

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-12-36-43>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ МЕТОДОМ

© Владимир Владимирович Семенов

Донской государственный технический университет, Россия, 346500, Ростовская обл., г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147;
e-mail: vvsemenov@mail.ru

*Статья поступила 18 июля 2022 г. Поступила после доработки 17 августа 2022 г.
Принята к публикации 26 октября 2022 г.*

Данные о параметрах взвешенных частиц необходимы в электронной, оптической, химической и горнодобывающей промышленности, порошковой металлургии, физике атмосферы, медицине и др. В работе представлены результаты определения параметров взвешенных частиц произвольной формы с помощью комбинированного оптико-электронного подхода, включающего фотоэлектрический метод и метод цифровой обработки изображений. Результаты обоих методов использовали для коррекции параметров частиц и оперативного управления излучением лазерного излучателя. Работа применяемого для определения параметров оптико-электронного устройства основывалась на анализе изображений частиц в четырех проекциях, а также на регистрации рассеянного частицами и собранного эллиптическим зеркалом излучения. Спектрометрию дисперсного состава аэрозолей проводили с использованием фотоэлектронного умножителя. Изображения взвешенных частиц для цифровой обработки получали с помощью матрицы прибора с зарядовой связью. Показано, что применяемые алгоритмы обработки изображений позволяют удалять шумы, корректировать фон, улучшать границы, определять порог бинаризации, исключать мелкие частицы, выделять замкнутые области и границы, проводить разбиение изображения на части и подсчет количества частиц в каждой из них, определять параметры и классифицировать частицы. Кроме того, они дают возможность восстанавливать объемную форму взвешенной частицы и выводить ее основные характеристики на цифровой индикатор с точностью до 1 %, что существенно лучше, чем у известных аналогичных устройств. Полученные результаты могут быть использованы для контроля загрязнения воздуха и повышения точности идентификации взвешенных частиц произвольной формы.

Ключевые слова: оптико-электронные методы регистрации; фотоэлектронный умножитель; матрица прибора с зарядовой связью; взвешенные частицы в четырех проекциях; алгоритмы обработки изображений и сигналов; DSP-процессор; классификатор.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF SUSPENDED PARTICLES OF ARBITRARY SHAPE BY OPTOELECTRONIC METHOD

© Vladimir V. Semenov

Don State Technical University, 147, ul. Shkevchenko, Shakhty, Rostov obl., 346500, Russia; e-mail: vvsemenov@mail.ru

Received July 18, 2022. Revised August 17, 2022. Accepted October 26, 2022.

Data on the parameters of suspended particles are required in the electronic, optical, chemical and mining industries, powder metallurgy, atmospheric physics, medicine, etc. We present the results of determining the parameters of suspended particles of arbitrary shape using a combined optoelectronic approach, including a photoelectric method and a digital method of image processing. The results of both methods were used to correct the particle parameters and operational control of the laser emitter radiation. The operation of an optoelectronic device used to determine the parameters is based on the analysis of particle images in four projections, as well as on the registration of radiation scattered by particles and collected by an elliptical mirror. Spectrometry of the disperse composition of aerosols was carried out using a photomultiplier tube. The images of suspended particles for digital processing were obtained using a CCD array. It is shown that the applied image processing algorithms make it possible to remove noise, correct a background, improve the boundaries, determine the binarization threshold, exclude small particles, select closed areas and boundaries, split the image into the parts and count the number of particles in each of them, determine the parameters and classify the particles. Moreover, it becomes possible to restore the volumetric shape of a suspended particle and display the main characteristics on a digital indicator with an accuracy of 1%, which is significantly better than that of known similar devices. The results obtained

can be used to control air pollution and improve the accuracy of identification of suspended particles of arbitrary shape.

Keywords: optical-electronic methods of detection; photomultiplier; matrix device with charge coupling; suspended particles in four projections; image and signal processing algorithms; DSP processor; classifier.

Введение

Часть порошкообразных материалов в процессе их изготовления, транспортировки и переработки под действием газовых потоков переходит в аэрозольное состояние в виде взвешенных частиц, образуя пыль. Промышленная пыль может быть взрывоопасной, поэтому необходимо своевременно определять параметры взвешенных частиц в воздухе и их концентрацию. Отметим, что диапазон изменения размеров, форм, концентрации и состава частиц атмосферных промышленных аэрозолей весьма обширен. Значительны также вариации форм и оптических свойств аэрозольных частиц [2 – 4].

В качестве измерительных приборов общего применения используют фотоэлектрические спектрометры аэрозолей [5 – 11]. Для расширения диапазона измерений и точности в них устанавливают объективы с сильным увеличением, диафрагмы поля зрения уменьшенного диаметра, аэродинамическую фокусировку с помощью специальной узкой струи и направленного в нее лазерного излучения, используют радиотехнические методы коррекции совпадений [6]. Однако фотоэлектрические методы спектрометрии дисперсного состава аэрозолей пригодны для решения лишь отдельных, частных задач.

