

Г.А. Коломиец, С.М. Коломиец

**АНАЛИЗАТОР РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ АЭРОЗОЛЕЙ «АРФА»**

*Институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун», г. Обнинск, Калужской обл.*

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

Рассмотрен принцип действия и особенности оптической схемы анализатора размеров и формы аэрозолей «АРФА». Его важнейшей особенностью, в отличие от известных приборов аналогичного назначения, является способность при наличии лишь одного осветителя одновременно регистрировать в одной плоскости (одним регистратором) изображения каждой частицы, соответствующие ее проекциям на две взаимно перпендикулярные плоскости. При этом существенно повышается информативность измерений. Кроме того, возможно существенное упрощение процедуры формирования счетного объема.

Среди различных методов определения размеров и формы взвешенных частиц [1] наиболее информативными являются телевизионные методы. Суть их состоит в том, что частицы освещают световым пучком и формируют соответствующей оптикой на фотокадоте видеокамеры их изображения (обычно светлопольные), по которым и судят о размерах и форме частиц. При этом в подавляющем большинстве известных методов каждая частица дает лишь одно изображение, соответствующее проекции частицы лишь на одну плоскость (перпендикулярную оси светового пучка).

Однако информации, содержащейся только в одном изображении, недостаточно для однозначной оценки формы произвольно ориентированных несферических частиц даже простейшей формы эллипсоида вращения, не говоря уже о трехосных эллипсоидах и более сложных формах. Кроме того, при измерениях непосредственно в потоке (без отбора проб на подложку) для корректных измерений необходимо ограничить счетный объем вдоль оси светового пучка допустимой глубиной резкости. Последнее является само по себе непростой задачей и решается, например, выбором определенной степени когерентности светового пучка и дополнительной нетривиальной обработкой изображений [1]. Таким образом, реализация известных телевизионных методов применительно к измерениям в потоках является достаточно сложной. В связи с этим рассмотрим возможности развития телевизионных методов, позволяющие повысить информативность измерений при одновременном упрощении реализации ограничения счетного объема.

В данной статье рассматриваются особенности оптической схемы телевизионного анализатора «АРФА», разработанного в Институте экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун».

Схема устройства [2], позволяющего получить на фотокадоте видеокамеры одновременно два изображения, соответствующих проекциям частицы на две взаимно перпендикулярные плоскости, представлена на рис. 1,а. Зеркала 5 и 6 установлены таким образом, что ось светового пучка на выходе объектива 7 (ось OY) перпендикулярна оси светового пучка на выходе объектива 2 (оси OX). Объективы 4 и 7 установлены таким образом, что передний фокус объектива 4 совпадает с задним фокусом объектива 7 в некоторой точке A (рис. 1,б). Объектив 8, соосный с

объективом 7, оптически сопрягает указанный выше общий фокус A объективов 4 и 7 с некоторой точкой A' (рис. 1,в) в плоскости регистрации –плоскости фотокадота видеокамеры 9.

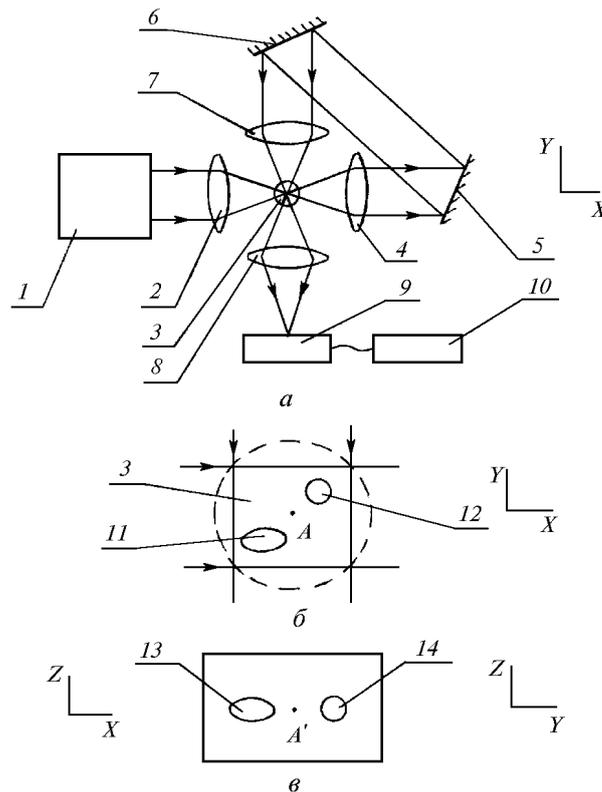


Рис. 1. Формирование проекций частицы на две взаимно перпендикулярные плоскости: а – общая схема; б – вид области пересечения пучков; в – вид плоскости регистрации. 1 – осветитель; 2, 4, 7, 8 – объективы; 3 – поток частиц; 5, 6 – зеркала; 9 – видеокамера; 10 – блок обработки; 11 – частица; 12, 13 – первое и второе изображения частицы; 14 – изображение первого изображения

