

---

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

---

УДК 541.182

**Контуш С.М.<sup>1</sup>, Щекатолина С.А.<sup>2</sup>, Гужва А.Ю.<sup>1</sup>, Бурлака Т.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, кафедра теплофизики,

<sup>2</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий.

E-mail: skontush@odessaglobe.com

### **Лазерные счетчики частиц аэрозоля для экологических измерений**

*Описан принцип работы разработанного лазерного счетчика частиц аэрозоля, позволяющий определить массовое распределение частиц аэрозоля. Проводится сравнение с результатами на стандартной установке для осаждения частиц на фильтр.*

**Введение.** В течение многих десятилетий измерение количества взвешенных в воздухе частиц сводилось к осаждению частиц на фильтре в результате пропускания через него определенного количества воздуха и взвешиванию фильтра до и после экспозиции (весовой метод)[1]. Основным недостатком таких измерений – большой период между забором пробы аэрозоля и получением результата измерений. Это связано с тем, что фильтрующий диск с осажденными на нем частицами необходимо взвесить до и после экспозиции на чувствительных весах, что обычно необходимо проводить в лабораторных условиях. Этот метод дает хорошие результаты, и поэтому он неоднократно усовершенствовался для получения данных в автоматическом режиме и для дистанционных измерений. Так, вместо взвешивания через осадок на фильтре пропускался поток бета-частиц, и по его поглощению определялась масса осадка. В другом случае измерялась собственная частота вибрации цилиндрического элемента с фильтром, что показывало изменение его массы.

В любом случае эти приборы давали сведения об общем количестве частиц в воздухе, хотя в последние годы найдено, что очень желательно измерять количество (массу) частиц размером до 2,5 мкм и больших, чем 2,5 мкм. Это связано с тем, что именно малые частицы легко проникают в легкие человека. Поэтому для таких измерений желательно использовать другие методы.

**Новый лазерный счетчик частиц аэрозоля.** Существующие модели фотоэлектрических счетчиков частиц предназначены для измерения счетной концентрации частиц в воздухе и их размеров, так как именно количество частиц в воздухе и их размеры являются факторами, влияющими на технологические процессы. В экологии с санитарно-гигиенической точки зрения необходимо знать массу частиц в единице объема. Переход от счетной концентрации к весовой не является простой операцией, и именно поэтому простое использование существующих моделей счетчиков в экологии невозможно.

Разработанный в ООО Новатек-электро лазерный счетчик частиц аэрозолей основан на известных принципах рассеяния света одиночными частицами. В отличие от счетчиков, разработанных в 60-е годы 20-го века, современные модели счетчиков используют в качестве источников света лазерные диоды разной мощности. Наряду с этим, развитие фотоники привело к резкому уменьшению размеров фотоприемников. Повсеместно для этих целей используются фотодиоды вместе с малошумящими электронными преобразователями ток-напряжение. Кроме того, для обработки электрических импульсов применяются цифровые методы. Все это дало возможность резко уменьшить габариты приборов, и создать легкие переносные счетчики частиц аэрозолей.

Важным требованием в конструкции счетчиков является формирование однородного потока света, так чтобы пересечение его частицами в любой точке привело к одному и тому же рассеянию света. Использование лазерных источников света создает дополнительные трудности при разработке счетчиков частиц, так как лазерное излучение лазерных диодов имеет гауссово распределение интенсивности по сечению луча.

В зависимости от решаемых измерительных задач пересечение потока света с потоком аэрозоля (то есть создание так называемого счетного объема) можно осуществить разным образом. Именно, в идеальном варианте поток аэрозоля должен быть меньше по сечению потока света, чтобы все частицы пересекали этот поток. Однако это приводит к требованию создания потока света большого сечения, что трудно осуществить с лазерами небольшой мощности для достижения высокой чувствительности прибора. Кроме того, необходимо формировать поток аэрозоля небольшого сечения, а это приводит к трудности пропускания через прибор большого количества воздуха. В другом случае, возможно регистрировать в широком потоке аэрозоля лишь небольшую долю частиц с помощью узкого лазерного луча, и затем экстраполировать полученные данные на весь поток аэрозоля. В этом варианте, однако, необходимо, чтобы лазерный луч имел одну и ту же интенсивность в любой точке (П-образный профиль). Известны разнообразные методы формирования плоского однородного лазерного луча. С помощью, так называемых дифракционных оптических элементов (ДОЭ), можно сформировать любые профили лазерного луча за счет записи на них определенной голографической картины. Во многих случаях однородности освещения можно достичь с помощью нелинейной оптики. Однако стоимость этих способов, как правило, довольно высока.

Тем не менее, оба способа широко используются в фотоэлектрических счетчиках частиц аэрозоля. Первый вариант дает высокую точность измерений счетной концентрации аэрозоля, так как регистрируются все частицы, проходящие через лазерный луч. Во втором варианте необходима экстраполяция данных, что, естественно, значительно уменьшает точность измерений. Но простота реализации второго варианта приводит к тому, что практически все счетчики частиц аэрозоля, не предназначенные для измерений в чистых комнатах, изготавливаются по второму варианту.

