

УДК 543.275.08:621.383.001.2

**Контуш С. М.<sup>1</sup>, Шингарёв Г. Л.<sup>1</sup>, Черныш Б. Б.<sup>1</sup>, Машненко К. В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>НИИ физики Одесского национального университета им. И.И. Мечникова;

<sup>2</sup>ООО «Новатек-электро», г. Одесса.

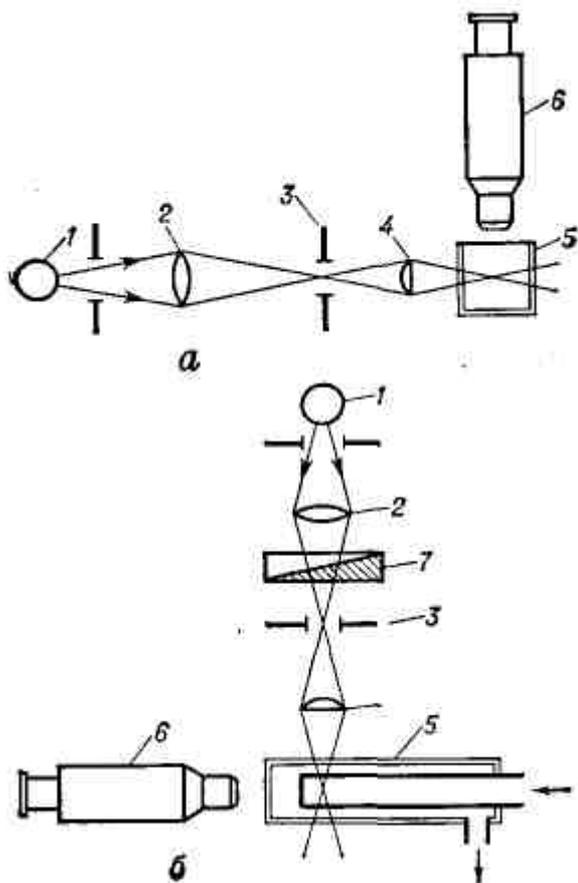
E-mail: grishin52@gmail.com

## **On-line оптические измерения массовой концентрации аэрозолей в экологии**

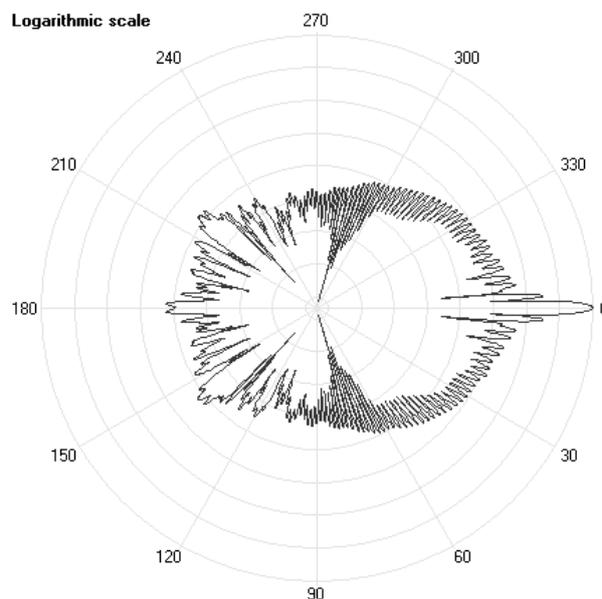
*В работе описан оригинальный способ регистрации частиц в аэрозольном счётчике и переносной прибор, реализующий данный способ. Этот счётчик, являющийся первым отечественным анализатором дисперсного состава воздуха, позволяет передавать on-line через беспроводные сети полученную информацию в цифровом виде для мониторинга экологической обстановки в различных регионах.*