Схема разворота светового пучка (объективы 4, 7 и зеркала 5, б) строит в области потока 3, перпендикулярного плоскости рисунка, первое действительное изображение

12 частицы 11 (см. рис. 1,б), причем это изображение соответствует проекции частицы на плоскость  $YOZ$ , поскольку при построении этого изображения частица освещается пучком от объектива 2, распространяющимся вдоль оси  $OX$ . Указанное изображение 12 (такое же, как и в известных методах) объективом 8 переносится в плоскость регистрации как изображение изображения 14 (см. рис. 1,в). Одновременно объектив 8 строит в этой же плоскости второе изображение 13 той же частицы 11, однако изображение 13 соответствует проекции частицы на плоскость  $XOZ$ , поскольку при построении этого изображения частица освещается пучком от объектива 7, распространяющегося вдоль оси  $OY$ .

Если частица находится точно в общем фокусе объективов 4 и 7 (в точке  $A$ ), то изображения 13 и 14 наложатся друг на друга (в точке  $A'$ ). Этого наложения можно избежать, если несколько разнести указанные фокусы (например, в направлении потока частиц) на величину, превосходящую максимальный размер частиц.

Таким образом, в плоскости регистрации формируются одновременно два изображения каждой частицы, соответствующие ее проекциям на взаимно перпендикулярные плоскости.

Рассмотрим некоторые особенности этих изображений [3]. Как видно из рисунков, расстояние изображений 13 и 14 от точки  $A'$  пропорционально расстоянию частицы 11 от осей объективов 7 и 4 соответственно. В этом случае, оказывается возможной оценка пространственного положения частицы в плоскости пересечения прямого и развернутого пучков (в плоскости  $XOY$ ). В частности, для ограничения счетного объема в этой плоскости достаточно из всей совокупности пар изображений отбирать для последующей обработки лишь «хорошие» пары, для которых указанные расстояния (или же, что проще в реализации, расстояния между изображениями) меньше заданной величины. Подобная отбраковка «плохих» изображений реализуется достаточно тривиально и значительно проще, чем в [1].

Далее, если частица находится в пределах допустимой глубины резкости, то максимальный размер изображений 13 и 14 в направлении  $OZ$  (в вертикальном направлении рис. 1,в) есть не что иное, как проекция этих изображений (т.е. проекция частицы) на указанную ось. Очевидно, что этот размер будет одинаков для изображений 13, 14 частиц любой формы и ориентации. При выходе частицы за пределы допустимой глубины резкости указанные размеры этих изображений могут отличаться друг от друга. Итак, сравнение указанных размеров дает дополнительную информацию о положении частицы в плоскости рисунка ( $XOY$ ) и может также использоваться для ограничения счетного объема.

При соответствующей обработке изображений, особенно легко реализуемой с помощью ПЭВМ, нетрудно найти как площадь каждого изображения, так и длину его проекций на взаимно перпендикулярные оси координат  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  (см. рис. 1,в). Следовательно, по соотношениям [3] можно вычислить и оба размера эллипсоида вращения при его произвольной ориентации в пространстве.

В рассматриваемом приборе в качестве объективов 2, 4, 7, 8 используются стандартные микрообъективы с восьмикратным увеличением типа М-42. Эти объективы установлены от центра счетного объема (точки  $A$  рис. 1,б) на рабочем расстоянии 8,6 мм (соответственно диаметр аэрозольного тракта составляет примерно

15 мм). В соответствии с обычными требованиями теории оптических приборов определено и расстояние между объективами 4, 7 вдоль оптической оси. При этом объектив 4 строит промежуточное действительное изображение точки  $A$  в плоскости, симметричной относительно зеркал 5, 6, и именно это изображение объективом 7 переносится в счетный объем (точка  $A'$  рис. 1,в).

