Д. Белан*, Д. К. Давыдов*, В. К. Ковалевский*

Описывается изокинетический заборник аэрозольных частиц, который позволяет существенно уменьшить ошибки измерений. Сопоставление его с обычно применяемым на сети станций показывает, что из-за невыполнения условия изокинетичности ошибки при определении массовой концентрации взвешенных частиц могут составлять от 3 до 20 раз.

Одним из основных загрязняющих воздух компонентов является атмосферный аэрозоль или взвешенные вещества. В составе частиц атмосферного аэрозоля, особенно антропогенного происхождения, обычно присутствуют такие токсичные вещества, как бензопирен, тяжелые металлы, сульфаты, нитраты и т. п. Поэтому в системах экологического мониторинга ведется постоянный контроль этого компонента воздуха. Для измерения характеристик аэрозоля применяется широкий набор методов и средств. Достаточно подробный их перечень приведен в [5]. Однако ключевым моментом в изучении свойств аэрозоля является корректный отбор проб частиц воздуха (аспирация), на что обращал внимание еще Н. А. Фукс [7]. Дело в том, что в зависимости от своего размера частицы по-разному увлекаются воздушными потоками и поэтому могут не попадать в измерительный объем прибора или обходить подложку или фильтр. Сравнение показаний 17 одновременно экспонируемых приборов, выполненное в [8], показало, что из-за неправильной аспирации аэрозоля их отсчеты различались до 25 раз. Следовательно, без организации корректного отбора проб говорить о надежности данных о концентрации аэрозоля не приходится. Наиболее совершенный изокинетический заборник описан в [4]. Большим его достоинством является отсутствие побудителя расхода. Однако в ряде случаев и этот заборник не позволит корректно провести отбор аэрозоля. Это относится к условиям штиля и к тем случаям, когда отбор необходимо производить при заданном расходе воздуха [5].

Все вышеизложенное послужило причиной для разработки устройства, лишенного отмеченных недостатков. Оно описывается в данной статье.

Конструкция изокинетического заборника аэрозоля приведена на рис. 1. Видно, что заборник состоит из сопла переменного сечения, изменение площади которого от 30 до $1,5 \text{ см}^2$ обеспечивается подвижной заслонкой 2. Положение заслонки определяется с помощью датчика, а ее перемещение

* Институт оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук.

осуществляется электроприводом 3 через редуктор. Сопло соединено с вращающейся колонкой 4, которая одновременно является воздуховодом 1. Колонка 4 обеспечивает перпендикулярность площади сопла набегающему потоку посредством электропривода 5 с редуктором. О направлении, по которому производится отбор аэрозоля, можно судить с помощью датчика угла колонки 5. Измерительный объем представляет собой разъемное соединение, в которое вставляется измерительный прибор или фильтр. Расход воздуха через измерительное средство контролируется с помощью ротаметра, дополненного стабилизатором расхода [3]. Разрешение на выходе устройства обеспечивается побудителем расхода, в качестве которого чаще всего используется обычный бытовой пылесос [1, 2, 6].

Работу заборника рассмотрим с помощью блок-схем, приведенных на рис. 2. В зависимости от решаемой задачи (отбор проб на фильтры, измерение счетной концентрации частиц, их дисперсного состава и т. п.) расход воздуха через заборник может изменяться от 0,1 до 25 м³/ч [6]. Поэтому в заборниках следует иметь побудители, управляющие расходом. В данном конкретном случае при наличии такого побудителя нами установлен фиксированный расход воздуха 10 м³/ч — наиболее часто встречающаяся величина. Этот расход обеспечивается при полностью поднятой заслонке с помощью схемы авторегулирования, изображенной на рис. 2a [3].

Видно, что на контрольный поплавок ротаметра 2 направляется поток света от осветителя 1. Положение поплавка ротаметра фиксируется фотоприемниками 3, сигнал от которых через дифференциальный усилитель 4 подается на регулятор расхода 5 и побудитель расхода 6. Схема тривиальна и в основных комментариях не нуждается.

