

Б.И. Ворожцов, М.Г. Потапов, А.А. Павленко, В.П. Лушев, Ю.А. Галенко, Ю.В. Хрусталеv

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ АТМОСФЕРНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Проведено методическое обоснование и установлены границы применимости модифицированного метода спектральной прозрачности для определения среднего размера частиц аэрозолей. На основе специально разработанного трехволнового He-Ne-лазера и адаптивной системы регулирования и регистрации мощности излучения создан автоматизированный лазерный комплекс контроля параметров аэрозолей. Проведены измерения размеров частиц промышленных аэрозолей. Полученные данные используются для анализа и прогнозирования экологической обстановки прилегающих районов.

Исследование параметров аэрозольных атмосферных образований и локальных аэродисперсных систем антропогенного происхождения основано на измерении спектральных коэффициентов ослабления излучения на различных длинах волн. Для этих целей используются, как правило, многочастотные лазерные системы [1].

Оптические характеристики аэрозолей существенно зависят от их микрофизических параметров (концентрации, спектра размеров, формы и компонентов комплексного показателя преломления). Последние изменяются в весьма широких пределах от одного типа аэрозолей к другому и в пределах одного и того же типа. Все это осложняет проблему разработки методов диагностики аэрозолей.

При определении дисперсных параметров аэрозольных частиц в настоящей работе использовался модифицированный метод спектральной прозрачности (ММСП), заключающийся в измерении спектральных коэффициентов ослабления излучения на различных длинах волн λ . Этот метод не позволяет найти функцию распределения частиц по размерам $f(a)$, однако для измерения средних размеров частиц, в частности среднего объемно-поверхностного диаметра частиц a_{32} , он наиболее приемлем, т.к. обладает рядом преимуществ, а именно: прост для аппаратурной реализации и дает возможность диагностики аэрозольных сред большой оптической толщины τ .

Сущность ММСП заключается в решении обратной задачи для интегрального уравнения

$$\tau_{\lambda} = \frac{Nl}{4} \int_0^{\infty} \pi a^2 Q(a, \lambda, m) f(a) da,$$

где N – число частиц в единице объема; l – оптическая длина зондирования; a – диаметр частиц; Q – фактор эффективности ослабления излучения для одиночных частиц; m – комплексный показатель преломления частиц, и преобразовании его к виду

$$\tau_{\lambda} = 1,5 M l \bar{Q} / (a_{32} \rho),$$

где ρ – плотность материала частиц; $M = \frac{\pi N \rho}{6} \int_0^{\infty} a^3 f(a) da$ – массовая концентрация частиц;

$\bar{Q} = \int_0^{\infty} Q(a, \lambda, m) a^2 f(a) da / \left[\int_0^{\infty} a^2 f(a) da \right]$ – усредненный фактор эффективности ослабления из-

лучения; $a_{32} = \int_0^{\infty} a^3 f(a) da / \left[\int_0^{\infty} a^2 f(a) da \right]$ – средний объемно-поверхностный диаметр частиц.

Физическая модель метода основана на взаимодействии лазерного излучения с аэрозольной средой по механизму Ми рассеяния и сохранения инвариантности усредненного фактора эффективности ослабления относительно вида $f(a)$. Корректность этого предположения обусловлена тем, что \bar{Q} определяется интегралами от $f(a)$ и, следовательно, малочувствителен к особенностям поведения $f(a)$ в интервале рассматриваемых размеров частиц.

Задача определения размеров частиц аэрозолей настоящим методом сводится к измерению оптической толщины на нескольких длинах волн и расчету усредненных факторов эффективности ослабления лазерного излучения для этих же длин волн.

Используются два варианта ММСП – одночастотный и двухчастотный.

В первом варианте измеряется оптическая толщина, массовая концентрация частиц задается априорно из расчетов или независимых измерений, а средний размер частиц a_{32} находится графическим путем из системы уравнений:

$$\bar{Q} = f(a_{32}),$$

$$\bar{Q} = \tau a_{32} / (1,5 M).$$

Диапазон измерения размеров частиц в этом случае $a_{32} = 1 \dots 30$ мкм.

Во втором варианте используется отношение экспериментально измеренных оптических толщин на двух длинах волн, которое равно отношению усредненных факторов эффективности ослабления, представляющему собой функцию размеров частиц:

$$\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} = \frac{\bar{Q}_2(a_{32}, m, \lambda_2)}{\bar{Q}_1(a_{32}, m, \lambda_1)} = \Phi(a_{32}).$$

При реализации ММСП обычно привлекается дополнительная информация об оптических константах и классе распределения частиц по размерам. Для оценки влияния неопределенности значения комплексного показателя преломления частиц ($m = n + i\kappa$, где n – показатель преломления, κ – показатель поглощения частиц), обусловленной различной природой частиц аэрозоля, проведены расчеты \bar{Q} от a_{32} в диапазонах $n = 1, 6, \dots, 2, 0$ и $\kappa = 3,5 \cdot 10^{-3} \dots 3,0 \cdot 10^{-2}$. Установлено, что вероятная дисперсия m вносит погрешность определения a_{32} , равную 4% для частиц меньше 1 мкм, и убывает с ростом размеров частиц.

