

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2023_3_2_55

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.31.29

ВАК 1.3.19

Лазерное зондирование атмосферного аэрозоля и определение его дисперсного состава

Авдонькин А. С., Веденин Е. И., Дьяченко В. В., *Чартий П. В.

Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, 353900, Новороссийск, ул. К. Маркса, 20

e-mail: * pvc-60@yandex.ru

В работе выполнена оценка возможностей метода дифференциального ослабления для дистанционного измерения параметров дисперсного состава аэрозольного загрязнения атмосферного пограничного слоя над промышленным предприятием. По измеренным сигналам ослабления лазерного излучения были рассчитаны значения среднего объёмно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента, по которым может быть восстановлена функция распределения частиц по размерам.

Ключевые слова: метод дифференциального ослабления, дисперсный состав, аэрозольное загрязнение, атмосферный пограничный слой, средний объёмно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц.

Интенсивность, концентрация и количество факторов антропогенного воздействия на окружающую среду постоянно увеличиваются. Неожиданность возникновения, сложность быстрого обнаружения источника загрязнения атмосферы и непредсказуемость развития этих событий порождают тяжелые последствия многочисленных чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Да и масштабы фоновой, регулярной эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу достаточно опасны, а сведения о них опираются на обобщение статистических материалов, предоставленных самими предприятиями и определённых расчётным путем. Всё это вызывает необходимость определения реальных объемов загрязнения атмосферы, её состояния над конкретными объектами и районами, изучения геохимии и масштабов массопереноса в атмосферном пограничном слое, разработки передовых интеллектуальных технологий и лазерных роботизированных систем, позволяющих вести непрерывный мониторинг технологических процессов и состояния окружающей среды [1]. На это направлено Распоряжение Правительства РФ от 13.03.2019 об оснащении предприятий-объектов неблагоприятного воздействия на окружающую среду первой категории автоматическими системами непрерывного контроля выбросов и передачи информации о них в Госреестр [2].

Для мониторинга загрязнения атмосферы важное значение имеют концентрация и дисперсный состав взвешенных частиц [3]. Отражением важности этих параметров для загрязнения является сравнительно недавнее введение новых экологических нормативов по концентрации в воздухе частиц различного размера – PM10, PM2,5. Поэтому целью

настоящей работы является оценка параметров метода дифференциального ослабления для дистанционного измерения параметров дисперсного состава аэрозольного загрязнения атмосферного пограничного слоя над промышленным предприятием.

Дисперсный состав аэрозолей выражается через функцию распределения частиц по размерам. Интегральная функция распределения частиц по размерам представляет функцию распределения массы материала по диаметрам частиц и равна распределению выраженного в процентах отношения массы всех частиц, диаметр которых меньше d , к общей массе аэрозольного материала. Сегодня наиболее целесообразным является разработка системы лазерного зондирования аэрозольных потоков или аэрозольного лидара дифференциального ослабления и рассеяния, которая позволит получать распределение аэрозольных частиц по размерам в атмосфере по высоте над землей в режиме реального времени. Оптическая схема такого лидара построена на основе [1, 4] и приведена на рисунке 1.

Лидар дифференциального ослабления и рассеяния подразумевает использование трех волнового излучателя, перекрывающего весь диапазон размеров частиц [5]. В качестве возможного варианта рассмотрим использование лазерного излучения на трех длинах волн - двух полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 655 нм и YAG:Nd- лазера с длиной волны 1064 нм с длительностью импульсов 100 нс и средней мощности до 10 мВт при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [4]. Это излучение трёх лазеров 20, 21 и 22 направлялось вдоль оси приёмного телескопа 24 в атмосферу.

Прошедшее слой атмосферы зондирующее излучение на каждой длине волны ослаблялось за счет рассеяния Ми на аэрозольных частицах [4, 6], а рассеянное аэрозолем и газовыми молекулами атмосферы назад излучение собиралось телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 24 диаметром 0,4 м и фокусировалось линзовым объективом 23 в световод 9. На выходе световода 9 светоделителями 7 и 8 создавались три луча, причем каждый направлялся через соответствующий интерференционный фильтр 2, 3 или 6 на свой фотоприёмник 1, 4 или 5, напряжение с которых U_3 , U_4 и U_5 записывались платой сбора данных в ПК. Часть лазерного излучения каждого лазера 20, 21 и 22 направлялось стеклянными пластинами 11, 12 и 13 и на фотоприёмники 15, 17 и 19 (напряжения U_0 , U_1 и U_2) для контроля мощности лазерного излучения или интенсивности I_0 каждого лазера и формирования начала отсчёта времени измерения.

