

УДК 614.715

**С.М. Контуш<sup>2</sup>, С.А. Щекатолина<sup>1</sup>, С.М. Дыханов<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082<sup>2</sup> Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова, ул. Дворянская, 2/4, Одесса**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО СЧЕТЧИКА ЧАСТИЦ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСТОТЫ ВОЗДУХА**

*В работе изучены возможности лазерного счетчика фирмы ООО Новатек-Электро в условиях быстрого мониторинга (7 сек. на измерение загрязнения воздуха фракцией РМ 2.5). Показана также возможность определения этим счетчиком весовой концентрации аэрозоля и проведена градуировка для разных пылей с коэффициентами преломления от 1.17 путем сравнения с показаниями фильтра АФА ВП для этих же пылей. Найдено, что пересчетный коэффициент 1.65 дает возможность определить весовую концентрацию пыли в воздухе лазерным счетчиком с погрешностью меньшей 20%.*

**Ключевые слова:** лазерный счетчик, размеры частиц аэрозоля, счетная концентрация, весовая концентрация.

**С.М. Контуш<sup>2</sup>, С.А. Щекатолина<sup>1</sup>, С.М. Дыханов<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Одесская національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082<sup>2</sup> Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, вул. Дворянська, 2/4, Одеса**ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЛІЧИЛЬНИКА ЧАСТОК ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧИСТОТИ ПОВІТРЯ**

*У роботі вивчені можливості лазерного лічильника фірми ТОВ Новатек-Електро в умовах швидкого моніторингу (7 сек. на вимір забруднення повітря фракцією РМ 2.5). Показано також можливість визначення цим лічильником вагової концентрації аерозолю і проведено градування для різних пилів з коефіцієнтами заломлення від 1.17 шляхом порівняння з показаннями фільтра АФА ВП для цих же пилів. Знайдено, що перерахунковий коефіцієнт 1.65 дає можливість визначити вагову концентрацію пилу в повітрі лазерним лічильником з похибкою меншою за 20%.*

**Ключові слова:** лазерний лічильник, розміри часток аерозолю, рахункова концентрація, вагова концентрація.

**S.M. Kontush<sup>2</sup>, S.A. Shchekatolina<sup>1</sup>, S.M. Dykhanov<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Odessa National Academy of Food Technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082<sup>2</sup> Odessa national university named after I.I.Mechnikova, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa**APPLICATION OF PARTICLE LASER COUNTER FOR AIR PURITY MEASURING**

*The capabilities of Novatek-Electro LTD laser counter under the conditions of expeditious monitoring (7 secs. for measuring of air contamination with aerosol fraction PM 2.5) have been studied in the paper. Possibility of determination of aerosol mass concentration using this counter is also shown and calibrating for different dusts with the coefficients of refraction from 1.17 by comparing to the testimonies of AFA VP filter for the same dusts is carried out. It is found that 1.65 calibration coefficient enables to define the mass concentration of dust in the air by a laser counter with the error of less than 20%.*

**Keywords:** laser counter, sizes of aerosol particles, number concentration, mass concentration.

**І. ВВЕДЕНИЕ**

Наличие в окружающем нас воздухе аэрозолей отрицательно влияет на здоровье человека. Особенно чувствительны к чистоте воздуха дети, поскольку они чаще, чем взрослые, дышат, и на каждый килограмм своего веса вдыхают на 50% больше воздуха. Специалисты департамента здоровья штата Массачусетс (США) считают, что половина всех болезней связана с загрязнением

воздуха в помещениях, в которых мы живем. По данным Всемирной организации здравоохранения, примерно в 30% вновь построенных зданий качество воздуха неудовлетворительное.

