

**В.И. Колобов, А.Н. Левченко, А.А. Телеганов, А.А. Тихомиров,
И.Я. Шапиро, А.П. Черепанов, Ю.Ф. Яцкев**

ЛАЗЕРНЫЙ ДЕНСИТОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

Приводятся описание конструкции, принципа работы, технические характеристики и результаты метрологической аттестации лазерного измерителя массовой концентрации пыли на основе фотометрического метода с использованием многоходовой кюветы. Диапазон измерения массовой концентрации от 3 до 18 мг/м при 25% основной относительной погрешности.

Потребность в оперативном измерении концентрации аэрозольных выбросов и запыленности атмосферного воздуха в последние годы неуклонно растет. Это обусловлено рядом причин: бурным развитием аэрозольных технологий (распылительная сушка, аэрозольные покрытия, порошковая металлургия, распыление ядохимикатов и удобрений, аэрозольтерапия); созданием систем контроля и управления технологическими процессами, в которых сырье или конечный продукт представляют собой пылеобразное вещество; изучением процессов переноса и трансформации аэрозолей природного и антропогенного происхождения (туманы, облака, пыль); необходимостью контроля чистоты воздуха в целях охраны окружающей среды (запыленность в производственных цехах, проверка качества и надежности промышленной очистки воздуха, оптимизация производств в фармацевтике, оптике, микроэлектронике), защитой среды обитания человека (предотвращение аллергии, астмы, контроль чистоты воздуха в больницах и т.п.).

Вследствие того, что пылегазовая среда представляет собой сложную неустойчивую аэродинамическую систему, которую нельзя описать в достаточной мере одним или двумя параметрами, измерение концентрации аэрозолей и пыли является достаточно трудной метрологической задачей. Для пыли, являющейся полидисперсной средой с широким диапазоном концентраций, с различной формой и физико-химическими свойствами частиц, неразрешимой является задача создания универсального метода измерения концентрации пыли [1, 2].

Существующие методы измерения концентрации аэрозолей и пыли, основанные на предварительном осаждении пыли или без ее осаждения, можно использовать для измерений с высокой точностью лишь в небольшом интервале концентраций [2]. Приборы, основанные на предварительном осаждении пыли, хотя и измеряют непосредственно массовую концентрацию, но имеют низкую чувствительность. Процесс измерения с их помощью – циклический и трудоемкий.

С развитием автоматизированных систем контроля загрязнения атмосферного воздуха и созданием систем управления технологическими процессами появилась потребность в приборах, способных работать в этих системах. Этим требованиям в большей степени соответствуют приборы, основанные на методах без предварительного осаждения пыли, позволяющие проводить непрерывные измерения в автоматическом режиме [1, 2, 4].

В последнее время широкое применение находят измерители аэрозолей, основанные на использовании эффектов ослабления лазерного излучения [3]. В рассматриваемом лазерном денситометре используется явление рассеяния лазерного излучения на аэрозолях в локальном объеме воздуха и, благодаря сочетанию хорошо проверенной двухлучевой схемы измерений и многоходовой кюветы [5], обеспечивается более широкий интервал измеряемых концентраций непосредственно в самой исследуемой пылевоздушной среде.

Ослабление интенсивности коллимированного оптического пучка в приближении однолучевого рассеяния, описываемое законом Бугера [3], определяется из соотношения

$$J = J_0 \exp[-N \pi a^2 k(z, z_0) L], \quad (1)$$

где J_0 , J – интенсивности начального и прошедшего через слой атмосферного аэрозоля лазерного излучения; N – число частиц, находящихся в рассеивающем слое толщиной L ; a – радиус частиц; $k(z, z_0)$ – поправочный коэффициент, зависящий от условий измерений, находится расчетным путем и изменяется в пределах от 0 до 2.

Связь интенсивностей лазерного излучения, посылаемой и принимаемой после прохождения оптической толщи, с электрическими сигналами, снимаемыми с блока преобразования (логарифмического усилителя), можно записать как

$$\ln(J/J_0) = (U_{\text{вых}} - U_{\text{кал}}) \gamma, \quad (2)$$

где $U_{\text{вых}}$ – значение сигнала, регистрируемое при проведении измерений; $U_{\text{кал}}$ – значение сигнала, получаемое при предварительной калибровке прибора, когда в кювете отсутствуют аэрозоли; γ – поправочный коэффициент, имеющий размерность $[1/V]$.

