

В. П. Куц, С. М. Слободян

Метод анализа дисперсного состава аэрозолей, пыли и порошков

V. P. Kuts, S. M. Slobodyan

Analysis Method for Disperse Composition of Aerosols, Dusts and Powders

Описан метод, конструкция и принцип действия новых устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Рассматривается концепция интегрированных моделей и конструкций конкретных устройств и систем для анализа дисперсного состава пылевидных материалов, которая объединяет новые и известные взаимно дополняющие методы и средства анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Исследованы проблемы оценки для различных логических моделей и принципа действия практических конструкций новых устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Применение предложенных устройств позволяет значительно сократить длительность анализа по сравнению с известными методами. В одном устройстве разделение частиц по размерам — методом седиментометрии, в другом — по скорости движения частиц в воздушной среде. Показано, что учет уравнений взаимосвязи параметров новых устройств для анализа дисперсного состава порошков и пылевидных материалов обуславливает отличие от нуля погрешностей оценки, что позволяет решить проблему оценки размеров частиц, фракций, контроля и диагностики вне рамок традиционных подходов решения этой проблемы.

Ключевые слова: дисперсный состав, седиментометр, фракция, скорость оседания.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-55

Введение. Проблема экологии, в том числе оценка состояния загрязнения водной и воздушной среды городов выбросами промышленных предприятий и транспорта как в России, так и за рубежом является актуальной в настоящее время [1–5]. Наиболее сильные загрязнители воздуха — агрегаты тепловых сетей и топки жилых домов, работающие на жидком и твердом топливе. Во многих отраслях промышленности определение дисперсного состава измельченных материалов становится обязательной операцией многих технологических процессов. При этом определять во многих случаях необходимо как дисперсный состав исходного сырья, так и готовой продукции. В производимых операциях контроля и оценки дисперсного состава сырья

A method, design and operation principle of new devices for analysis of dust-like materials are presented. The concept of integrated models and designs is based on a combination of complementary methods and approaches for analysis of dust-like materials. This work is devoted to problems of evaluation of various logical models and device operation principles. Application of devices proposed in this research can significantly reduce an analysis duration in comparison with other well-known methods. One of the proposed devices utilizes sedimentometry method for size-based particle separation, while the other device implements particle separation according to their velocities in the air. It is demonstrated that equation of parameters relationship properly developed for a new device leads to non-zero estimation errors. Thus, problems of size evaluation for particles and fractions, problems of control and diagnostics can be solved within a framework that goes beyond traditional approach.

Key words: disperse composition, sedimentometry, fraction, sedimentation rate.

и продукции [3–5], как и при оценке атмосферного аэрозоля [2], наиболее важным параметром является его элементный состав.

Подобные исследования представляют значительный интерес и актуальны не только с позиций физики динамического взаимодействия природных сред [1], но и [2, 3] для решения проблемы оценки загрязнения атмосферы газами и твердыми частицами, которая, как показывает заметный рост публикаций по данной теме в наше время, наиболее актуальна в городах и промышленных центрах. Для объективной оценки степени загрязнения воздуха твердыми частицами важно [2–5] знать микрофизические параметры (концентрацию, фазовый состав, форму частиц) и элементный состав аэрозольного загрязнения воздуха.

На предприятиях с большими объемами производства, имеющих специальные лаборатории, анализы проводят на современном импортном оборудовании, обеспечивающем необходимые показатели с точки зрения достоверности полученных результатов, длительности их проведения и удобства оформления результатов. При отсутствии таких возможностей используются известные методы и оборудование, которые также обеспечивают необходимую точность, однако требуют больше времени как для проведения анализов, так и для оформления полученных результатов. Это касается небольших предприятий различных форм собственности, научных сотрудников вузов, НИИ и т. п.

Оборудование, использующееся в известных методах, позволяет определить элементный состав вещества с установленной в них точностью. Это дорогостоящие, сложные в обслуживании и настройке комплексы, применение которых требует значительных временных и финансовых затрат. Их применение неэффективно при проведении анализа большого числа проб, что подтверждает экологический мониторинг атмосферы [2, 3].