Индустриальное воздействие на природную среду настолько серьезно, что требует постоянного контроля экологических условий для своевременного принятия мер по сохранению в допустимых пределах чистоты атмосферы. Для промышленного пылевого контроля характерны широкий

диапазон измеряемых концентраций (от нескольких мг до нескольких граммов на кубический метр); широкий спектр частиц пыли (от 0,05 до 100 мкм); высокие скорости (до 40 м / с) и температуры (до 1200 С °) контролируемых пылегазовых потоков. Концентрация пыли непрерывно изменяется как во времени, так и в пространстве в достаточно широких пределах в зависимости от устойчивости работы пылеочистного оборудования.

Для оценки степени загрязнения воздуха аэрозольными частицами используются два подхода: в первом измеряется масса всех частиц в единице объема воздуха, во втором случае - число частиц в единице объема среды. Первый подход реализуется методами, основанными на предварительном осаждении частиц пыли с последующим исследованием осадка. Это весовой, радиоизотопный и др. методы. Во втором подходе не требуется осаждать пыль, измерения проводятся непосредственно в аэрозольном облаке в полевых условиях. При непрерывном промышленном контроле наиболее приемлемыми являются методы второй группы. Они дают непрерывную информацию о мгновенных значениях концентрации пыли и закономерности ее изменения.

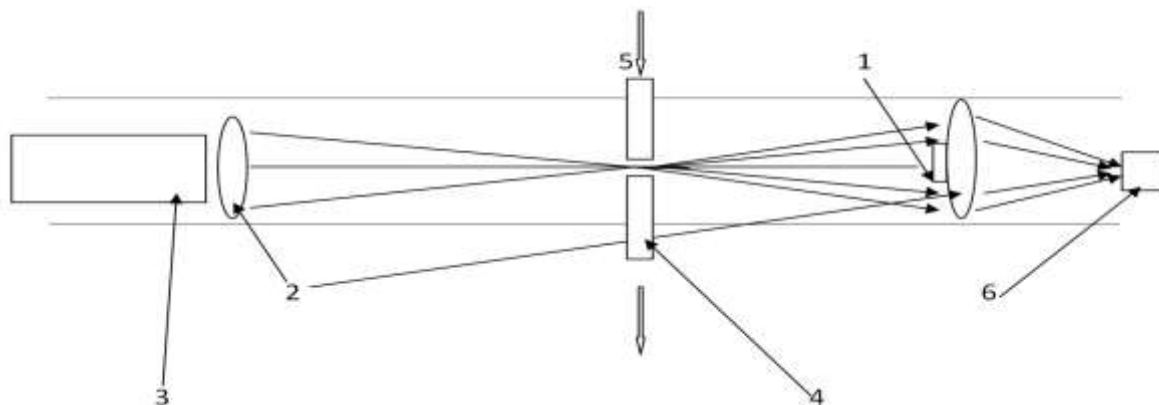
В Украине чистота воздуха по существующим ГОСТАМ / !!!/ определяется весовой концентрацией аэрозольных частиц, загрязняющих воздух, и основным методом определения этой концентрации является использование фильтров. Это крайне затрудняет или делает невозможным определение вклада частиц разных размеров в физико-

химические и биологические свойства аэрозолей. Поэтому представляется целесообразным использование уже существующих электроннооптических счетчиков частиц для одновременного определения, наряду с функцией распределения частиц по размерам, также и весовой концентрации аэрозоля.

В настоящей работе поставлены задачи выяснения возможности использования такого счетчика для определения весовой концентрации частиц. С этой целью были проведены измерения весовой концентрации пыли в цехах Припортового завода двумя способами: общепринятым с помощью фильтра и новым с использованием изготовленного счетчика. Путем сравнения результатов измерений определен калибровочный коэффициент счетчика для расчета весовой концентрации аэрозолей разной природы.

## II. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АНАЛОГОВОГО ЛАЗЕРНОГО СЧЕТЧИКА ЧАСТИЦ

Впервые на Украине фирмой Новатек-Электро при нашем участии [2] был разработан аналоговый лазерный счетчик для измерения счетной концентрации частиц. Счетчик собран для диапазона измерений аэрозоля 0.3 мкм. - 3мкм. Он состоит из следующих элементов: лазерный диод, собирающая оптика с оптической ловушкой, фотодиод и усилитель. Схема счетчика с рассеянием света под малыми углами приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Принципиальная схема лазерного счетчика

1 – ловушка, 2 – линзы, 3 – лазер, 4 – всасывающая трубка, 5 – вход аэрозоля, 6 – фотодиод с усилителем сигнала.