В работе [2], выполненной с применением электронных элементов, имеющих большие габариты, рассеяние света каждой частицей регистрируется одно-

временно двумя фотоприемниками, имеющими разную апертуру. Затем оба сигнала сравниваются между собой и тем самым выбираются те, которые возникли от частиц, пересекающих лазерный луч в его центре. Иными словами, регистрируется траектория движения частицы.

Использование новых малогабаритных электронных элементов, в первую очередь, фотодиодов, позволяет использовать с некоторыми изменениями вышеприведенный принцип для регистрации рассеяния света только от тех частиц, которые пересекают луч вблизи его центра, то есть там, где интенсивность света почти постоянна.

В разработанном лазерном счетчике аэрозольных частиц используется лазерный диод с длиной волны около 630 нм мощностью порядка 10 мВт. С помощью простой оптики сформирован плоский луч толщиной около 100 мкм и шириной около 1 мм. Слева и справа от луча установлены 2 фотодиода без какой-либо оптики, и сигналы от этих фотодиодов будут одинаковы в том случае, когда частицы проходят на равных расстояниях от этих фотодиодов. В такой оптической схеме свет от частиц рассеивается примерно под углом 90°. Как можно показать из теории рассеяния света, в этом случае зависимость между размерами частиц и интенсивностью рассеянного ими света является монотонной. Сравнивая между собой амплитуды сигналов, можно зарегистрировать лишь те частицы, которые проходят вблизи центра лазерного луча. Полученные амплитуды сигналов от фотодиодов переводятся в цифровую форму для последующего расчета параметров аэрозоля.

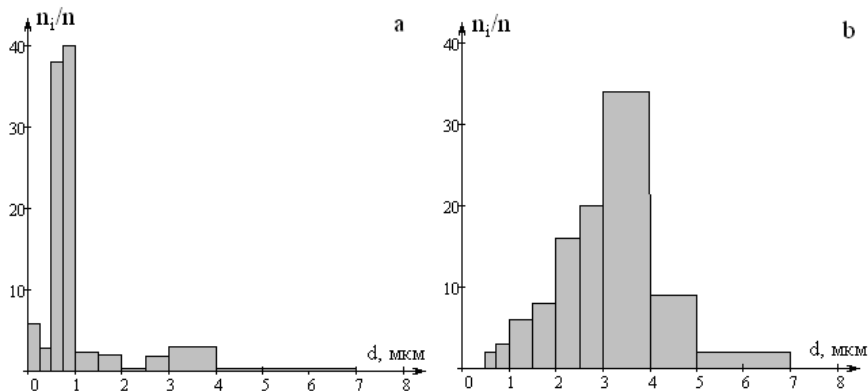
Применительно к экологическим измерениям особенно важным является получение данных о массовой концентрации аэрозоля. Это можно осуществить, если данные о размерах частиц с помощью микроконтроллера пересчитать в объем каждой частицы (в предположении ее сферичности) и затем в массу (также в предположении, что известна плотность вещества частицы). Ясно, что сумма масс всех частиц в единице объема и есть массовая концентрация аэрозоля.

На собственном ЖК дисплее счетчика информация о массовой концентрации отображается в единицах мг (или мкг) на  $1\text{ м}^3$ . При этом по умолчанию считается, что плотность вещества частиц равна  $2,6\text{ г/см}^3$ . Однако в программе счетчика предусмотрено изменение этого значения для других типов аэрозолей.

Там же, на дисплее можно найти информацию о количестве прошедшего через счетчик воздуха, а также данные о массовой концентрации частиц по трем фракциям, о счетной концентрации аэрозоля и о скорости счета частиц.

Для получения более детальной информации о дисперсном составе аэрозоля предусмотрено подключение счетчика к компьютеру, для чего разработана служебная программа (пример ее работы показан ниже).

Наряду с разработкой оптической и электронной частей счетчиков частиц, важнейшим шагом в разработке счетчиков является проверка их работы с помощью стандартных аэрозольных измерений. Два вида измерений необходимо провести для такой проверки. Во-первых, необходимо получить соответствие между амплитудой сигнала на фотодиоде и размером частицы. Для таких изме-



**Рис. 1** Распределение по размеру (эквивалентному диаметру) а) частиц окиси кремния, полученного в кипящем слое и б) частиц нашатыря, полученных возгонкой в камере.  
 а) Распределение для 5304 частиц, объем прокаченного воздуха 17.75 см<sup>3</sup>.  
 б) Распределение для 45330 частиц, объем прокаченного воздуха 58.34 см<sup>3</sup>.

рений необходимо использовать монодисперсные аэрозоли, то есть аэрозоли с частицами одного и того же размера.

В качестве источника монодисперсных частиц использован монодисперсный порошок из сферических частиц окиси кремния, который изготавливается фирмой Seahostar KE, Nippon Shokubai (Япония). В соответствии с паспортом частицы фракции KE-P100 имеют геометрический диаметр в пределах от 0,94 до 1,25 мкм. Для получения аэрозоля из таких частиц собрана установка, описанная в [2]. В ней в цилиндрической ячейке с пористым дном формируется восходящим потоком воздуха кипящий слой из стеклянных микросфер диаметром около 300 мкм, в который добавлено небольшое количество монодисперсного порошка окиси кремния. За счет трения микросфер друг о друга происходит дробление агрегатов частиц окиси кремния и унос их из кипящего слоя с образованием потока аэрозоля. В работе [2] показано, что такой метод распыления порошка действительно удобен для получения монодисперсного аэрозоля.