**Ключевые слова:** оптические счетчики частиц, аэрозоли, мониторинг атмосферы

По данным Всемирной организации здравоохранения от загрязнения атмосферного воздуха ежегодно в мире происходит около четырёх миллионов преждевременных смертей. Например, в Евросоюзе от воздействия на дыхательную систему людей опасными аэрозольными частицами диаметрами меньше 2,5 микрон такая смертность оценивалась почти 500 тысяч человек в год. В Китае в 2015 году подобный показатель достиг 1,1 миллиона. В Украине же концентрацию этих агрессивных частиц вообще не мониторят современными методами, соответствующими требованиям директив ЕС [1]. Так в 2016 году во всей стране существовало всего 129 постов в 39 городах, где проводились измерения массовой концентрации частиц в воздухе без определения её по фракционному составу [2]. Причём эти измерения сводятся к долговременному процессу пропускания через специальные аналитические фильтры определенного количества исследуемого атмосферного воздуха и взвешиванию фильтров как до, так и после экспозиции. Данный контроль запылённости носит рутинный характер, так как фильтры со вспомогательной аппаратурой необходимо доставить сначала к местам забора пробы, а затем после измерений – в лаборатории для проведения прецизионного взвешивания на чувствительных весах и обработки результатов подобного «мониторинга». Такой весовой метод, существующий не одно десятилетие, даёт хорошие результаты, и поэтому он неоднократно усовершенствовался для получения данных дистанционных измерений в автоматическом режиме. Например, вместо взвешивания фильтра, через осадок на нём пропускался поток бета-излучения, и по величине его поглощения определялась масса осаждённых частиц аэрозоля. В другом случае измерялась собственная частота вибрации цилиндрического элемента с фильтром, что показывало изменение его массы. В любом случае такие приборы давали сведения об общем количестве частиц в воздухе, хотя в последние годы установлено, что желательнее измерять количество частиц (их массу) диаметром до 2,5 мкм, а также ступенчато и больших размеров. Это связано с тем, что



**Рис. 1.** Схемы регистрации частиц в световом потоке: а) щелевого и б) поточного ультрамикроскопа: 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – оптическая щель, 4 – осветительный объектив, 5 – кювета, 6 – наблюдательный микроскоп, 7 – фотометрический клин



**Рис. 2.** Диаграмма рассеяния лазерного света ( $\lambda = 0,65$  мкм), от капли воды радиусом  $r = 8$  мкм. Полярные координаты

именно малые частицы глубоко проникают в лёгкие человека. Поэтому для таких измерений по фракциям дисперсной компоненты необходимо использовать другие способы.

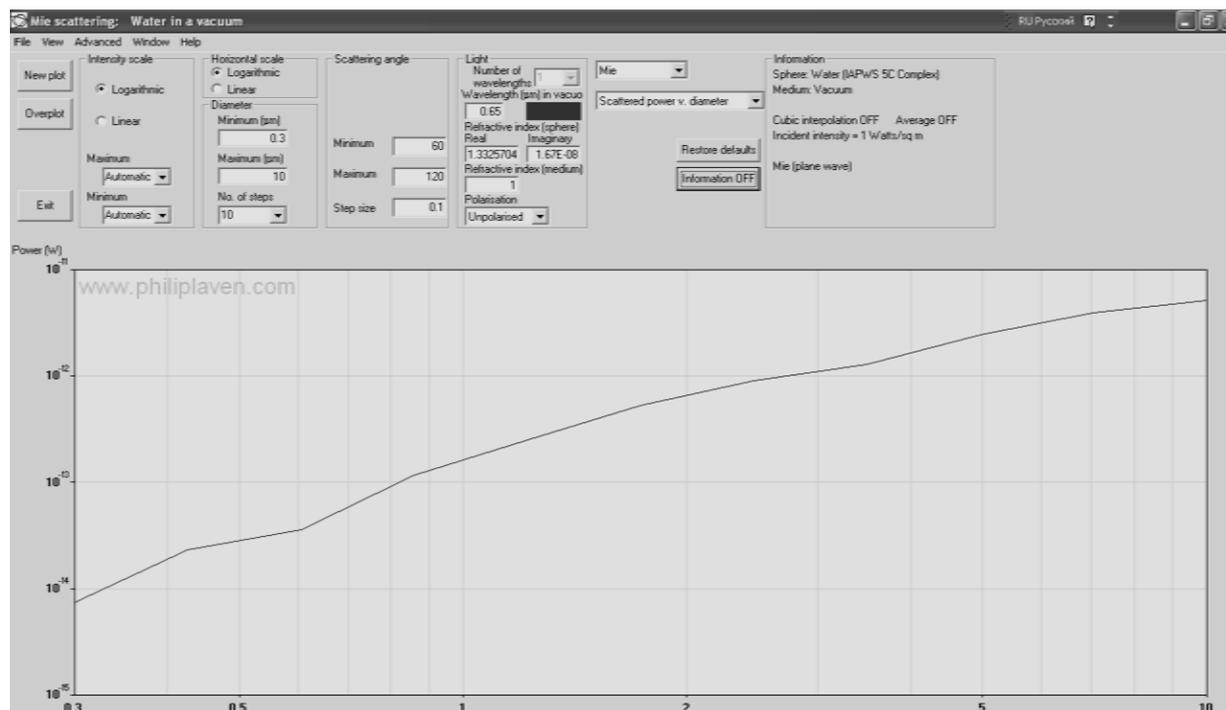
Широко распространённые в физике и технике оптические методы измерений нашли применение также и в физике аэрозолей [3]. К примеру, в метеорологии для зондирования атмосферы используются лидарные (лазерные) системы с уникальной оптикой и сложной системой обработки данных. Оптический метод в экологии применяется для контроля эффективности очистки воздуха промышленными электрофильтрами, так как в подобных измерениях требуется лишь ответ в виде «хорошо» или «плохо» для подачи сигнала в автоматическую систему управления предприятия. Эти измерения сводятся к определению степени поглощения света аэрозолем путем установки на выходе электрофильтра осветителя и фотоприёмника. Никаких данных о массовой концентрации частиц при этом не получают. Ясно, что измерения поглощения света дисперсной средой реально лишь при довольно высокой концентрации аэрозоля. До последнего времени массовая концентрация частиц после очистки воз-