Большинство одномодальных распределений частиц, встречающихся в физике аэрозолей, описываются в основном обобщенным гамма-распределением:

$$f(a) = A a^\alpha \exp(-ba^\beta),$$

которое зависит, главным образом, от параметров α и β . Для оценки зависимости \bar{Q} от $f(a)$ проведены расчеты с использованием параметров $\alpha = 0,3 \dots 2,0$ и $\beta = 0,5 \dots 2,0$. Функции распределений в этом случае охватывают широкий диапазон размеров частиц и имеют модальные диаметры от 0,1 до 5,0 мкм. Влияние априорной неопределенности $f(a)$ приводит к погрешности определения a_{32} , равной 8...9% [2].

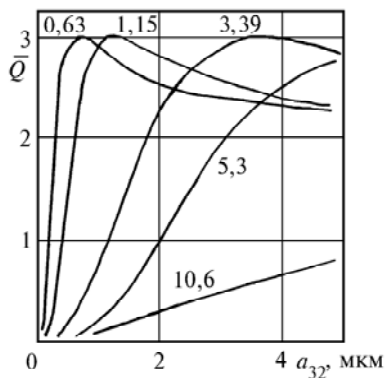


Рис. 1. Зависимость \bar{Q} от a_{32} для различных λ

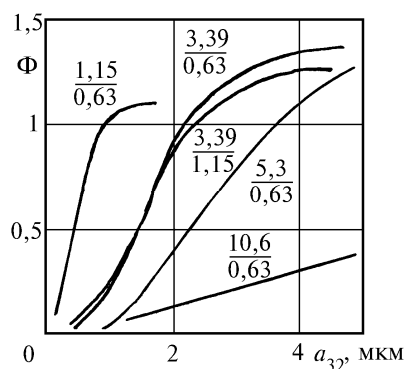


Рис. 2. Зависимость \bar{Q}_2/\bar{Q}_1 от a_{32} для различных λ

Характерные зависимости усредненных факторов эффективности ослабления от a_{32} приведены на рис. 1, а на рис. 2 показаны зависимости отношений усредненных факторов эффективности ослабления для различных пар длин волн от a_{32} , где цифрами у кривых обозначены длины волн в микрометрах. Поскольку \bar{Q} зависит от a_{32} лишь в некотором интервале размеров частиц, можно ввести понятие активной фракции частиц в общем распределении $f(a)$.

Таким образом, при лазерном контроле аэрозольных сред в случае использования одночастотного варианта ММСП определяется средний размер всего распределения частиц по размерам, а при двухчастотном варианте определению подлежит средний размер активной фракции частиц от нуля до некоторого значения, которое зависит от выбора длин волн излучения. В [3] приведены диапазоны измерения a_{32} и активных фракций частиц в зависимости от выбора длин волн излучения.

Функционально лазерный измерительный комплекс состоит из источника лазерного излучения, средств контроля и управления мощностью излучения, пульта управления, специальных фотоприемных устройств с системой селекции регистрируемого лазерного излучения, многоканальных усилительных и регистрирующих устройств, работающих в широком динамическом диапазоне входных сигналов, и средств обработки измерительной информации. Схема лазерного измерительного комплекса показана на рис. 3.

В качестве источника излучения используется специально разработанный трехволновой He-Ne-лазер, работа которого основана на физическом принципе нормальной и аномальной конкуренций лазерных переходов с общим верхним уровнем возбуждения [4].

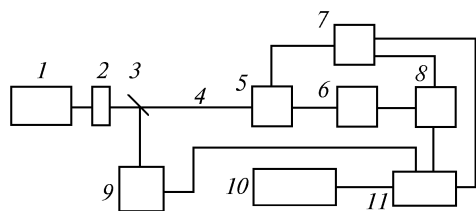


Рис. 3. Структурная схема лазерного измерительного комплекса: 1 – трехволновой He-Ne-лазер; 2 – устройство калибровки; 3 – светоделительная пластина; 4 – аэрозоль; 5 – блок светофильтров; 6 – блок фотоприемников; 7 – блок управления; 8 – усилитель с автоматическим выбором коэффициента усиления; 9 – блок контроля мощности излучения; 10 – вычислительный комплекс; 11 – магнитный регистратор

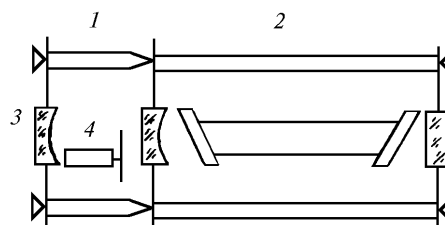


Рис. 4. Трехволновой He-Ne-лазер: 1 – оптико-механическая приставка; 2 – лазер ЛГ-75; 3 – алюминированное сферическое зеркало; 4 – модулятор

Трехволновой He-Ne-лазер (рис. 4) представляет собой трехзеркальный резонатор и состоит из лазера ЛГ-75 2 и оптико-механической приставки 1, включающей алюминированное сферическое зеркало 3 и модулятор с перфорированным диском 4. Резонатор ЛГ-75 для излучения с длиной волны $\lambda_1 = 0,63$ мкм помещен внутри резонатора для длин волн $\lambda_2 = 1,15$ мкм и $\lambda_3 = 3,39$ мкм. Модулятор открывает или закрывает со стороны активного элемента зеркало 3, что обеспечивает включение и выключение внешнего резонатора для λ_2 и λ_3 , образованного зеркалом 3 и выходным зеркалом лазера ЛГ-75. В результате возникает модулированное лазерное излучение одновременно на трех длинах волн, направленных по одному оптическому пути.