В счетчике тонкий луч лазера освещает поток частиц и полностью улавливается оптической ловушкой; свет, рассеянный частицами в разных направлениях, частично попадает в линзу, установленную на оси прибора за оптической ловушкой, и далее фокусируется на фотоприемнике, роль которого выполняет фотодиод. Как видно из ри-

сунка, прямой свет от лазера на фотодиод не попадает. Можно считать, что рассеянный частицами свет собирается в телесном угле от  $10^0$  до  $30^0$  (вычитая поток света, направленный в ловушку). В таких счетчиках в качестве оптического элемента, собирающего рассеянный частицами свет, можно использовать достаточно простую линзу подводя-

шого диаметра и фокусного расстояния. С учетом сказанного сконструирован достаточно простой прибор для измерения загрязнения воздуха частицами аэрозоля, размер которых находится в пределах примерно от 0,3-0,4 мкм до 3 мкм. Разработан малоугловой счетчик частиц, схема которого приведена на рис.1. Так как в этом случае невозможно определить размер частиц по амплитудам импульсов внутри диапазона размеров частиц 1 – 2 мкм, то измерение полного количества частиц в воздухе с помощью такого счетчика примерно соответствует упомянутому выше стандарту РМ 2.5.

Основные элементы счетчика – лазерный диод, собирающая линза, на которой укреплен оптический ловушка, и фотодиод с усилителем – собраны в цилиндрическом корпусе. Поток воздуха с частицами проходит через счетчик по трубке с вырезами для лазерного луча. Общая длина счетчика – около 15 см. Описанный счетчик установлен в корпусе, в котором также находятся малогабаритный насос для прокачки воздуха через счетчик, электронный блок обработки импульсов от счетчика и управляющий микроконтроллер, аккумулятор питания системы, а на передней панели – кнопки управления и табло из 3-х символов. На нем с помощью микроконтроллера могут быть отражены результаты измерений.

Проверка работы счетчика проведена в двух направлениях. Во-первых, определялась его чувствительность с помощью монодисперсных частиц латекса. С этой целью в вертикальной трубе высотой около 50 см распылялась суспензия латекса в чистой воде, и затем проба образующегося аэрозо-

ля из нижней части трубы после испарения воды всасывалась в счетчик частиц. Предварительная проверка работы электронного блока показала, что уровень шума на его выходе равен примерно 10 мВ. Следовательно, могут быть зарегистрированы сигналы порядка 50 мВ. Для оценки реальной чувствительности счетчика в упомянутую вертикальную трубу распылялась суспензия частиц латекса диаметром 1 мкм и измерялся уровень сигналов на выходе из электронного блока. Из-за явления искажения сигналов при пересечении частицами лазерного луча в разных точках сигналы имели разную амплитуду при максимальном значении амплитуды, равном примерно 5 В. Следовательно, динамический диапазон счетчика по величинам регистрируемых сигналов достигал значения порядка 1000 (от 5 мВ до 5 В). Как известно, интенсивность рассеянного частицами света в зависимости от их размеров в области размеров частиц меньше 1 мкм уменьшается как  $d^3$ , переходя к  $d^6$ . Можно найти, что в описываемом случае размер минимально регистрируемых частиц составит 0,3 – 0,4 мкм. С другой стороны, верхний предел регистрируемых частиц теоретически не ограничен, так как даже крупные частицы будут зарегистрированы электронным усилителем, хотя и с ограничением их амплитуды. Однако, как уже упоминалось, число крупных частиц по сравнению с мелкой фракцией относительно мало, и поэтому общее число подсчитанных частиц будет хорошо отражать степень загрязнения воздуха

В таблице 1 приведены основные эксплуатационные характеристики счетчика.