Для работы настоящего заборника необходимы сведения о скорости и направле-

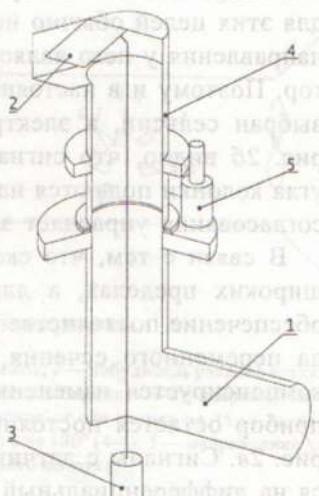


Рис. 1. Конструкция заборника.

Пояснения приведены в тексте.

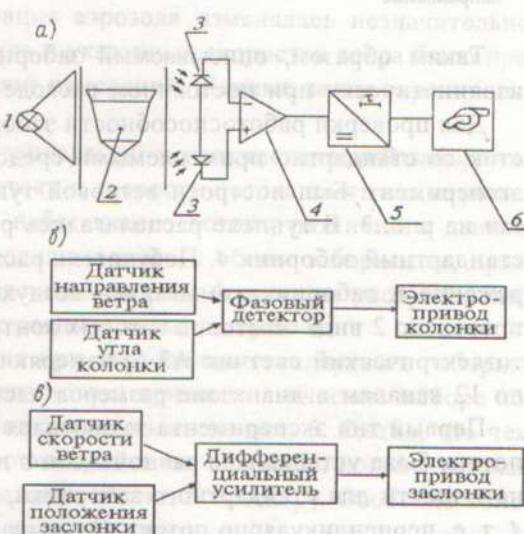


Рис. 2. Блок-схемы регулятора расхода (a), управления колонкой (б) и заслонкой (в).

ния ветра в месте отбора проб. В существующих системах мониторинга для этих целей обычно используется анеморумбометр М-47 [5]. Датчиком направления у него является сельсин, а датчиком скорости — тахогенератор. Поэтому и в настоящем заборнике датчиком положения угла колонки выбран сельсин, а электроприводом — двигатель постоянного тока. На рис. 2б видно, что сигналы с датчиков направления ветра и положения угла колонки подаются на фазовый детектор, который по величине их рас согласования управляет электроприводом колонки.

В связи с тем, что скорость ветра в реальных условиях изменяется в широких пределах, а для большинства методик измерений необходимо обеспечение постоянства расхода воздуха, в заборнике выбрана схема сопла переменного сечения. При таком подходе изменение скорости ветра компенсируется изменением площади сечения. Расход же воздуха через прибор остается постоянным. Реализуется этот подход по блок-схеме на рис. 2в. Сигналы с датчика скорости ветра и положения заслонки подаются на дифференциальный усилитель, причем в обратной полярности: усиление скорости должно приводить к уменьшению площади сопла заборника. Дифференциальный усилитель вырабатывает сигнал разбаланса и подает его на электропривод заслонки, который перемещает ее по заранее определенному масштабу.

Приведем технические характеристики заборника:

Расход воздуха, постоянный в диапазоне	1—25 м ³ /ч
Диапазон скорости ветра, при которой выполняется условие изокинетичности	1—20 м/с
Изменение направления ветра	0—360°
Постоянная времени по углу и расходу	1 мин
Гистерезис:	
скорость	±0,5 м/с
направление	±10°

Таким образом, описываемый заборник позволяет отбирать аэрозоль изокинетически при постоянном расходе воздуха.

Для проверки работоспособности заборника и сравнения его характеристик со стандартно применяемыми средствами был проведен следующий эксперимент. Был построен ветровой туннель, который схематично показан на рис. 3. В туннеле располагались разработанный нами заборник 3 и стандартный заборник 4. Побудитель расхода 2 создавал необходимое разжение и заборники омывались воздухом, содержащим аэрозоль. Было проведено 2 вида опытов, в которых контрольным средством выступал фотозелектрический счетчик АЗ-5, измеряющий дисперсный состав аэрозоля по 12 каналам в диапазоне размеров частиц от 0,4 до 10 мкм.