духа электрофильтрами по нормативам ЕС должна быть не более  $50 \text{ мг/м}^3$ . При такой концентрации ослабление света на расстоянии порядка 5 м составит  $\approx 10\%$ .

Экологические измерения, связанные с загрязнением воздуха взвешенными частицами, например, на улицах городов, имеют дело со значительно меньшими значениями концентрации. В такой ситуации фильтровальными методами довольно сложно измерять концентрацию взвешенных частиц, так как экспозиция процесса осаждения на фильтр при малых концентрациях занимает большое время. В другом крайнем случае, при очень малых концентрациях частиц, которые необходимо измерять в некоторых технологических процессах (например, агрессивных средах) фильтровальные методы совершенно неприемлемы. Следовательно, для эффективного использования оптических способов измерения в экологии необходимо регистрировать отдельные частицы, витающие в воздухе. Большое распространение в физике аэрозолей получил оптический метод ультрамикроскопии, с помощью определённой оптической схемы регистрируется свет, рассеянный отдельными частицами. Типичным прибором такого типа является визуальный поточный счётчик частиц ВДК, разработанный в 50-х годах в СССР [3]. Его схема приведена на рис.1б (здесь же на рис.1а показана схема наблюдения частиц аэрозоля в фокусе светового потока). Частицы в нём вместе с потоком газа пересекают узкий луч света, и оператор с помощью микроскопа подсчитывает вспышки света, рассеянного частицами по одной. На этом же принципе созданы разнообразные модели так называемых фотоэлектрических счётчиков частиц. В этих приборах с помощью высокочувствительных фотоприёмников измеряется интенсивность рассеяния света отдельными частицами, преобразованная в электрический сигнал. По этим данным на основании теории рассеяния света частицами получают сведения об их размерах, и, в конечном счёте, определяют распределение частиц аэрозоля по размерам. Зная скорость потока газа (воздуха), несущего частицы и плотность вещества самих частиц, легко рассчитать вначале счётную, а затем и массовую концентрацию аэрозоля (для условно шарообразных частиц).

Развитие электроники позволило в 60-х годах XX-го века полностью автоматизировать измерения счётчиками частиц с помощью чувствительных фотоэлементов – фотоумножителей. В качестве источников света использовались специально сконструированные осветительные схемы с лампами накаливания. Тем не менее, счётчики частиц, созданные на старой элементной базе (ламповая электроника и лампы накаливания в осветителе) были малопригодны для экологии из-за сравнительно больших габаритов.