**Таблица 1** – Эксплуатационные характеристики счетчика

Аэрозольная трубка (сопло)	5мм.	Формирование газового потока 0.33л/мин.
Лазер красный полупроводниковый	Длина волны 650нм. Выходная мощность 5мВт при счетном объеме 0,2-0,1мм <sup>3</sup> .	Лазер для неполяризованного рассеяния
Газовый поток	2л/мин.	2.5мл. в рабочем окне оптической мощности.
Фокусатор	Диаметр 20мм, плексиглас.	Собирает рассеянный свет и направляет на светодиод
Линза	Стекло 5мм.С фокусным расстоянием 6 мм. Собирающая в точку 0.1-0.2мм.	Собирает свет от лазерного диода в пятно на расстоянии 4 см.
Фотодиод	Фотодиод 3х3мм <sup>2</sup> .	Превращает излучение в электрический сигнал.
Преобразователь ток-напряжение	Преобразователь «Новатек -электро».	Получение импульсов напряжения
Вентилятор –насос	Вентилятор –улитка типа: FD5215B СД12мВт.	Создание потока воздуха с расходом 2 л/мин..
Плата обработки данных.	ПП -2	Разделяет импульсы на три группы в соответствии с размерами частиц

Вторая регистрируемая счетчиком величина – счетная концентрация частиц (их число в единице объема, например, в 1 л). Она может изменяться в широких пределах, но воздух можно считать достаточно чистым, если ее значение лежит в пределах  $10^3 - 10^4$  частиц/л. Для разработанного счетчика частиц расчет концентрации может быть проведен следующим образом. Для этого необходимо сравнить площади сечения  $S$  трубки для подачи аэрозоля с площадью плоского луча лазера  $s$ , через которую проходят все частицы, регистрируемые счетчиком. Зная отношение этих площадей и объемную скорость потока, легко рассчитать концентрацию частиц. В описываемом счетчике  $s/S$  равно примерно 250, а скорость прокачки воздуха через счетчик  $W = 2$  л/мин = 0,033 л/с. Концентрацию частиц  $N$  тогда определим по следующей формуле:

$$N = \frac{S}{s} \cdot \frac{n}{tW} = An,$$

где  $A = 4,205 \cdot 10^6$  для нашего счетчика.

### III РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились в цехах ОПЗ одновременно фильтром АФА ВП и лазерным счетчиком. Полученные счетчиком функции распределения по размерам частиц нижеперечисленных пылей использовались для последующего расчета диаметров и масс этих частиц.

Для апробации счетчика применительно к определению весовой концентрации аэрозоля были проведены измерения счетной концентрации следующих пылей: известковой, силикатной, древесных (дуба и сосны), сульфата натрия и карбамидной пыли. Измерения проводились в цехах ОПЗ одновременно фильтром АФА ВП и лазерным счетчиком. Полученные счетчиком функции распределения по размерам частиц этих пылей использовались для последующего расчета диаметров и масс этих частиц в предположении, что все частицы сферические. Усредненные результаты по четырем измерениям для счетной концентрации каждой пыли приведены в таблице 2.

В третьей колонке таблицы приведены экспериментальные данные по счетной концентрации частиц аэрозоля, пересчитанные путем сложения концентраций пыли каждого размера с последующим умножением на пересчетный коэффициент  $A$ :

$$n = n_1 + n_2 + n_3,$$

$$N = 4,205 \cdot 10^6 \cdot n$$

Расчет весовой концентрации пыли на основании измерений счетчика

Весовая концентрация пыли определена следующим образом. Счетчик измеряет число частиц

в рабочей камере, размеры которой определяются пересечением лазерного луча с потоком воздуха, несущего частицы по одной через объем камеры. Расчеты счетной концентрации приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Результаты измерений счетной концентрации пылей в рабочем объеме счетчика по результатам четырех измерений