Первый тип эксперимента заключался в том, что скорость натекающего потока была установлена равной 2,5 м/с и соответствовала условию изокинетичности для стандартного заборника, когда он располагался в позиции 4, т. е. перпендикулярно потоку. Описываемый здесь заборник автоматически устанавливался в позиции 3 также перпендикулярно потоку, скорость воздуха в его сечении также была равной 2,5 м/с. Затем с учетом того, что стандартный заборник не реагирует на изменение ветра в реальной атмосфере, этот процесс имитировался в ветровом туннеле искусственно, а

именно: стандартный заборник ступенчато, через 45° , отклонялся от оси ветрового туннеля, направленной навстречу потоку. Это отражено на рис. 3 позициями 4-1, 4-2, 4-3, 4-4. Сделанные для каждой позиции заборников отсчеты на фотоэлектрическом счетчике позволяют судить о том, какая часть спектра искажается стандартным заборником при его эксплуатации в атмосфере. Цель этого эксперимента — проверка различий в измерениях счетной концентрации аэрозоля при изменении направления ветра.

Во втором типе эксперимента проверялись различия в измерениях концентрации аэрозоля при изменении скорости ветра, поскольку в стандартном заборнике расход воздуха и сечение заборника в процессе отбора проб не меняются. В этом случае оба заборника были направлены перпендикулярно потоку (3 и 4 на рис. 3), а изменялась скорость набегающего потока с помощью побудителя расхода воздуха 2. При этом скорость воздуха в сечении стандартного заборника составляла, как и в предыдущем случае, 2,5 м/с. Измерения выполнены при скоростях потока в ветровом туннеле 0; 2,5; 5,5; 11 и 18 м/с.

Эксперименты проводились на открытом воздухе, т. е. с реальным атмосферным аэрозолем в июне 1999 г. Для этого выбирались дни с устойчивой погодой, когда концентрация аэрозоля изменялась незначительно. Для каждого положения заборника и указанных скоростей ветра было проведено по 10 пятиминутных серий измерений. Данные затем осреднялись и представлены на рис. 4—6.

На рис. 4 видно, что когда стандартный и изокинетический заборники направлены перпендикулярно потоку и скорости потока на их входе равны между собой и равны скорости набегающего потока, различий в данных фотоэлектрического счетчика, подключаемого к обоим заборникам, практически не наблюдается. Приведенные на рис. 4 спектры распределения частиц по размерам относятся к разным дням измерений.

Распределение частиц аэрозоля при отклонении стандартного заборника от направления омывающего его потока при автоматическом выборе положения изокинетическим заборником показано на рис. 5. Видно, что чем сильнее стандартный заборник отклоняется от оси набегающего потока, тем сильнее искажается распределение частиц по спектру. Особенно сильно искажается грубодисперсная часть спектра.

И, наконец, на рис. 6 приведены распределения частиц, полученные при разных скоростях потока в ветровом туннеле, когда оба заборника были перпендикулярны потоку. При этом скорость в сопле изокинетического заборника также автоматически устанавливалась равной скорости

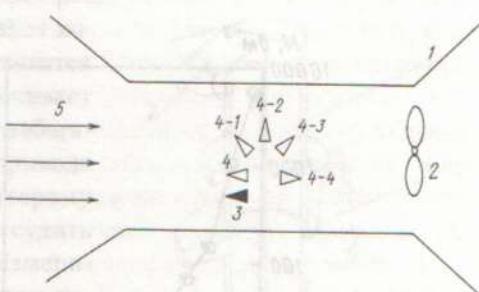


Рис. 3. Схема эксперимента.

1 — ветровой туннель; 2 — побудитель расхода воздуха; 3 — изокинетический заборник; 4 — стандартный заборник и его отклонения от оси потока на 45° (4-1), на 90° (4-2), на 135° (4-3) и на 180° (4-4); 5 — направление движения атмосферного воздуха.