Примерно 20 лет назад ситуация изменилась в связи с появлением лазерных излучателей, микроэлектроники и высокочувствительных малогабаритных фотоэлементов (фотодиодов). Размеры счётчиков частиц аэрозолей существенно уменьшились, а использование встроенных микроконтроллеров позволило получать в режиме on-line важные данные об аэрозолях, например, кривые распределения частиц по размерам. На этой стадии развития оптических методов регистрации частиц аэрозоля возникла необходимость определения интенсивности рассеянного одиночной частицей света в разных направлениях (под раз-



**Рис. 3.** Вид изображения на дисплее компьютера зависимости энергии рассеянного частицей света от её размера в заданном телесном угле. Расчёты по программе «Mie Plot»

ными углами). Такие расчёты были многократно выполнены на основании развитой в начале XX-го века теории рассеяния света Ми (немецкого физика Густава Ми, 1868-1957). Сейчас такие вычисления несложно проводить с помощью вычислительной техники. В качестве примера можно привести программу «Mie Plot», созданную профессором Филиппом Лавеном [4]. Вид интерфейса приведен на рис. 2. Здесь показана вычисленная индикатриса рассеянного «красного» света (длина волны  $\lambda = 0,65$  мкм) для капли воды диаметром 8 мкм.

На рис. 3. представлен фрагмент расчётной зависимости интенсивности рассеянного частицей света от её размера в заданном телесном угле (рассеяние в сторону от падающего на частицу потока света). Из этого рисунка для вышеприведенного случая видно, что в телесном угле от 60 до 120 градусов при изменении размера капель воды от 0,3 до 10 мкм интенсивность рассеянного света изменяется почти на три порядка.

Эти сведения важны при конструировании фотоэлектрических счётчиков частиц. Однако использование лазерных диодов, как источников света, заставило принимать меры для правильного освещения потока частиц с целью получения точного соответствия между размером частицы и регистрируемым фотоприёмником рассеянным ею светом. Дело в том, что луч света в области движения частиц должен иметь однородную интенсивность, что довольно трудно осуществить на практике с потоком света от лазерных диодов, которые излучают так, что распределение интенсивности света по их сечению имеет вид кривой Гаусса. В противном случае точность измерения размеров частиц ухуд-

шается. Во многих случаях можно регистрировать лишь частицы, проходящие вблизи максимума интенсивности потока света.

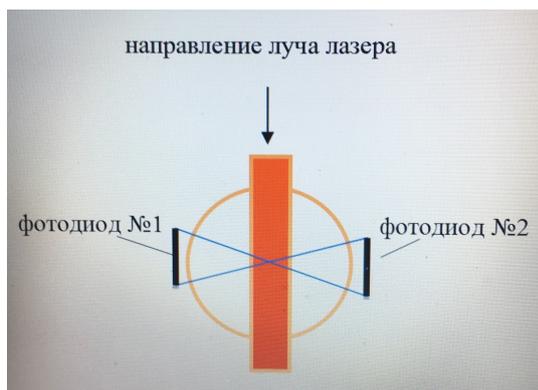
В экологии, как уже упоминалось выше, принято измерять не счётную, а массовую концентрацию в связи с использованием вплоть до настоящего времени метода осаждения частиц на фильтре. Измеряемая приборами счётная концентрация частиц качественно связана с массовой концентрацией, которая может быть точно рассчитана на основании счётной, если частицы сферичны и известна их плотность. Поэтому использование счётчиков аэрозольных частиц важно в экологии. Отметим важное преимущество счётчиков при таких измерениях – ими можно измерять очень малую концентрацию аэрозолей. А вот фильтровальный метод для таких измерений малопригоден, так как необходимо прокачивать через аналитический фильтр значительный объём исследуемого воздуха, чтобы получить на нем ощутимое количество осадка для взвешивания.

Технически при измерениях счётчиками каждый зафиксированный импульс, соответствующий проходящей через лазерный луч частице, обрабатывается микроконтроллером и рассчитывается её размер. Затем может быть оценена масса каждой частицы исходя из предполагаемой плотности частиц, и массы всех этих частиц суммируются. Само значение плотности в этих расчётах всегда под вопросом, поэтому оно задаётся в качестве параметра. В некоторых случаях плотность частиц известна, и поэтому измерения счётчиками массовой концентрации аэрозоля вполне оправдано. Общей практикой является введение в счётчик опции «плотность частиц», которая изменяет расчёты микроконтроллером размеров частиц.

При проведении измерений в неизвестных природных и производственных условиях принято считать, что плотность частиц равна  $2.6 \text{ г/см}^3$ . Это значение считается типичным для аэрозолей, образующихся за счет воздействия ветра на сухую почву.