Вещество	n, частиц/рабочий объем	$N, 10^9$ частиц/м <sup>3</sup>
Карбамид		
1-ое измерение	239	1005
2-ое измерение	170	715
3-е измерение	230	967
4-ое измерение	152	639
Известковая пыль		
1-ое измерение	133	559
2-ое измерение	69	290
3-е измерение	67	282
4-ое измерение	43	181
Сульфат натрия		
1-ое измерение	122	513
2-ое измерение	160	668
3-е измерение	159	668
4-ое измерение	85	357
Силикатная пыль		
1-ое измерение	148	622
2-ое измерение	153	643
3-е измерение	234	984
4-ое измерение	160	673
Сосна		
1-ое измерение	101	425
2-ое измерение	156	656
3-е измерение	113	475
4-ое измерение	57	239
Дуб		
1-ое измерение	136	572
2-ое измерение	96	403
3-е измерение	66	277
4-ое измерение	48	202

Чтобы получить массовую концентрацию аэрозоля  $C$  в мг/м<sup>3</sup>, необходимо рассчитать средние массы частиц каждой фракции пыли  $m_i$  и умножить их на счетную концентрацию частиц для каждой фракции  $N_i$ . Тогда суммы  $m_i \cdot N_i$  для трех измерений в каждой фракции дают массовую концентрацию частиц аэрозоля:

$$C = N_1 m_1 + N_2 m_2 + N_3 m_3.$$

Средние диаметры частиц для 3-х фракций используемого счетчика составляют:

Для фракций	0,3-1 мкм	$d_1 = 0,65$ мкм;
	1-2 мкм	$d_2 = 1,5$ мкм;
	2-3 мкм	$d_3 = 2,5$ мкм.

Расчет масс частиц аэрозоля. Масса частицы аэрозоля диаметром  $d$ , имеющей плотность  $\rho$ , равна:

$$m_i = \pi d^3 / 6 \cdot \rho_i.$$

Счетчик был проградуирован в области размеров частиц аэрозоля от 0,5 мкм до 2 мкм с по-

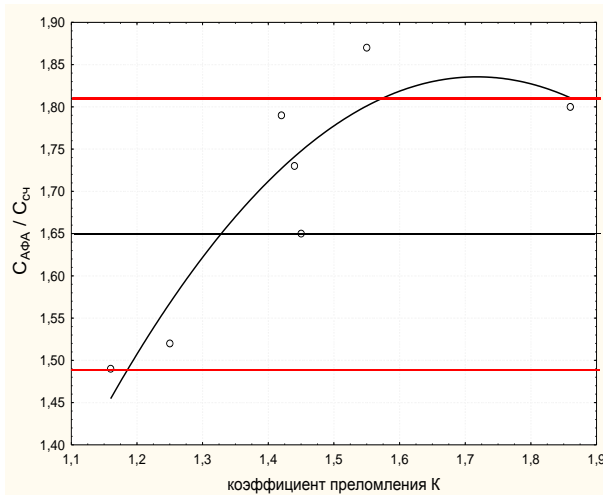
мощью частиц латекса трех стандартных размеров. Для более крупных размеров частиц градуировка производилась с помощью генератора монодисперсных капель, работающего на глицерине. Погрешность определения размеров частиц составляет ~20%, что типично для лазерных счетчиков частиц [1, 3-4].

**Таблица 3** – Значение плотности и коэффициентов преломления измеренных аэрозолей.

Вещество	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент преломления
Пыль карбамида	1300-1400	1.4398565
Известковая пыль	1300-1400	1.4254858
Пыль сульфата натрия	2680	1.5497262
Силикатная пыль	1100	1.8646056
Пыль сосны	475	1.1567745
Пыль дуба	750	1.2497311