Основные положения. Многолетний опыт в области разработки и исследований пылеулавливающего оборудования, для оценки эффективности которого обязательно определение дисперсного состава как начальной, так и уловленной пыли, позволил авторам усовершенствовать оборудование для проведения дисперсного анализа пыли и порошков, в первую очередь, с целью сокращения продолжительности отбора проб. Далее кратко изложим результаты этого опыта.

Выбор метода определения дисперсного состава в решающей степени определяется тем, какая характеристика меры дисперсности исследуемого материала получается в результате его анализа. Поскольку при исследованиях пылеулавливающего оборудования часто определяют дисперсный состав пыли в подситовой области, то сравнительная оценка наиболее распространенных приборов для определения дисперсного состава в этой области, приведенной в [4], привела к выводу, что наиболее достоверные результаты получаются на пипеточном приборе, т. е. методом седиментометрического анализа путем отбора весовых проб. Сущность метода заключается в последовательном отборе проб на известной глубине суспензии в фиксированные моменты времени и определения массы твердой фазы в отобранной пробе после выпаривания. Этот метод позволяет определять фракции частиц от 1 до 63 мкм при плотности порошкообразных материалов 2000–3000 кг/м³.

Определяющей при расчетах является формула Стокса:

$$v = \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g\delta^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где v — скорость оседания частицы, м/с; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность пылевых частиц, кг/м³; $\rho_{\text{с}}$ — плотность среды,

в которой они оседают, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с²; δ — диаметр пылевых частиц, м; μ — коэффициент динамической вязкости среды, Па·с. Поскольку v можно выразить как

$$v = \frac{h}{\tau}, \quad (2)$$

(где h — глубина, на которую осела частица в среде, м; τ — время оседания частицы, с), то время оседания частицы τ определяется как

$$\tau = \frac{18\mu h}{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g\delta^2}. \quad (3)$$

Вариантов аппаратной реализации этого метода несколько. Они подробно описаны в [5]. Причем каждый из вариантов, описанных в [5], реализаций аппаратуры в определенной мере устраняет недостатки предшественников; усовершенствования ведут и в настоящее время.

Экспериментальная апробация и исследования. Разработанная нами реализация метода в седиментометре [6] позволяет в значительной степени устранить недостатки большинства известных устройств, указанных в [5].

Сущность метода заключается в том, что вертикальный сосуд заполняют дисперсионной средой и на ее поверхность тонким слоем вносят концентрированную суспензию, частицы которой в процессе оседания распределяются по высоте столба жидкости. По окончании расчетного времени проводят фракционирование полученной суспензии, которое заключается в одновременном рассечении седиментационного объема по высоте на ряд отдельных изолированных объемов суспензии, которые затем сливают поочередно сверху вниз и анализируют.

Что касается конструктивного оформления седиментометра, то это вертикальный сосуд (цилиндр) из органического стекла высотой 500 мм и внутренним диаметром 55 мм, объемом 1 л. Вертикальной перегородкой сосуд разделен на рабочую и нерабочую части. По центру цилиндра установлена ось с закрепленными на ней шиберами, которые могут двигаться при повороте оси через щели в перегородке с нерабочей части в рабочую, рассекая рабочий объем седиментометра на отдельные объемы, соответствующие определенным фракциям. В стенке рабочей части седиментометра имеются отверстия, в которые вставлены патрубки с запорными устройствами. Они предназначены для отбора полученных фракций для анализа.

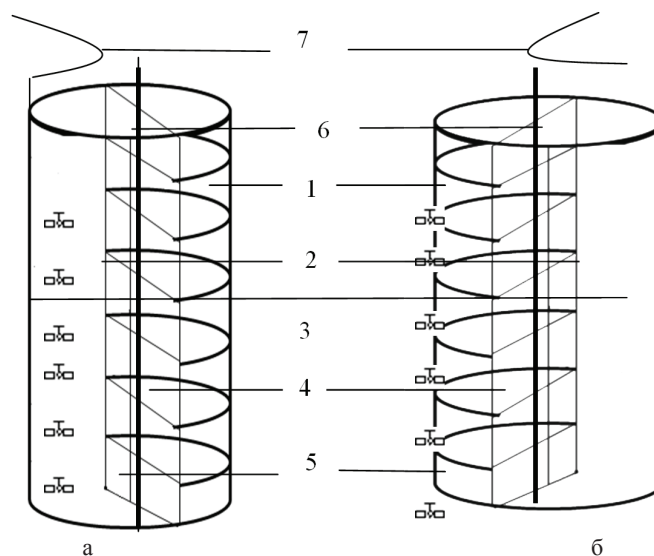
Основным преимуществом такого устройства по сравнению с известными является значительное сокращение процесса отбора проб в нем. Чистое время отбора проб (без учета времени приготовления суспензии и времени взвешивания) на практике составляет всего 0,4 часа. Основным недостатком такого седимен-