Счётчики частиц аэрозолей, измеряющие численную концентрацию, нашли широкое применение в технологии для контроля чистоты воздуха, например, при производстве лекарств и электронных компонент. Некоторые из современных счётчиков частиц уже используются в экологии для измерений загрязнения воздуха взвешенными частицами. Точность же измерений такими счётчиками прямо зависит от условий взаимодействия частиц с системой регистрации и анализа импульсов.

В настоящей статье описан оригинальный счётчик частиц аэрозоля, предназначенный для экологических измерений (и не только). В конструкции счётчика, имеющего название ИЗ-124 (измеритель запылённости), используется новый метод регистрации частиц в центральной зоне лазерного луча. Схема измерений рассеянного частицами света при пересечении ими луча приведена на рис. 4. Лазер освещает поток аэрозоля, но непосредственно вблизи луча напротив друг друга установлены два фотодиода (№1 и №2), которые одновременно регистрируют свет, рассеянный каждой частицей. Если частица проходит через центральную зону лазерного луча, то на фотодиодах возникнут практически одинаковые по амплитуде сигналы. Если же частица смещена относительно центральной линии луча, то амплитуды сигналов будут разными. Электронный



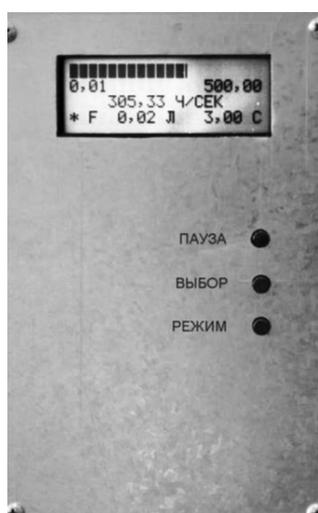
**Рис. 4.** Схема измерительного объема счётчика аэрозольных частиц ИЗ-124

Каждый имеет размер фотоприёмной зоны 3×3 мм. Исходя из этих параметров, легко рассчитать изменение телесных углов, направленных на фотодиоды от разных точек внутри луча и, следовательно, найти разницу в энергиях рассеянного частицами света. Как показали измерения с использованием монодисперсного аэрозоля, счётчик способен регистрировать частицы в диапазоне диаметров от  $\approx 0,3$  мкм до 10 мкм.

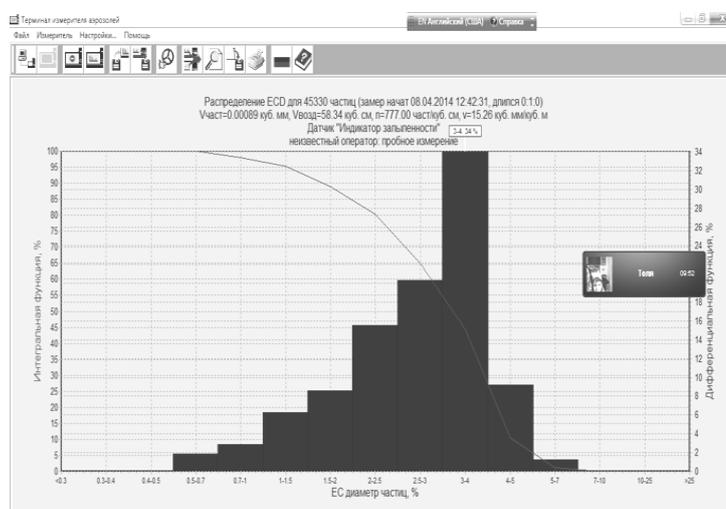
Результаты измерений представляются в различных вариантах: либо на встроенном в счётчик жидкокристаллическом дисплее (автономный вариант, см. Рис.5), либо на экране состыкованного с прибором компьютера (см. Рис. 6). В автономном варианте интерфейс счётчика ИЗ-124 весьма информативный, позволяющий использовать три вида отображения информации с индикацией объема прокаченного через счётчик воздуха за задаваемое время измерения, числа частиц, подсчитанных за секунду (частиц/с), численной концентрации (частиц/см<sup>3</sup>), либо массовой концентрации (в единицах мкг/см<sup>3</sup>). Предусмотрено отображение измерений по трем фракциям: частиц, больших по диаметру, чем 0,5 мкм; больших, чем 1,0 мкм и больших, чем 2,5 мкм при задаваемых оператором различных плотностей вещества частиц (дорожной пыли, воды,

блок преобразует, сигналы в цифровую форму и сравнивает их между собой. При некоторой заданной разнице сигналов они не будут учитываться, и, следовательно, счётчик будет регистрировать частицы, находящиеся в равномерно освещенной зоне лазерного луча.