Цифровая обработка изображений взвешенных частиц, получаемых с помощью матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), позволяет расширить количество определяемых параметров и повысить точность спектрометров. При этом результаты спектрометрии и обработки могут использоваться для коррекции параметров взвешенных частицах и оперативного управления параметрами струи и интенсивностью излучения лазерного излучателя.

В настоящее время применяют устройства, принцип работы которых состоит в освещении потока частиц световым пучком и регистрации параметров световых сигналов, формируемых частицами при их пролете через выделенную область потока. Причем световой пучок после прохождения потока с использованием отражающих зеркал разворачивают по отношению к исходному пучку и вновь пропускают через поток. Регистрация изображения частиц при помощи ПЗС-матрицы происходит с двух, трех и более равномерных углов светового потока.

Цель работы — определение параметров взвешенных частиц произвольной формы фото-

электрическим методом и методом цифровой обработки изображений.

Материалы, методика, оборудование

Для определения параметров взвешенных частиц произвольной формы использовали устройство, общая схема которого представлена на рис. 1. Устройство позволяет получать в плоскости регистрации одновременно четыре изображения взвешенной частицы, а также регистрировать при помощи полупрозрачного эллиптического зеркала и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) дополнительную информацию, необходимую для оперативного управления (лазером, воздушодувкой) и более точного определения размеров частиц в расширенном размерном диапазоне.

Канал регистрации изображений частиц в четырех проекциях работает следующим образом. Поток частиц освещают световым пучком, формируемым лазерным излучателем 4 и объективом 5. После прохождения потока этот световой пучок системой объективов 5, 7, 9 – 11 и зеркал 12, 14 – 16 разворачивается равномерно под углом к исходному пучку и вновь пропускается через поток частиц, где световой пучок проходит «четырежды» через счетную область потока частиц 3. В плоскость регистрации изображения переносятся с помощью объектива 6 ПЗС-матрицы 26, усилителя 27, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 28, DSP-процессора 29, подключенного к компьютеру (микроконтроллеру) 30. Одновременно объектив ПЗС-матрицы строит в плоскости регистрации четыре изображения частицы в разных проекциях, пространственно разнесенные путем соответствующей юстировки зеркал.

Кроме регистрации изображений в четырех проекциях, предусмотрен канал регистрации рассеянного взвешенными частицами и собранного эллиптическим зеркалом излучения. При помощи полупрозрачного зеркала 17, зеркала 13 и объектива 8 рассеянные частицами световые импульсы направляются в счетный объем и с использованием полупрозрачного эллиптического зеркала 2, смотрового окна 18, объектива 19, диафрагмы 22 регистрируются на ФЭУ 23. Прямой световой поток поглощается ловушкой света 20, отражаясь от зеркала 19. С ФЭУ электрический сигнал, пропорциональный рассеянному от частицы световому импульсу, усиливается в усилителе 24 и после преобразования АЦП 25 в цифро-

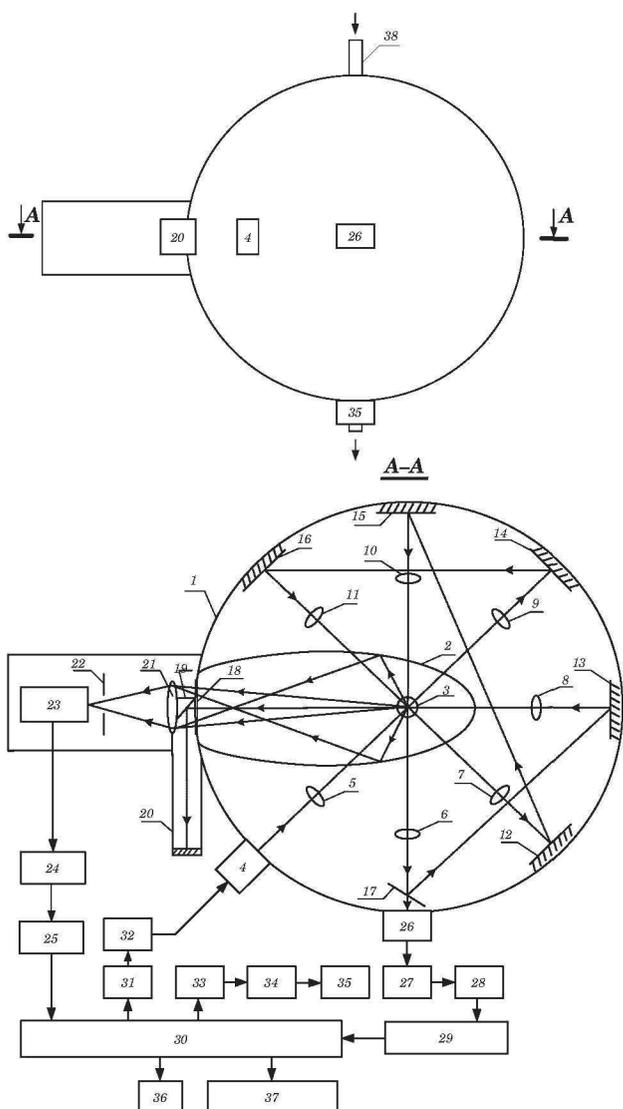


Рис. 1. Схема устройства для определения параметров взвешенных частиц произвольной формы

Fig. 1. Scheme of a device for determining the parameters of suspended particles of arbitrary shape

вую форму поступает в компьютер для дальнейшей обработки.