тометра является то, что при определении дисперсного состава различных по плотности материалов будут меняться диапазоны размеров частиц во фракциях, которые отсекаются в объемах, ведь частицы с разной плотностью будут оседать с разной скоростью.

С целью получения фракций с одинаковыми размерами частиц для различных материалов конструкцию такого седиментометра и методику его применения усовершенствовали, что позволило получать в таком седиментометре фракции с одинаковыми размерами частиц сначала для двух различных материалов, а впоследствии — для четырех. Определив, на какую глубину за одинаковое время оседают частицы одинаковых размеров различной плотности, на этих глубинах предусмотрены отверстия с четырех сторон цилиндра для слива полученных фракций. Изготовлены четыре перегород-

ки со щелями на рассчитанных высотах, а шиберы могут перемещаться и фиксироваться по оси прибора. Это позволяет получить фракции с одинаковыми размерами для четырех различных материалов, проводя только замену перегородок и установку на рассчитанных глубинах шиберов на оси прибора. Такие решения усложняют конструкцию седиментометра и условия пользования им, особенно это касается значительного числа патрубков введенных для слива фракций на боковой его поверхности.

Этот недостаток устраняется установлением в продольный паз по высоте цилиндра пластин со сливными патрубками на рассчитанных для каждого материала тех же глубинах, на которых прорезаны отверстия в перегородках и вводом шиберов на оси прибора [6]. Конструкция такого типа седиментометра представлена на рисунке.



Седиментометр: *а* — в нерабочем и *б* — в рабочем положении: 1 — цилиндр; 2 — перегородка; 3 — ось; 4 — шиберы; 5 — вставная пластина со сливными патрубками; 6 — крышка; 7 — ручка

В этом седиментометре предусмотрен отбор фракций с частицами > 40 мкм, 25–40; 16–25; 10–16; 6,3–10; 4–6,3; 1–4 мкм. Для этого на оси прибора устанавливаются шесть шиберов, которые рассекают объем образованной суспензии на семь фракций с указанными диапазонами размеров частиц. Следует отметить, что для каждого вида пылевых частиц используются различные дисперсионные среды и стабилизаторы, приведенные в справочниках [7]. Следовательно, при расчетах необходимо учитывать не только изменение плотности пылевых частиц, но и изменение плотности среды, в которой они оседают, и содержание в ней различных по свойствам стабилизаторов.

Результаты определения дисперсного состава некоторых пылевидных материалов, рассчитанного с помощью этого усовершенствованного устройства (песка, цемента, угля), сравнивались с результатами анализов этих же мате-

риалов, определенных ранее с помощью прибора с подъемной пипеткой конструкции ЛИОТ. Незначительные различия (не более 3%) свидетельствуют о пригодности этого метода и устройства для определения дисперсного состава пылевидных материалов. Осуществляется этот процесс по разработанной авторами методике в предложенном устройстве значительно быстрее.

Другие методы определения дисперсного состава порошкообразных материалов — динамические — основаны на разделении дисперсной фазы на фракции в потоке газов, движущихся вверх. По сравнению с методами седиментометрии их преимуществом является отсутствие необходимости соблюдения таких сложных условий, как «абсолютно спокойная среда», а также равномерное распределение частиц всех фракций по высоте.

Практически реализацию этих методов ведут в нескольких цилиндрических сосудах разного диаметра,

последовательно соединенных трубками. Крупные частицы остаются в первом сосуде, фракции с меньшими по размерам частицами распределяются в следующих сосудах, а мельчайшие частицы на выходе из последнего сосуда оседают в установленном там фильтре. Материал, остающийся в сосудах, задерживается фильтром после продувки, взвешивается и затем определяется содержание частиц соответствующих размеров в пробе.