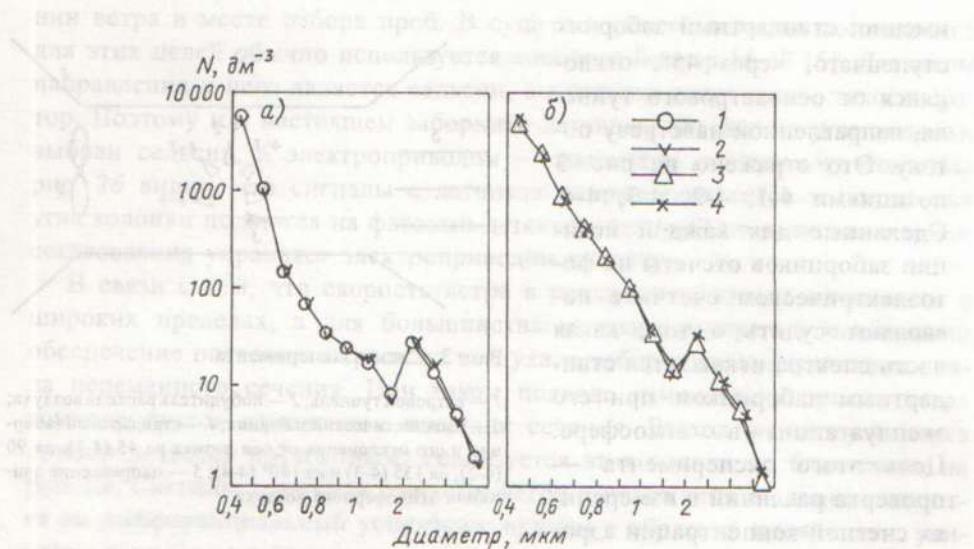


Рис. 4. Спектры распределения частиц по размерам при скорости набегающего потока 2,5 м/с и скорости ветра в соплах изокинетического (1, 3) и стандартного (2, 4) заборников 2,5 м/с.

а) 15 июня 1999 г., б) 17 июня 1999 г.

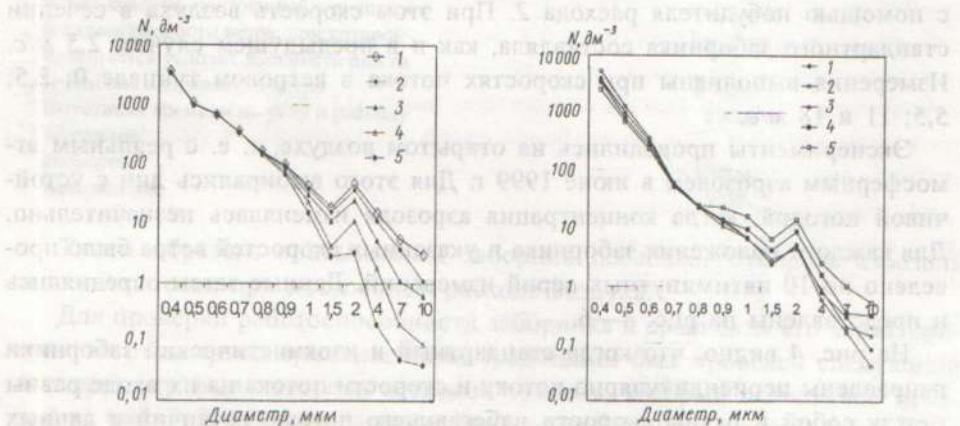


Рис. 5. То же, что и на рис. 4 за 15 июня 1999 г.

1 — изокинетический заборник;
2—5 — отклонения стандартного от оси потока на 45 (2), 90 (3), 135 (4) и 180° (5).

потока в ветровом туннеле, а скорость в сечении стандартного заборника оставалась равной 2,5 м/с. Видно, что в стандартном заборнике происходит искажение спектра: обогащается субмикронная фракция частиц в результате засасывания их дополнительного количества и занижается грубодисперсная фракция, что обусловлено инерционным пролетом частиц, минуя заборник.

Рис. 6. То же, что и на рис. 4 за 17 июня 1999 г. при скоростях ветровом туннеле 2,5 (1), 0 (2), 5,5 (3), 11 (4) и 18 м/с (5).

1 — изокинетический заборник;
2—5 — стандартный заборник.

При увеличении скорости потока до 18 м/с изокинетический заборник также подстраивается под эту величину, а в стандартном по-прежнему остается значение 2,5 м/с. Это также приводит к искажению спектра распределения частиц, но в обратную сторону. Занижается концентрация субмикронной фракции, так как она хорошо увлекается воздухом и обтекает возникающую перед стандартным заборником воздушную "подушку". Грубодисперсная фракция обогащается, так как тяжелые частицы, двигаясь по инерции, пробивают эту пробку.

В табл. 1 представлены количественные данные об искажении спектра частиц по массе. Данные получены пересчетом спектров концентрации в массовую в предположении, что плотность вещества частиц равна 1 г/см³. Из данных табл. 1 видно, что занижение массовой концентрации в стандартном заборнике в среднем по всему спектру может достигать 9,6 раз при завышении в некоторых случаях до 35%. При этом занижение в отдельных диапазонах может достигать 110.