Компьютер (микроконтроллер) управляет лазером 4 и работой вентилятора 35 при помощи цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) 31 и 33 и усилителей мощности 32 и 34. Вентилятор через патрубок забора пробы 38 обеспечивает доставку анализируемых частиц в счетный объем.

Результаты измерений выводятся на жидкокристаллический экран 37, а также могут быть переданы на внешние устройства при помощи интерфейса сопряжения с устройствами 36.

Заметим, что сферический корпус 1 внутри покрыт специальным светопоглощающим соста-

вом для устранения паразитных отраженных световых импульсов.

Алгоритмом работы микроконтроллера в ходе обработки импульсов рассеянного света и полученных с помощью ФЭУ фотоэлектрических импульсов, усиленных усилителем и оцифрованных АЦП, предусмотрены: амплитудная дискриминация с верхним и нижним пороговыми уровнями; селекция импульсов, обеспечивающая их прохождение с длительностью, превышающей определенную пороговую величину; коррекция многократных совпадений полученных импульсов с принудительным прерыванием фотоэлектрических импульсов через время, равное длительности пролета частиц через счетный объем.

Записанная в микроконтроллере программа отслеживает параметры импульсов и подает соответствующую команду алгоритму для управления верхним пороговым уровнем и через ЦАП 31 и усилитель мощности 32 амплитудой излучения лазера. ЦАП 33 управляет воздуходувкой 13 для изменения скорости пролета частиц. Микроконтроллер учитывает изменения скорости полета частиц в алгоритме коррекции многократных совпадений для изменения длительности импульсов принудительного прерывания.

Верхний пороговый уровень алгоритма амплитудной дискриминации (ААД) $U_{в.АД}$ обеспечивает фильтрацию импульсов темнового тока. Причины появления шумовых импульсов связаны с термо-, авто- или фотоэмиссией прибора. Как следствие, средняя амплитуда шумовых импульсов меньше средней амплитуды импульсов полезного излучения. При практически неизменной форме импульсов последнее определяет существенное различие длительностей импульсов шума и импульсов полезного излучения по любому уровню амплитудной дискриминации. Выбор $U_{в.АД}$ в районе $0,5h_m$ (h_m — максимальная амплитуда фотоэлектрического импульса) позволяет уменьшить вклад шумовых импульсов в общем выходном сигнале на 70 – 80 %. При этом потеря полезного сигнала составляет всего лишь 3 – 4 %. Верхний уровень ААД задается с помощью ЦАП 31 и хранится в памяти. Формирование ААД выходного импульса завершается, когда задний фронт импульсов достигает нижнего порогового уровня ($U_{н.АД} < U_{в.АД}$).

На рис. 2 представлены преобразования фотоэлектрических импульсов ААД.

Пусть на вход ААД последовательно во времени поступают цифровые данные об импульсах полезного сигнала S и темнового тока $Ш$ (см. рис. 2, а). После прохода через порог с уровнем $U_{н.АД}$ — нижний уровень дискриминации — получаем прямоугольный импульс (см. рис. 2, б). Одновременно тот же сигнал, прошедший через

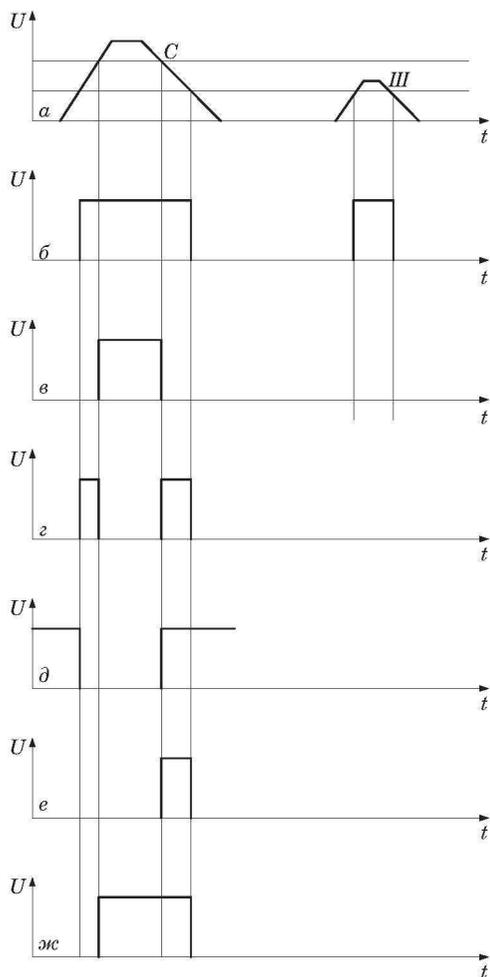


Рис. 2. Преобразование фотоэлектрических импульсов ААД

Fig. 2. Transformation of photoelectric pulses by the amplitude discrimination algorithm