Для корректных измерений необходимо, чтобы увеличение  $V$  пары объективов 4, 7 было равно единице и не зависело от положения частицы в пространстве. Первое условие легко выполняется при соответствующей юстировке оптической схемы для некоторого «нулевого» положения частицы (центр которой совпадает с точкой  $A$ ). Однако при смещении частицы из указанного положения увеличение  $V$  может меняться.

Положим, что частица из «нулевого» положения смещена вдоль оси  $OX$  на некоторую величину  $\Delta$ . Тогда, как нетрудно показать, ее изображение в счетном объеме (построенное парой объективов 4, 7) будет смещено по оси  $OY$  на некоторую величину  $\Delta^*$ , а увеличение изображения примет некоторое значение  $V^*$ , причем

$$\Delta^*/\Delta = V^*/V = 1/[1 + 2\Delta/(a_0 - f)], \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние объективов;  $a_0$  – расстояние от плоскости предметов до передней главной плоскости.

Для рассматриваемого случая  $a_0 - f \approx 1,5$  мм. Отсюда видно, что при  $|(\Delta - \Delta^*)/\Delta| = |(V - V^*)/V| \leq 0,1$  допустимое смещение  $\Delta \leq 0,08$  мм, в то время как поле зрения составляет примерно 0,6 мм, так что  $\Delta_{\max} = 0,3$  мм. То есть схема [2], представленная на рисунке, весьма чувствительна к положению частиц в счетном объеме.

В связи с этим в реальную схему прибора дополнительно введен коллектив, который установлен в плоскости указанного выше промежуточного изображения. Этот коллектив выполняет две функции. Первая (обычная для коллектива) – это сопряжение по световому потоку объективов 4, 7. Вторая – «стабилизация» увеличения объективов 4, 7. Действительно, в этом случае

$$\Delta^*/\Delta = V^*/V = 1/[1 + 2\Delta/a_0]. \quad (2)$$

Видно, что (2) существенно отличается от (1), поскольку  $a_0 \gg a_0 - f$ . Так, при  $a_0 \approx 15$  мм,  $\Delta = 0,3$  мм оказывается, что  $|(\Delta - \Delta^*)/\Delta| = |(V - V^*)/V| \leq 0,04$ . А это вполне приемлемо для большинства задач.

В приборах подобного типа весьма высокие требования предъявляются к осветителю, который должен формировать в каждом полукадре достаточно короткие световые импульсы длительностью единицы микросекунд (для того чтобы изображения частиц не «размазывались» в направлении их движения). При этом энергия в импульсе должна быть достаточной для уверенной регистрации изображений.

В рассматриваемом приборе регистратором является видеокамера PIN-756 с разрешением по горизонтали 600 твл. Исследования показали, что для этой видеокамеры в качестве осветителя можно использовать светодиод СИД 1-2К [4]. Для указанного импульсного режима получена экспериментальная зависимость пикового значения светового потока светодиода от тока накачки. Эта зависимость заметно отклоняется от линейной при токе, превышающем 300 мА. При этом, по-видимому, предельным с практической точки зрения является

ток примерно 1 А. Отметим, что в паспортных данных [4] предельный ток (100 мА) указан лишь для непрерывного режима.

Таким образом, рассматриваемый прибор может использоваться для анализа размеров и формы взвешенных частиц в диапазоне размеров примерно от 2 до 100 мкм. Существенно большая, чем в известных приборах аналогичного назначения, информативность измерений достигается при заметном упрощении процедуры ограничения счетного объема допустимой глубиной резкости.

*G.A. Kolomiets, S.M. Kolomiets. Analyzer of Aerosols' Form and Size «ARFA».*

An analyzer of sizes and form of aerosols «ARFA» is described. The most important peculiarity of the device proposed, differentiating it from its analogs, is its capability to simultaneously register on one plane (by one register) the images of each particle corresponding to its projections onto two mutually perpendicular planes in the presence of only one illuminant. The information content of the measurements therewith is significantly improved. Besides a considerable simplification of the procedure of a number volume formation is possible.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 98-05-64096).

1. *Оптико-электронные* методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В.Смирнов и др. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. *Патент* 2054652 РФ. МКИ G01N 15/00. Способ анализа взвешенных частиц / Коломиец С.М. Оpubл. в БИ. 1996. № 5.
3. *Коломиец С.М.* Лазерные методы определения размеров и формы взвешенных частиц: Автореф. дис. ... д.т.н. М.: ИОФ РАН, 1997. 30 с.
4. *Электрошторг*: Каталог электронных компонентов. М., 1997. 186 с.