Для проверки работы разработанного счетчика проба получаемого монодисперсного аэрозоля забиралась в счетчик в режиме анализа дисперсного состава с помощью внешнего компьютера. Результаты измерений одной из проб приведены на рис. 1а. Как видно, счетчик показал весьма высокую монодисперсность получаемого аэрозоля. Тем самым можно найти одну из реперных точек для градуировки счетчика.

Проверка работы счетчика по измерению массовой концентрации проводилась на экспериментальном стенде, состоящем из аэрозольной камеры объемом около 400 л и стандартной установки для осаждения частиц на фильтр и определения веса осадка. В камере аэрозоль получался методом возгонки некоторых веществ, например, канифоли. В табл. 1 и 2, а также на рис. 2 приведены некоторые сравнительные данные измерений массовой концентрации аэрозоля

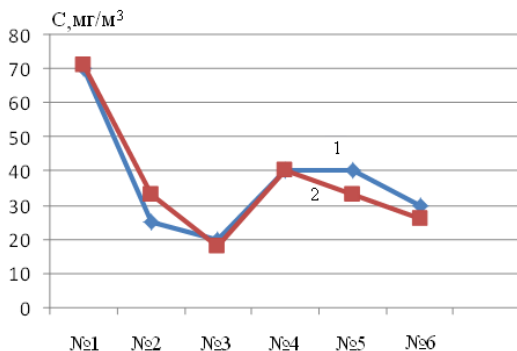
**Табл. 1** Измерение загрязненности воздуха в камере с помощью фильтра.

№	1	2	3	4	5	6
$M_0$ , мг	394	376	381	385	389	397
$M$ , мг	401	381	385	389	397	400
$M-M_0$ , мг	7	5	4	4	8	3
$V$ , м <sup>3</sup>	0.10	0.20	0.20	0.10	0.20	0.10
$C$ , мг/м <sup>3</sup>	70	25	20	40	40	30

Здесь  $M_0$  – масса фильтра до измерений, мг;  $M$  – масса фильтра после пропускания воздуха, мг;  $V$  – объем прокачанного загрязненного воздуха м<sup>3</sup>;  $C$  – массовая концентрация аэрозоля в воздухе мг/м<sup>3</sup>

**Табл. 2** Измерение загрязненности воздуха в камере с помощью лазерного счетчика.

№ опыта	Показания счетчика $M$ , мг/м <sup>3</sup>										Среднее значение, мг/м <sup>3</sup>	Погрешность $\sigma$ , мг/м <sup>3</sup>	$\delta$ , %
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$			
1	75	74	70	68	70	65	67	73	74	76	71	3,6	5,0
2	37	37	34	30	33	36	32	32	36	32	33	1,7	5,1
3	17	19	18	17	18	18	19	19	17	19	18	0,8	4
4	40	39	42	40	42	38	37	41	43	39	40	1,8	4,5
5	33	30	33	32	34	36	35	31	34	33	33	2,5	7,5
6	27	26	25	27	25	24	24	27	26	25	26	1,2	5,6



**Рис. 2** Сравнение результатов измерения загрязнения воздуха в камере по различным методикам: 1 – с помощью фильтра; 2 – с помощью лазерного счетчика частиц аэрозолей.

канифоли методом осаждения частиц на фильтре и с помощью счетчика частиц аэрозоля для различных серий опытов. В качестве значения плотности вещества частиц в счетчике введено значение, равное 2,65 г/см<sup>3</sup>.

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что, во-первых, разработанный счетчик частиц аэрозолей характеризуется довольно высокой чувствительностью и способен выделять из измеряемых аэрозолей отдельные фракции частиц; во-вторых, встроенный в него микрокон-

троллер позволяет суммировать данные по отдельным фракциям частиц и получать значения массовой концентрации аэрозоля.

### **Литература:**

1. *Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И.* Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
2. *Terttaliisa Lind, Steffen Danner, Salih Guentay* Monodisperse fine aerosol generation using fluidized bed // Powder Technology. – 2010. – V. 199. – P. 232-237.

***Контуш С.М., Щекатолина С.А., Гужва А.Ю., Бурлака Т.В.***

### **Лазерні лічильники частинок аерозолю для екологічних вимірювань**

*Описаний принцип роботи розробленого лазерного лічильника частинок аерозоля, що дозволяє визначити масовий розподіл частинок аерозоля. Проводиться порівняння з результатами на стандартній установці для осадження частинок на фільтр.*

***Kontush S.M., Tshekatolina S.A., Gugva A.Y., Burlaka T.V.***

### **Laser particle counters for environmental aerosol measurements**

*Operation mechanism of developed laser particle counter, allowing to determine aerosol particles mass distribution, is described. Comparison is made with results, obtained via standard setup for deposition of particles on filter.*