порог с уровнем $U_{в.АД}$ — верхний уровень дискриминации, дает на выходе прямоугольный импульс меньшей длительности (см. рис. 2, в). Длительности импульсов будут, соответственно, равны времени превышения амплитуды импульса уровней $U_{н.АД}$ и $U_{в.АД}$. Таким образом, импульсы, амплитуда которых меньше $U_{н.АД}$, не поступят для дальнейшей обработки.

Далее полученные импульсы сравниваются, и сигнал формируется лишь при присутствии сигналов нижнего и верхнего порогов. В этом случае получаем два импульса, равных по длительности фрагментам фронта и спада отклика фотоэлектрического устройства между уровнями $U_{в.АД}$ и $U_{н.АД}$ (рис. 2, г). Из двух импульсов алгоритм оставляет лишь последний, равный по длительности фрагменту спада импульса от уровня $U_{в.АД}$ до $U_{н.АД}$. На выходе алгоритма формируются данные об отрицательном импульсе (рис. 2, д), который заканчивается одновременно с началом

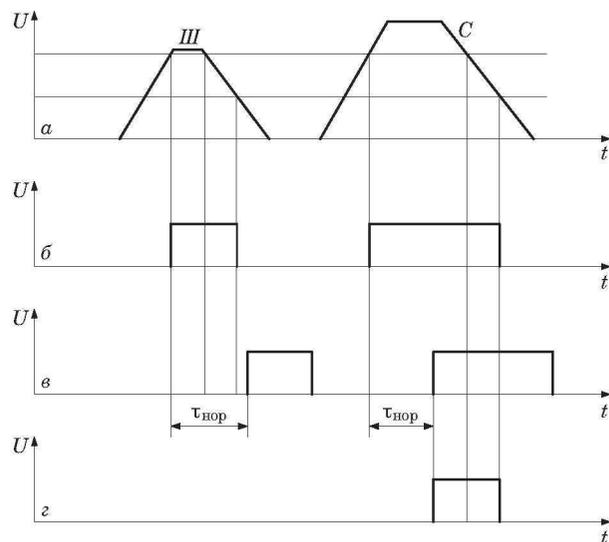


Рис. 3. Преобразование фотоэлектрических импульсов АСИ

Fig. 3. Transformation of photoelectric pulses by the pulse selection algorithm

второго импульса. Затем цифровая последовательность данных об обоих сигналах подается на алгоритмическую обработку, импульс на выходе которой появляется во время присутствия логической единицы на обоих входах (см. рис. 2, е).

Выходной сигнал с двумя порогами амплитудной дискриминации получается путем увеличения длительности импульса с выхода с уровнем $U_{в.АД}$ на длительность фрагмента спада импульса от $U_{в.АД}$ до $U_{н.АД}$. В результате на выходе алгоритма получаем импульс, равный по длительности импульсу, который начинается при достижении амплитуды уровня $U_{в.АД}$ и заканчивается при падении амплитуды ниже $U_{н.АД}$ (см. рис. 2, жс).

Алгоритмом селекции импульсов (АСИ) предусматривается фильтрация импульсов, длительность которых меньше заданной. Для этого применяется программная линия задержки. На рис. 3 приведены преобразования фотоэлектрических импульсов АСИ ($\tau_{пор}$ — время, на которое требуется задержать сигнал).

Пусть на вход АСИ последовательно во времени поступают импульсы полезного сигнала С и темнового тока III (см. рис. 3, а). Пройдя АСИ, сигнал сравнивается с сигналом, задержанным на время, равное минимальной длительности импульса, который еще требуется пропустить на выход (рис. 3, б, в). В виде импульса сигнал на выходе алгоритма появится в случае, когда прямой и задержанный импульсы пересекутся. Тогда на выходе АСИ появится импульс, равный по длительности $\tau - \tau_{пор}$ (рис. 3, з).