В разработанном счётчике использован лазер мощностью около 10 мВт, создающий плоский луч толщиной  $\sim 100$  мкм и шириной 500 мкм. Фотодиоды установлены на расстоянии 2 мм от



**Рис. 5.** Общий вид опытного образца счётчика ИЗ-124



**Рис.6.** Пример распределения частиц по размерам аэрозоля хлористого аммония, замеренного счётчиком

песка, оливкового масла, глицерина, латекса [для калибровки], пшеничной муки, сахара, цемента, неизвестного вещества).

В варианте состыковки счётчика с компьютером управление прибором передаётся этому компьютеру, программа для которого легко осваивается пользователем и представляется на экране в удобной информативной форме (см. Рис. 6).



**Рис. 7.** Сопоставление результатов шести измерений массовой концентрации аэрозоля, проведенных в камере весовым методом (1) и счётчиком частиц ИЗ-124 (2)

Проверка работы счётчика по измерению массовой концентрации проводилась на экспериментальном стенде, состоящем из аэрозольной камеры объёмом около 400 л. Она заполнялась аэрозолем, получаемым методом возгонки канифоли (плотность его  $2.65 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Массовая концентрация аэрозоля определялась как по стандартной методике весовым методом (при помощи взвешивания аналитических фильтров до и после опыта), так и оперативно счётчиком ИЗ-124. На рис. 7 показаны сравнительные данные из шести опытов (имеющих обозначения на

оси абсцисс T1, T2, ...T5, T6).

Проведенные опыты показали хорошее совпадение (в рамках погрешности измерений) данных измерений «точным» весовым методом и оптическим счётчиком. А также что, во-первых, разработанный счётчик частиц аэрозолей характеризуется довольно высокой чувствительностью и способен выделять из измеряемых аэрозолей отдельные фракции частиц; во-вторых, встроенный в него микроконтроллер позволяет суммировать данные по отдельным фракциям частиц и получать значения массовой концентрации аэрозоля.

Цифровые методы обработки данных с помощью сетей связи дают возможность вести в режиме реального времени управление приборами и осуществлять мониторинг экологической обстановки. Современная элементная база в виде лазерных диодов, высокочувствительных фотоприёмников и микроконтроллеров даёт возможность создать малые по габаритам приборы с автономным питанием. Их довольно просто устанавливать в самых разных точках, и тем самым организовать динамический мониторинг загрязнения воздуха взвешенными частицами, как на отдельных предприятиях, так и в регионах.

Применительно к описанному выше фотоэлектрическому счётчику частиц марки ИЗ-124 разработана программа создания сети для мониторинга запылённости воздушного бассейна, фрагмент которой [5] выставлен на сайте «Enterprise Europe network» – глобального международного объединения, в которое входят предприятия 70-ти стран мира [6].

### Литература:

1. Украинская система мониторинга качества воздуха не соответствует требованиям ЕС. 29.03.2019. // <http://zoryanyu.tv/articles/society/ukrainska-sistema-monitoringu-yakosti-povitrya-ne-vidpovida-vimogam-s/>
2. Киев нуждается в мониторинге качества атмосферного воздуха. <http://rff.ch/ru/media/2518>
3. *Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В., Щелчков Г. И.* Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. – М.: Энергоздат, 1981. – 232с.
4. Компьютерная программа Mie Plot для расчета рассеяния света от сферы с использованием теории Ми // <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm>
5. Enterprise Europe network. Technology Offer – Profile [https://docs.google.com/document/d/1Yp7GBKpk2yIhaWsFp7lZgw-aX4prQKKQywG\\_SlPhu7U/edit?ts=5cc0bcf2](https://docs.google.com/document/d/1Yp7GBKpk2yIhaWsFp7lZgw-aX4prQKKQywG_SlPhu7U/edit?ts=5cc0bcf2)
6. EEN Ukraine // <http://www.iop.kiev.ua/~een/>