К недостаткам таких устройств можно отнести невозможность четкого определения времени продувки различных по природе материалов и степени их дисперсности; наложения фракций, т. е. присутствие в одной фракции частиц других фракций; налипания частиц на внутренних поверхностях сосудов.

В авторском устройстве [8] эти недостатки в значительной степени устранены. Принципиальным отличием его по сравнению с описанными выше устройствами является то, что сосуды для выделения отдельных фракций размещаются не последовательно, один за другим в горизонтальной плоскости, а устанавливаются вертикально, на одной оси, частично входя друг в друга. Причем снизу находится сосуд наименьшего диаметра. К его нижнему концу подсоединяют стеклянную насадку, в которую перед измерением засыпают $\sim 10 \text{ см}^3$ порошка, дисперсный состав которого определяют. Через трубку от вентилятора в насадку вдувают воздух, который перемешивает порошок и выносит его частицы в трубу наименьшего диаметра. На входе в трубы больших диаметров в устройстве отбора оседают частицы определенных размеров. Частицы наименьших размеров оседают в фильтре, который устанавливают на выходе из трубы наибольшего диаметра. После взвешивания масс порошка, оставшегося в насадке, осевшего в двух кольцевых устройствах и в фильтре, определяют содержание частиц определенных размеров в пробе.

Разработанный способ и устройство значительно упрощают процедуру анализа, сокращают время и за-

траты на его реализацию по сравнению с устройством из трех последовательно соединенных трубками горизонтально расположенных сосудов. Однако устройство имеет тот же недостаток — малое число образующихся проб фракций: одна — остаток в насадке, две — в отводящих устройствах двух последующих труб и одна — в фильтре на выходе из наибольшей трубы.

На основе анализа скоростей движения частиц различной природы и размеров [5, 7] нами усовершенствовано устройство путем установки двух дополнительных сосудов (труб с отводящими устройствами).

Такое решение позволяет получить шесть проб фракций вместо четырех, как в предыдущем варианте. В этом варианте, в отличие от предложенного в [6] седиментометра, получить фракции с одинаковыми размерами частиц для различных материалов затруднительно. Однако предельные размеры частиц, что разделяются, те же — 1–63 мкм. Усовершенствованное устройство для отвода, образующихся в трубах, фракций было использовано в опытной эксплуатации на пищевом производстве.

Заключение. Теоретически и экспериментально показана возможность применения разработанного способа определения дисперсного состава порошкообразного материала и устройства для определения дисперсного состава измельченных материалов. Исследован процесс разделения и апробирована методика достаточной точности ($\sim 3\%$) определения дисперсного состава порошков, промышленных пыли, аэрозолей и измельченных материалов. Относительная простота способа и конструкции устройства с возможностью изготовления без применения специального оборудования, удобство метода с сокращенным временем отбора проб, достаточная точность полученных результатов дают основания надеяться, что предложенный способ и устройства найдут применение на предприятиях различных форм собственности и в среде научных сотрудников, аспирантов при решении различных задач.

Библиографический список

1. Деева В. С., Слободян С. М. Физическая модель пространства скользящего взаимодействия сред // Известия Алтайского государственного университета. — 2013. — № 1/1 (77).
2. Бортников В. Ю., Букацкий В. И., Рябинин И. В., Семенов Г. А. Микрофизические параметры и элементный состав атмосферного аэрозоля в г. Барнауле в 2006–2008 гг. // Известия Алтайского государственного университета. — 2009. — № 1.
3. Eberhart R. C., Shi Y. A modified particle swarm optimizer // Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. — 1998.
4. Фигуровский Н. А. Седиментометрический анализ. — М., 1948.
5. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. — Л., 1971.
6. Способ определения дисперсного состава порошкообразного материала: патент № 59094 А Украина, МПК⁷ G01N 15/04 / В. П. Куц, В. Б. Каспрук, Я. Д. Ярош, О. М. Марцияш. Заявл. 15.01.03; опубл. 15.08.03; Бюл. № 8.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А. А. Русанова. — М., 1975.
8. Устройство для определения дисперсного состава измельченных материалов: патент на полезную модель № 35761 Украина, МПК⁷ G01N 15/04 / В. П. Куц. — № 42008 02738; заявл. 03.03.2008; опубл. 10.10.2008. Бюл. № 19.