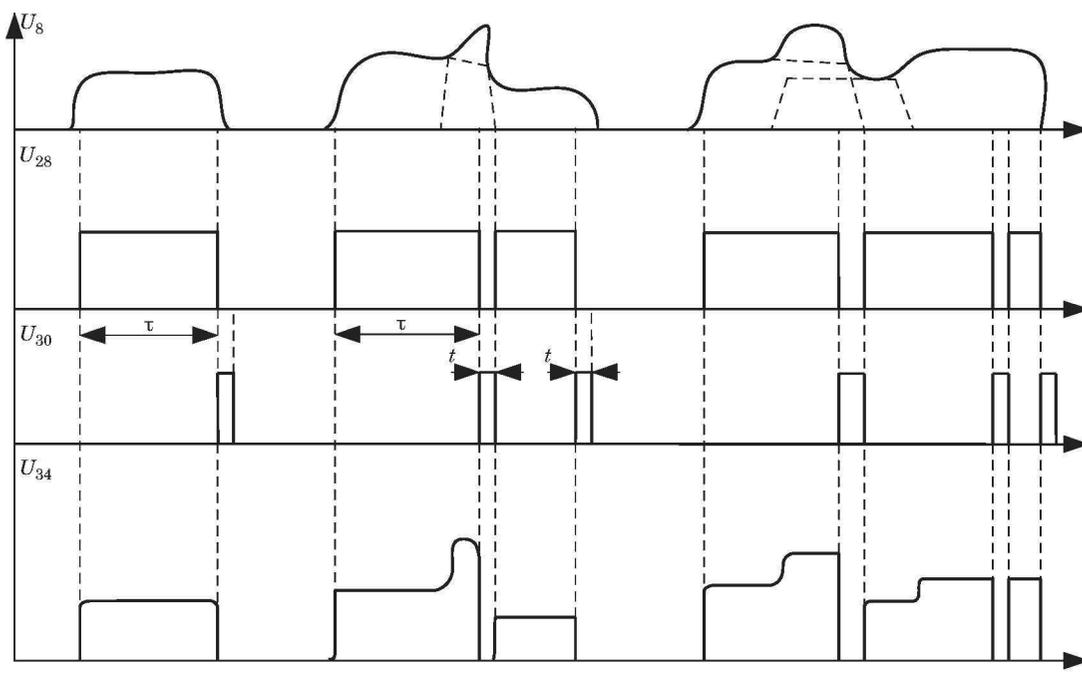


Рис. 4. Преобразование фотоэлектрических импульсов алгоритмом коррекции многократных совпадений

Fig. 4. Transformation of photoelectric pulses by the multiple coincidence correction algorithm

Алгоритмом коррекции многократных совпадений осуществляется принудительное прерывание на время t каждого фотоэлектрического импульса через интервал времени τ после начала импульса (рис. 4). То есть на выходе алгоритма из каждого входного импульса с длительностью, большей $t + \tau$, формируется несколько импульсов, количество которых равно целой части отношения длительности входного импульса к $t + \tau$. Если длительность входного импульса не превышает $t + \tau$, то на выходе алгоритма формируются импульсы без искажения.

Обсуждение результатов

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма обработки изображения для канала регистрации изображений частиц в четырех проекциях.

Процесс обработки изображения следующий [1]. На шаге 2 полученное с помощью устройства изображение поступает в DSP-процессор 29 (см. рис. 1). Отметим, что под изображением понимается целочисленная матрица, элементы которой меняются в диапазоне 0 – 255, что соответствует яркости в точках двумерной картины в оттенках серого.

На шаге 3 выполняется проверка появления объектов на изображении. Из последовательности кадров инициализируются соседние кадры, из которых вычитается постоянная составляющая. Измеряются энергетические спектры кадров, и полученные данные представляются в

виде матриц предыдущего и текущего кадров. Определяются разности отношений двух соседних кадров. Полученная разность сравнивается с порогом, и принимается решение о появлении объекта в текущем кадре изображения.

После определения наличия объектов на изображении на шаге 4 выполняется фильтрация полученных изображений. Пусть $g(s, t)$ — исходное изображение, S_{xy} — прямоугольная окрестность размером $m \times n$ с центром в точке (x, y) . Изображение $f(x, y)$ получается в результате обработки исходного изображения с помощью медианного фильтра:

$$f(x, y) = \text{median}_{(s,t) \in S_{xy}} g(s, t). \quad (1)$$

В результате с изображения удаляется импульсный шум. При применении медианного фильтра используется двумерное окно, имеющее центральную симметрию. При этом его центр располагается в центральной точке фильтрации. Размер окна составляет девять пикселей, и оно проходит по всем точкам изображения.

На шаге 5 выполняется коррекция фона для устранения неравномерности интенсивности светового потока. В процессе коррекции осуществляется вычитание заранее сохраненного в память снимка фона из полученного изображения частиц, в результате чего фоновое изображение удаляется из полученного снимка.

На шаге 6 проводится процесс улучшения границ, осуществляемый с помощью оператора Лапласа следующего вида:

$$\nabla^2 f = [f(x + 1, y) + f(x - 1, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1)] - 4f(x, y). \quad (2)$$

Применение данного оператора сводится к свертке изображения с маской квадратной формы, состоящей из девяти пикселей, в которой центральный пиксель является исследуемым.

Далее на шаге 7 происходит выбор порога бинаризации. Пороговое значение бинаризации считается выбранным верно, если выполняется равенство:

$$\frac{\mu_1 + \mu_2}{2} = k, \quad (3)$$

где μ_1, μ_2 — средние из значений пикселей, лежащих в пределах $0 - k$ и $k - 255$ (k — уровень серого, выбранный в качестве порога).