Из (1) и (2) получим уравнение для определения количества частиц, находящихся в пространстве, ограниченном лазерным пучком

$$N = \frac{(U_{\text{вых}} - U_{\text{кал}}) \gamma}{\pi a^2 L k(z, z_0)}. \quad (3)$$

Окончательное выражение для массовой концентрации сферических частиц, имеющих радиус a и плотность ρ , примет следующий вид:

$$M = \frac{4}{3} a \rho \frac{(U_{\text{вых}} - U_{\text{кал}}) \gamma}{L k(z, z_0)}. \quad (4)$$

Полученная формула является исходной для лазерного денситометра при определении массовой концентрации аэрозоля (пыли).

Функциональная схема денситометра приведена на рис. 1. Конструктивно прибор состоит из трех частей: фотометрического блока 1, блока преобразования 2 и микропроцессора 3. Фотометрический блок разделен на две части – оптико-механический узел и многоходовую кювету 11. В оптико-механическом узле излучение He – Ne-лазера 4 разделяется полупрозрачным зеркалом 5 на основной и опорный пучки. Основной пучок после модуляции на обтюраторе 7 через входное окно поступает в многоходовую кювету, в которой, используя перестройку блока зеркал 13, можно обеспечить до 200 проходов, что соответствует набору длины траектории в 100 м при длине кюветы 0,5 м.

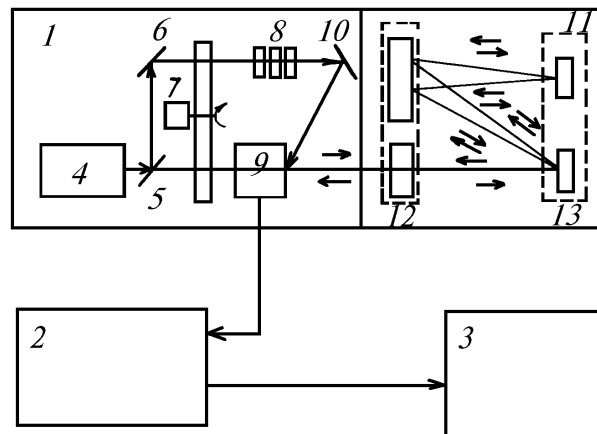


Рис. 1. Функциональная схема денситометра

После прохождения в кювете лазерный пучок возвращается в оптико-механический узел и направляется на фотоприемник 9. Для расширения динамического диапазона измерений подбором числа нейтральных светофильтров 8 производится выравнивание интенсивностей опорного пучка и основного, прошедшего из кюветы. Поворотные зеркала 6, 10 используются для сокращения габаритных размеров прибора. Сферические зеркала, установленные в блоках

12 и 13, осуществляют подфокусировку лазерного пучка при каждом проходе в кювете, благодаря чему диаметр пучка на выходе из кюветы мало отличается от диаметра на входе. Коммутирование и поочередное модулирование лазерного излучения в опорном и основном каналах производятся электромеханическим обтюратором 7.

Форма сигнала, снимаемого с фотоприемника, изображена на рис. 2 и представляет собой последовательность однополярных импульсов фиксированной частоты с прямоугольной огибающей. Сигнал такой формы позволяет применить усилитель переменного тока, который по сравнению с усилителем постоянного тока обладает более высокой стабильностью и возможностью выделения сигнала на уровне шумов.

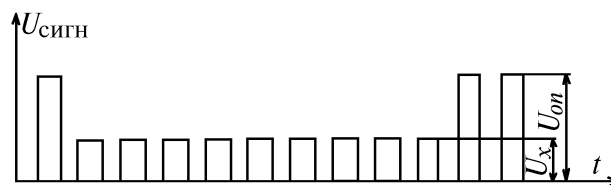


Рис. 2. Форма сигнала, снимаемого с фотоприемника

Определение значения логарифма отношения сигналов основного и опорного каналов в соответствии с соотношением (2) производится в блоке преобразования [6]. Текущее значение этого логарифма отображается на встроенном цифровом индикаторе, а также поступает в процессорный блок. Для контроля работоспособности и проверки достоверности преобразования сигналов в блоке преобразования имеется встроенный калибратор.