При зондировании промышленных аэрозолей на протяженных трассах с изменяющейся в больших пределах оптической толщиной применяются адаптивная система регистрации мощности лазерного излучения с использованием усилителя с автоматическим выбором коэффициента усиления в зависимости от уровня входного сигнала и блок светофильтров с автоматической регулировкой мощности лазерного излучения для обеспечения линейного режима работы блока селективных фотоприемников.

Усилитель позволяет регистрировать сигналы в диапазоне 0,001...2 В и поддерживать выходное напряжение в пределах 0...6 В. У него имеется четыре дискретных коэффициента усиления (3, 20, 80 и 200), которые автоматически меняются в зависимости от входного сигнала. Пороги срабатывания – 25, 100 и 650 мВ соответственно.

Управление светофильтрами осуществляется электронным блоком дистанционного управления, срабатывающим при минимальном и максимальном сигналах с фотоприемника.

Минимальный сигнал является условием поочередного выключения светофильтров из оптической схемы до появления сигнала на входе усилителя. При определенном уровне сигнала на выходе фотоприемника, принятом за максимальный, светофильтры включаются в оптическую схему в обратном порядке.

Измерительно-регистрационная система комплекса построена на базе четырнадцатиканального магнитного регистратора типа SR-50 и подсистемы обработки измерительной информации на базе вычислительного комплекса типа DL-1277. Этот комплекс состоит из программируемого устройства с высокой разрешающей способностью DL-1208 PG и вычислительной машины для управления и обработки данных DL-1277. Все устройства связаны между собой через канал общего пользования. Сигналы воспроизводятся магнитным регистратором, перезаписываются на DL-1208 PG и обрабатываются по специально разработанным программам на контроллере DL-1277.

За счет применения адаптивной системы регистрации сигналов и управления мощности зондирующего излучения обеспечивается динамический диапазон регистрируемых сигналов 60 дБ, а предельные значения измеряемой оптической толщины, как следует из проведенных калибровок измерительного тракта, составляют 10,5; 9,5 и 4,5 для длин волн $\lambda_1 = 0,63$, $\lambda_2 = 1,15$ и $\lambda_3 = 3,39$ мкм соответственно.

Многочастотный автоматизированный лазерный измерительный комплекс использовался для определения среднего размера и концентрации частиц промышленных и атмосферных аэрозолей, образующихся, например, при уничтожении отходов производств взрывчатых веществ. По измеренным на различных длинах волн значениям оптической толщины облака продуктов сжигания параметры частиц определялись с использованием одно- и двухчастотного вариантов ММСП. Средний размер частиц a_{32} всего спектра частиц находился в пределах 2,6...3,7 мкм в зависимости от состава уничтожаемых веществ. Средние размеры фракций 0...1,5; 0...4; 0,1...4 мкм были равны 0,5; 1; 1,2 мкм соответственно.

Дисперсные характеристики аэрозольных образований при уничтожении промышленных отходов используются для анализа и прогнозирования экологической обстановки прилегающих районов.

1. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / Зуев Е.В., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
2. Павленко А.А., Потапов М.Г., Ворожцов Б.И. // III Межд. конф. «ИКАПП-94»: Сборник статей. Барнаул: Изд. АГПУ, 1994. С. 62–64.
3. Павленко А.А., Потапов М.Г., Галенко Ю.А. и др. // III Межд. конф. «ИКАПП-94»: Сборник статей. Барнаул: Изд. АГПУ, 1994. С. 65–66.
4. Лушев В.П., Москалец О.А., Павленко А.А. и др. // ПТЭ. 1990. N 2. С. 178–179.

Научно-производственное объединение «Алтай»,
Бийск

Поступила в редакцию
16 января 1997 г.

V. I. Vorozhtsov, M. G. Potapov, A. A. Pavlenko, V. P. Lushev, Yu. A. Galenko, Ju. V. Khrustalev. Multifrequency Laser Measuring System for Atmospheric and Industrial Aerosols Monitoring.

A modified spectral method of determining mean size of aerosol particles is methodically justified, and limits of its applicability are found. Based on purpose-designed three-wave Ge-Ne-laser and adaptive system for radiation power control and record, an automated laser complex for monitoring aerosol parameters was made. The measurements of industrial aerosols' particle sizes were conducted. The obtained data are used in analysis and prediction of ecological situation in neighbour regions.