После нахождения порога бинаризации на шаге 8 выполняется процесс бинаризации. В результате пиксели, имеющие значение яркости меньше рассчитанного в выражении (3), считаются частицей.

Вследствие того, что на изображении много мелких объектов, не представляющих важности при исследовании, объекты меньше заданного числа пикселей удаляются с изображения на шаге 9.

Далее необходимо закрасить замкнутые области, которые первоначально были определены как фон. Для этого на шаге 10 равные 0 пиксели, для которых соседние пиксели равны 1, заменяются на 1.

На шаге 11 выделяются границы объектов на изображении. Для этого на бинарном изображении в 0 устанавливаются пиксели объекта, у которых четыре соседних по горизонтали и вертикали пикселя были равны 1. В результате «не сброшенными» остаются только пиксели границы объекта.

Дальнейшая обработка заключается в анализе изображений, соответствующих одной частице. Для этого на шаге 12 проводится разбиение изображения ($f(x, y)$) на части, соответствующие каждой проекции ($f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y), f_4(x, y)$). При этом $[f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y), f_4(x, y)] \in f(x, y)$, но $f_1(x, y) \notin f_2(x, y) \notin f_3(x, y) \notin f_4(x, y)$. И на шаге 13 подсчитывается количество объектов n_i в каждой части f_i , где $n_1 \in f_1(x, y), n_2 \in f_2(x, y), n_3 \in f_3(x, y), n_4 \in f_4(x, y)$.

На шаге 14 проводится проверка равенств. Если количество объектов в каждой из четырех частей $f(x, y)$ совпадает ($n_1 = n_2 = n_3 = n_4$), то от-

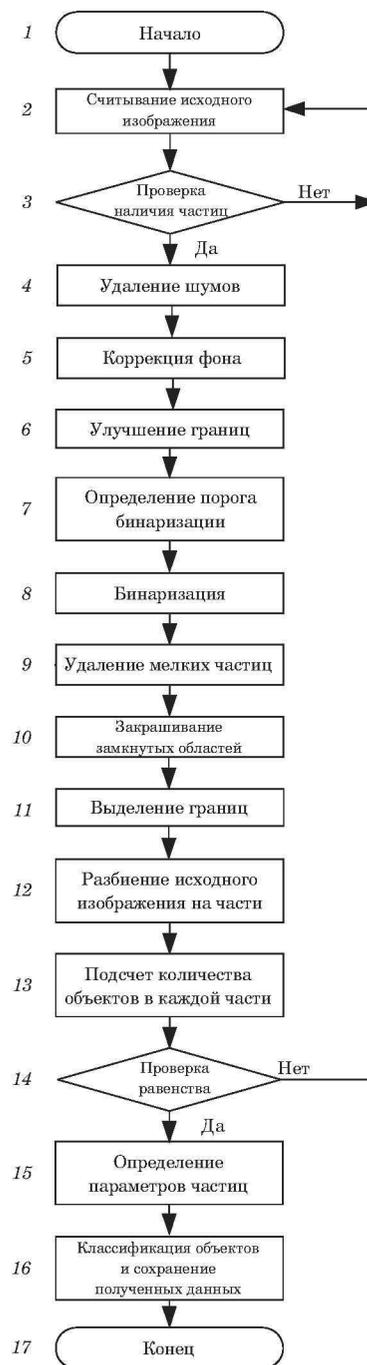


Рис. 5. Блок-схема алгоритма обработки изображений

Fig. 5. Block diagram of the image processing algorithm

сутствуют объекты, полученные в результате наложения частиц, и данное изображение в дальнейшем можно анализировать. Если количество объектов в каждой части изображения различно ($n_1 \neq n_2 \neq n_3 \neq n_4$), то на изображении существуют объекты, полученные в результате наложения частиц. В этом случае изображение пропускается и осуществляется переход к следующему шагу.

На шаге 15 определяются параметры частиц;

площадь

$$S(F) = \sum_{(x,y) \in F} (x,y),$$

равная количеству пикселей объекта (F — множество пикселей, относящихся к объекту);

высота

$$\Delta y = \max_{(x,y) \in F} \{y\} - \min_{(x,y) \in F} \{y\}$$

и ширина

$$\Delta x = \max_{(x,y) \in F} \{x\} - \min_{(x,y) \in F} \{x\}$$

вписанного прямоугольника;

выпуклая площадь

$$S_{\text{пр}}(P) = \sum_{(x,y) \in P} (x,y),$$

равная площади выпуклого многоугольника, в который вписан объект (P — множество пикселей, относящихся к многоугольнику, в который вписан объект);

и другие параметры.

Для классификации частиц на шаге 16 вычисляются коэффициенты формы:

коэффициент выпуклости

$$k_{\text{в}} = S(F)/S_{\text{пр}}(P); \quad (4)$$

коэффициент заполнения

$$k_{\text{з}} = \frac{S(F)}{\Delta y \Delta x}; \quad (5)$$

эксцентриситет эллипса с главными моментами инерции, равными главным моментам инерции объекта:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{c(F)^2}{d(F)^2}}, \quad (6)$$

где $c(F)$, $d(F)$ — большая и малая полуоси эллипса;

другие коэффициенты.