**Таблица 4** – Сравнение результатов измерений весовой концентрации с помощью фильтра АФА ВП и лазерного счетчика.

Пыль	$C$ , мг/м <sup>3</sup> (измерения фильтром АФА ВП)	$C$ , мг/м <sup>3</sup> (измерение лаз.сч.)	$C_{\text{АФА ВП}} \div C_{\text{сч.}}$
Карбамид	0,899	0,461	7,03
	2,86	0,318	8,99
	0,18	0,033	5,45
	0,068	0,029	2,34
Известковая пыль	0,970	0,268	3,62
	0,531	0,110	4,82
	0,114	0,098	1,16
	0,94	0,043	21,86
Сульфат натрия	0,710	0,370	1,92
	1,02	0,655	1,55
	0,877	0,665	1,339
	0,992	0,224	4,428
Силикатная пыль	2,42	0,212	11,41
	0,752	0,219	3,43
	1,124	0,572	1,96
	0,644	0,219	2,94
Сосна	0,241	0,058	4,15
	0,978	0,103	9,49
	0,766	0,069	11,10
	1,2	0,121	9,92
Дуб	0,962	0,119	8,08
	0,412	0,084	0,85
	0,980	0,080	12,25
	0,644	0,063	10,22



**Рисунок 2** – Градуировочная кривая для определения весовой концентрации лазерным счетчиком.

Пересчет в весовую концентрацию производился путем определения массы частиц для измеренной частичной функции распределения. Одновременно производились измерения массовой концентрации тех же пылей с помощью фильтра АФА ВП.

В качестве градуировочной константы принималось отношение весовой концентрации, определяемой с помощью фильтра  $C_{АФА}$ , к весовой концентрации, пересчитанной из показаний счетчика  $C_{СЦ}$ . Градуировочная кривая в области изменения коэффициента преломления для изученных аэрозолей ( $K=1,17-1,84$ ) приведена на рисунке 2. При этом калибровочный коэффициент менялся от 1.48 до 1.81. Рекомендуемое среднее значение калибровочного коэффициента в указанной области изменения коэффициентов преломления составляет 1,65, что находится в рамках погрешности измерений. Таким образом, в работе показано, что изученный лазерный счетчик может использоваться как для измерения счетной концентрации частиц и функции распределения частиц по размерам, так и

для определения весовой концентрации, что удовлетворяет ГОСТам Украины при определении чистоты воздуха.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И.. *Опτικο-електронные методы изучения аэрозолей*. - М.: Энергоиздат, 1981, 232 с.
2. Контуш С.М., Калугин В.В., Гимп А.В., Машненко К.П.,Щекатолина С.А.Цифровойкии и экологи лазерный счетчик частиц для измерения аэрозольного загрязнения воздуха // Тезисы 15 международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергетики и экологии», - Одесса: 2013.
3. Laven Ph. Simulation of Rainbows, Coronas and Glories by use Mie Theory. *Applied Optics*, 2003, v.42, № 3, pp.435-444.
4. Woo K.S., Romey F.J., Dick W.D., Liu Y.H. Measurement of Atmospheric Aerosols using the Wide-Range Particle Spectrometer (WPS<sup>TM</sup>).

## REFERENCES

1. Belyaev S.P., Nikiforova N.K., Smirnov V.V., Schelchikov G.I.. *Optiko-elektronnie metody izucheniya aerorozolei*. – М.: Energoizdat, 1981, 232 s.
2. Kontush S.M., Kalugin V.V., Gimp A.V., Mashnenko K.P., Schekatolina S.A. Tsifrovoyi ekologicheskii lazerniy schetchik chastits dlya izmereniya aerozolnogo zagryazneniya vozdukha // Tezisi 15 mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii «Aktualnie problem energetiki I ekologii», - Odessa: 2013.
3. Laven Ph. Simulation of Rainbows, Coronas and Glories by use Mie Theory. *Applied Optics*, 2003, v.42, № 3, pp.435-444.
4. Woo K.S., Romey F.J., Dick W.D., Liu Y.H. Measurement of Atmospheric Aerosols using the Wide-Range Particle Spectrometer (WPS<sup>TM</sup>).

Получена в редакции 04.09.2013, принята к печати 03.12.2013