Поскольку фотоэлектрический счетчик измеряет в ограниченном диапазоне частиц и не охватывает весь спектр распределения атмосферного аэрозоля, эти же эксперименты были проведены с заменой счетчика на фильтры. Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что при определении массовой концентрации стандартными способами ошибка измерений может увеличиться до 30 раз в сторону занижения величины концентрации и почти в 3 раза в сторону завышения.

Описанный изокинетический заборник может использоваться в уже действующих системах мониторинга путем подключения к существующим коммуникациям, им могут оснащаться вновь разрабатываемые комплексы. Не исключено его использование и в отдельных разовых экспериментах. Причем при оснащении действующих систем для заборника не надо

Таблица 1
Отношения массовых концентраций аэрозоля, измеренных с помощью изокинетического (М3) и стандартного (М4) заборников

Диаметр, мкм	М3/М4 (1)	М3/М4 (2)	М3/М4 (3)
0,4—0,5	0,96	1,07	0,65
0,5—0,6	1,05	1,09	0,69
0,6—0,7	1,03	1,00	0,73
0,7—0,8	1,03	1,03	0,91
0,8—0,9	0,94	1,15	1,03
0,9—1,0	0,96	1,43	1,76
1,0—1,5	1,12	2,86	2,28
1,5—2,0	0,89	6,78	2,60
2—4	1,07	14,24	2,62
4—7	1,15	75,65	3,16
7—10	1,08	110,80	3,43
>10	0,83	75,50	6,62
Всего	1,04	9,60	2,03

Примечание. 1 — при одинаковой скорости набегающего потока; 2 — при отклонении стандартного заборника от оси ветрового туннеля на 180°; 3 — при скорости набегающего потока в стандартном заборнике 2,5 м/с и 18 м/с в изокинетическом.

жности. Было установлено, что 21 из 40 изученных инструментов при этом же самое время показывали одинаковые показания.

Таблица 2

Отношения массовых концентраций аэрозоля, измеренных на фильтрах с помощью изокинетического (M3) и стандартного (M4) заборников

Концентрация	M3/M4 (1)	M3/M4 (2)	M3/M4 (3)
Максимальная	1,18	31,2	0,36
Минимальная	0,81	6,8	0,98
Средняя	1,02	14,2	0,68

Примечание. То же, что и в табл. 1.

обратить внимание на то, что для изокинетического заборника не требуется отдельный датчик ветра, так как он уже входит в состав системы. Заборник достаточно прост в изготовлении и неприхотлив в эксплуатации. Единственным недостатком его является отсутствие антиобледенительной системы. Однако такие ситуации возникают весьма редко.

Как показали испытания заборника, его применение может снизить погрешность измерений счетной концентрации от 30% до 75 раз и погрешность измерения массовой концентрации аэрозоля от 60% до 31 раза.

Литература

1. Бронштейн Д. Л., Александров Н. Н. Современные средства измерения загрязнения атмосферы. — Л., Гидрометеоиздат, 1989, 328 с.
2. Качурин Л. Г. Методы метеорологических измерений. — Л., Гидрометеоиздат, 1985, 456 с.
3. Ковалевский В. К., Покровский Е. В. Стабилизатор расхода воздуха. — Приборы и техника эксперимента, 2001, № 2, с. 139.
4. Огородников Б. И., Скитович В. И., Хабаров В. И., Шарапов А. Г. Характеристики автономного изокинетического пробоотборника аэрозолей в широком диапазоне
- скоростей ветра. — Оптика атмосферы и океана, 1998, т. 11, № 1, с. 75—78.
5. Перегуд Е. А., Горелик Д. О. Инstrumentальные методы контроля загрязнения атмосферы. — Л., Химия, 1981, 384 с.
6. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186—89. — Л., Гидрометеоиздат, 1991, 695 с.
7. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. — М., Изд-во АН СССР, 1955, 351 с.
8. May K. R., Pomeroy N. P., and Hibbs S. Sampling techniques for large wind-borne particles. — J. Aerosol Sci., 1976, vol. 7, No. 1, pp. 53—62.

Поступила
16 V 2002