На основе полученных данных проводится классификация объектов для каждой проекции

частицы. В таблице приведен классификатор для идентификации форм изображений частиц в одной из полученных проекций.

Для окончательного вывода о форме частицы сложного строения и ее идентификации сравниваются рассчитанные коэффициенты формы для каждой из проекций и результаты, полученные по каналу счета и обработки фотоэлектрических импульсов ФЭУ с учетом отсечения неинформативных данных.

Для восстановления объемной формы частицы существует достаточно большое количество различных методов [12–20]. В предложенном устройстве предусмотрен специальный алгоритм восстановления объемной формы частицы, в котором счетная область пространства, разбитая на малые объемы — элементы разрешения (ЭР), нумеруется. Пространственные координаты ЭР фиксируются. На каждом зарегистрированном изображении выделяется область, занятая изображением частицы, и расчетным путем определяется положение всех ЭР на проекциях (плоскостях) зарегистрированных изображений. При этом выделяются номера тех ЭР, изображения которых попали в область изображения частицы. Кроме того, выбираются номера ЭР, оказавшиеся выделенными одновременно для всех зарегистрированных изображений. Форма трехмерного объекта восстанавливается как совокупность ЭР с выбранными номерами.

Заключение

Проведенные исследования показали, что устройство (см. рис. 1) позволяет получать в плоскости регистрации одновременно четыре изображения каждой частицы, а также регистрировать при помощи полупрозрачного эллиптического зеркала и ФЭУ дополнительные данные, дающие возможность оперативно управлять устройством, точнее определять параметры взвешенных частиц в расширенном размерном диапазоне и, в случае необходимости, восстанавливать их объемные формы. Устройство существенно повышает информативность и точность измерений. Погрешность измерений не превышает

Классификатор
Classifier

Форма	$k_{\text{в}}$	$k_{\text{з}}$	ε
Круг	0,9781	0,7822	0
Эллипс	0,9665	0,6602	0,8769
Квадрат	0,9669	0,6905	0,0501
Прямоугольник с отношением сторон 1:3	0,9495	0,4861	0,9454
Прямоугольник с отношением сторон 1:12	0,8816	0,2071	0,9971
S-образный объект	0,4595	0,4208	0,8728

1 %, что значительно ниже, чем у аналогичных приборов, погрешность которых составляет 3 – 5 %. Устройство может быть использовано для определения параметров взвешенных частиц в дисперсных средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов В. В. Телевизионный анализатор аэрозолей / 9-я Международ. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности»: сб. тр. — СПб.: Политехнический университет, 2010. С. 260 – 261.
2. Семенов В. В. Компьютерная обработка изображений в телевизионном анализаторе аэрозолей / Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 10(159). С. 88 – 97.
3. Семенов В. В., Асатуров Ю. Г., Ханжонков Ю. Б. Оценка потенциальной опасности возникновения поллинозов телевизионным анализатором аэрозолей / Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. Ч. 1.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
5. Антонов И. В., Алиевский В. М., Кадушников Р. М., Гроховский В. И. Морфологическое исследование наночастиц средствами анализа изображений / Вестник УГТУ-УПИ. 2005. № 10(62). С. 63 – 68.
6. Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В. и др. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. — М.: Энергоиздат, 1981. — 232 с.
7. Филиппов В. Л., Казаков В. Н., Толстая Н. В. Спектрометрия дисперсного состава аэрозолей. — Казань: КГЭУ, 2009.
8. Толстая Н. В., Филиппов В. Л., Казаков В. Н. Особенности конструкции оптико-электронных аэрозольных спектрометров и их влияние на точностные характеристики приборов / Вестник КГЭУ. 2010. Т. 5. № 2. С. 22 – 35.
9. Шмаргунов В. П., Полькин В. В. Счетчик аэрозольных частиц на базе АЗ-5 / Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 165.
10. Asatryan R. S., Karayan G. S., Khachatryan N. R. Methodology for metrological certification of an optical-electronic meter of aerosol particles in the environment / Colloquium-journal. 2018. N 3-1(14). P. 58 – 63.
11. Коломиец Г. А., Коломиец С. М. Анализатор размеров и формы аэрозолей «АРФА» / Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 553 – 555.
12. Соифер В. А., Сергеев В. В., Попов С. Б., Мясников В. В. Теоретические основы цифровой обработки изображений: учеб. пособ. — Самара: СГАУ, 2000. — 256 с.
13. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.
14. Яне В. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2007. — 584 с.
15. Щекин С. Б. Восстановление формы трехмерных объектов методами структурированного освещения / Науч.-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2007. № 43. С. 301 – 307.
16. Тулицын И. В. Реконструкция трехмерной модели объекта на основе стереопары при решении задач 3D моделирования / Вестник СибГУ имени М. Ф. Решетнева. 2011. № 3(36). С. 88 – 92.
17. Самойленко М. В. Восстановление формы трехмерного объекта по двухмерным изображениям / Науч.-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1074 – 1083. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1074-1083
18. Аленин В. А. Трехмерная реконструкция объектов из последовательности изображений / Молодой ученый. 2011. № 3-1. С. 33 – 35.
19. Котляр В. В., Залылов О. К. Итеративный алгоритм восстановления трехмерной формы объекта / Компьютерная оптика. 1996. Т. 16. С. 71 – 74.