***Kontush S. M., Shyngarov G. L., Chernysh B. B., Mashnenko K. V.***

### **On-line optical measurements of the mass concentration of aerosols in ecology**

#### SUMMARY

*The article provides a brief retrospective of methods for determining the dust content of atmospheric air and their modern implementation in optical particle counters. It is shown that the operational control of the mass concentration of the dispersed component of the atmosphere is now highly relevant. Unlike the classic, the most accurate "weight method", the use of photoelectric particle counters allows you to measure the mass concentration of aerosol pollution by fractions of the dust component. Such measurements are much more informative in ecology, since they take into account the specifics of the harmful effects of anthropogenic aerosol on humans and animals.*

*The features of the optical method of detecting and analyzing particles by modern aerosol counters that have laser light sources in the registration circuits are considered. The heterogeneity of the luminous flux, which is natural for lasers and leads to considerable measurement errors, forces developers to look for ways to take into account or neutralize this effect not with expensive optical elements, but with the help of microprocessors. This article describes an original method for registering particles in an aerosol counter using two photo-detectors. The laser light reflected from the particles under study is converted by these photo-sensors into electrical pulses, which are analyzed by a signal matching circuit using a specific algorithm.*

*The prototype of the portable device made by the authors of the article, which implements this method, was compared with the classical "weight method" to determine the mass concentration of particles in a special aerosol chamber. Within the framework of measurement errors, a good agreement between the obtained data is shown. This meter, which is the first domestic analyzer of air dispersed composition, allows you to transmit the received information in a digital form via wireless networks to monitor the environmental situation in various regions. In relation to this photoelectric device, a program has been developed for creating a network for monitoring the dust content of an air basin, a fragment of which is displayed on the website of the global international association Enterprise Europe network, which includes enterprises in seventy countries of the world.*

**Key words:** *optical particle counters, aerosols, atmosphere monitoring*

**Контуш С. М., Шингарьов Г. Л., Черниш Б. Б., Машиненко К. В.**  
**On-line оптичні вимірювання масової концентрації аерозолів в екології**

АНОТАЦІЯ

*У статті наведено коротку ретроспективу методів визначення запиленості атмосферного повітря та їх сучасного втілення в оптичних лічильниках частинок. Показано актуальність оперативного контролю масової концентрації дисперсної складової атмосфери. На відміну від класичного, найбільш точного «вагового методу», застосування фотоелектричних лічильників частинок дозволяє вимірювати масову концентрацію аерозольного забруднення по фракціям пилової компоненти. Такі вимірювання значно інформативніше в екології, оскільки вони враховують специфіку шкідливого впливу антропогенного аерозолю на людину і тварин.*

*Розглянуто особливості оптичного методу реєстрації та аналізу частинок сучасними аерозольними лічильниками, що мають у схемах реєстрації лазерні джерела світла. Природна для лазерів неоднорідність світлового потоку, що призводить до малих похибок вимірювань, змушує розробників шукати способи врахування, або нейтралізації цього ефекту не дорогими оптичними елементами, а за допомогою мікропроцесорів. У даній статті описано оригінальний спосіб реєстрації частинок в аерозольному лічильнику, в якому використовуються два фотоприймачи. Відбитий від досліджуваних частинок лазерне світло, перетворюється цими фотодатчиками в електричні імпульси, які аналізуються схемою порівняння сигналів за певним алгоритмом.*

*Виготовлений авторами статті дослідний зразок портативного приладу, що реалізує даний спосіб, пройшов порівняльний аналіз з класичним «ваговим методом» за визначення масової концентрації частинок у спеціальній аерозольній камері. Показано гарну відповідність між отриманими даними у рамках похибок вимірювань. Цей лічильник, який є першим вітчизняним аналізатором дисперсної складової повітря, дозволяє передавати через бездротові мережі отриману інформацію у цифровому вигляді для моніторингу екологічної обстановки у різних регіонах. Для цього фотоелектричного приладу розроблено програму створення мережі для моніторингу запиленості повітряного басейну. Фрагмент цієї програми виставлено на сайті глобального міжнародного об'єднання «Enterprise Europe network», до якого входять підприємства сімдесяти країн світу.*

**Ключові слова:** оптичні лічильники частинок, аерозолі, моніторинг атмосфери