Поступающий с блока преобразования на процессор сигнал является исходным для вычисления массовой концентрации аэрозоля по формуле (4), заложенной в процессорный блок. Кроме текущего значения (2) с клавиатуры в процессорный блок необходимо ввести значения плотности и размера частиц, характерных для региона пользования, число проходов оптического излучения в кювете, а также значение $U_{\text{кал}}$. Эта величина определяется при начальной калибровке прибора после прокачки через закрытую кювету очищенного фильтром АФА воздуха. Определение $U_{\text{кал}}$ позволяет повысить точность измерения концентрации аэрозоля.

Результаты вычислений, полученные в процессоре, автоматически высвечиваются через каждые 10 с на встроенных цифровых индикаторах, расположенных на передней панели блока. Возможен режим усреднения по 60 значениям через каждые 10 мин. Кроме того, данные по каждому измерению могут передаваться по запросам внешней ЭВМ для дальнейшей обработки и документирования.

Опытный образец разработанного и изготовленного в КТИ <Оптика> лазерного денситометра прошел государственную метрологическую аттестацию в НПО <ВНИИМ им. Д.И. Менделеева>. Аттестация проводилась в галокамерах с использованием в качестве эталонных средств приборов, основанных на весовом и электро-индукционном методах. В результате аттестации была определена передаточная функция лазерного денситометра (рис. 3). Эмпирический коэффициент корреляции между показаниями прибора, основанного на грамметрическом методе, и лазерного денситометра оказался равным 0,993, а коэффициент корреляции между показаниями электроиндукционного прибора и денситометра близок к 0,985.

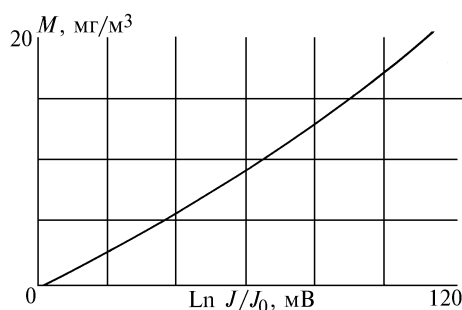


Рис. 3. Передаточная функция денситометра

По результатам метрологической аттестации лазерный денситометр допущен к опытной эксплуатации со следующими характеристиками. Параметры анализируемой пыли: средний радиус $(1,2 \pm 0,1)$ мкм, плотность $2,16 \text{ г/см}^3$. При числе проходов в кювете, равном 64, диапазон измерения концентрации пыли соответствует $3 \dots 18 \text{ мг/м}^3$, при 25% основной относительной погрешности измерений.

Прибор питается от сети 220 В, 50 Гц и потребляет 310 Вт. Габаритные размеры блока преобразования и процессорного блока $270 \times 300 \times 200$ мм, масса 12 кг. Габаритные размеры фотометрического блока $820 \times 290 \times 100$ мм, масса 10 кг.

Дальнейшая доработка прибора в части механизма фиксированного переключения числа проходов в многоходовой кювете позволит дискретно изменять длину оптического пути в кювете и значительно расширит диапазон измеряемых значений массовой концентрации аэрозолей (пыли). Разработанная конструкция малогабаритной многоходовой кюветы может быть также использована в корреляционных радиометрах.

1. Беляев С.П., Никифорова М.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М.: Химия, 1978. 208 с.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометиздат, 1987. 254 с.
4. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнений природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 280 с.
5. Чернин С.М., Барская Е.Г. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №2. С. 1310 – 1318.
6. Яцкеев Ю.Ф. // ПТЭ. 1990. №3. С. 226 – 227.

КТИ <Оптика>,
Томск

Поступила в редакцию
15 июля 1994 г.

V.I. Kolobov, A.N. Levchenko, A.A. Teleganov, A.A. Tikhomirov, I.Ya. Shapiro, A.P. Cherepanov, Yu.F. Yatskeev. **Laser Densitometer for Measuring the Mass Concentration of Dust.**

The design description, the specification and the metrological certification results of the laser densitometer for measuring the mass concentration of dust are presented. The device operation is based on photometrical method and use of the multypass cell. Measuring range varies from 3 to 18 mg/m with 25% basic relative error.