20. Щекин С. Б. Восстановление формы трехмерных объектов методами структурированного освещения / Науч.-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2007. № 43. С. 301 – 307.

REFERENCES

1. Semenov V. V. Television analyzer of aerosols / 9th International Scientific and Practical Conference “Research, development and application of high technologies in industry”: collection of materials. — St. Petersburg: Politekhnikhesky universitet, 2010. P. 260 – 261 [in Russian].
2. Semenov V. V. Computer processing of images in a television analyzer of aerosols / Izv. YuFU. Tekhn. Nauki. 2014. N 10(159). P. 88 – 97 [in Russian].
3. Semenov V. V., Assaturov Yu. G., Khanzhonkov Yu. B. Evaluation of the potential danger of pollinosis by a television analyzer of aerosols / Inzh. Vestn. Dona. 2012. N 4. Part 1 [in Russian].
4. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. — Moscow: Tekhnosfera, 2005. — 1072 p. [Russian translation].
5. Antonov I. V., Alievsky V. M., Kadushnikov R. M., Grokhovsky V. I. Morphological study of nanoparticles by means of image analysis / Vestn. UGTU-UPI. 2005. N 10(62). P. 63 – 68 [in Russian].
6. Belyaev S. P., Nikiforova N. K., Smirnov V. V., et al. Optoelectronic methods for studying aerosols. — Moscow: Énergoizdat, 1981. — 232 p. [in Russian].
7. Filippov V. L., Kazakov V. N., Tolstaya N. V. Spectrometry of the disperse composition of aerosols. — Kazan: KGÉU, 2009 [in Russian].
8. Tolstaya N. V., Filippov V. L., Kazakov V. N. Features of the design of optical-electronic aerosol spectrometers and their influence on the accuracy characteristics of devices / Vestn. KGÉU. 2010. Vol. 5. N 2. P. 22 – 35 [in Russian].
9. Shmargunov V. P., Polkin V. V. Aerosol particle counter based on АЗ-5 / Prib. Tekhn. Éksper. 2007. N 2. P. 165 [in Russian].
10. Asatryan R. S., Karayan G. S., Khachatryan N. R. Methodology for metrological certification of an optical-electronic meter of aerosol particles in the environment / Colloquium-journal. 2018. N 3-1(14). P. 58 – 63.
11. Kolomiets G. A., Kolomiets S. M. Aerosol Size and Shape Analyzer “ARFA” / Optika Atmosf. Okeana. 1999. Vol. 12. N 6. P. 553 – 555 [in Russian].
12. Soifer V. A., Sergeev V. V., Popov S. B., Myasnikov V. V. Theoretical foundations of digital image processing. — Samara: SGAU, 2000. — 256 p. [in Russian].
13. Shapiro L. Computer vision. — Moscow: Binom. Laboratoriya znanii, 2006. — 752 p. [in Russian].
14. Yane V. Digital image processing. — Moscow: Tekhnosfera, 2007. — 584 p. [in Russian].
15. Shchekin S. B. Restoring the shape of three-dimensional objects using structured lighting methods / Nauch.-Tekhn. Vestn. Inf. Tekhnol. Mekh. Opt. 2007. N 43. P. 301 – 307 [in Russian].
16. Tupitsyn I. V. Reconstruction of a three-dimensional model of an object based on a stereopair when solving 3D modeling problems / Vestn. SibGU. 2011. N 3(36). P. 88 – 92 [in Russian].
17. Samoilenko M. V. Restoring the shape of a three-dimensional object from two-dimensional images / Nauch.-Tekhn. Vestn. Inf. Tekhnol. Mekh. Opt. 2017. Vol. 17. N 6. P. 1074 – 1083 [in Russian]. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1074-1083
18. Alenin V. A. Three-dimensional reconstruction of objects from a sequence of images / Mol. Uchenyi. 2011. N 3 – 1. P. 33 – 35 [in Russian].
19. Kotlyar V. V., Zalyalov O. K. An iterative algorithm for restoring the three-dimensional shape of an object / Komp'yut. Opt. 1996. Vol. 16. P. 71 – 74 [in Russian].
20. Shchekin S. B. Restoring the shape of three-dimensional objects using structured lighting methods / Nauch.-Tekhn. Vestn. Inf. Tekhnol. Mekh. Opt. 2007. N 43. P. 301 – 307 [in Russian].