Метод дифференциального ослабления и рассеяния основан на измерении спектрального коэффициента пропускания аэрозольного потока в некотором диапазоне волн [5]. При прохождении зондирующего излучения с длиной волны λ через слой толщиной l , состоящей из равномерно распределенных в измерительном объёме монодисперсных частиц с диаметром a со счётной концентрацией C_n , происходит его ослабление за счёт рассеяния и поглощения [6]. Интенсивность прошедшего света в этом случае определяется в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера [4]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\tau_\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-K_\lambda l), \quad (1)$$

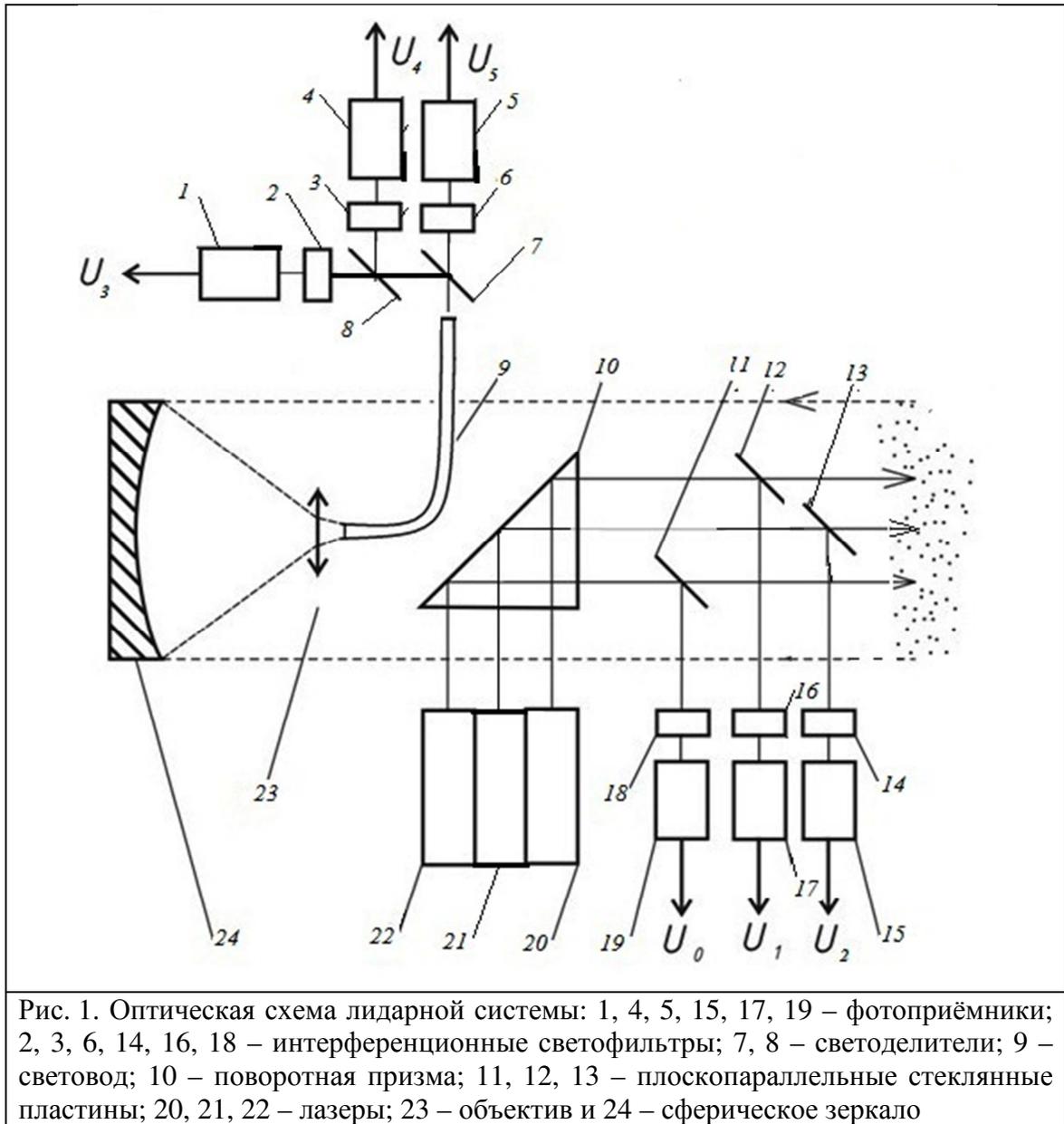
где I_0 – интенсивность падающего излучения, τ_λ – оптическая толщина слоя, K_λ – показатель ослабления слоя с концентрацией частиц C_n . Показатель ослабления слоя выражается через параметры аэрозоля

$$K_\lambda = \frac{\pi a^2}{4} Q(\alpha, \lambda, m) C_n, \quad (2)$$

где $Q(\alpha, m)$ – фактор эффективности ослабления отдельной частицей.

В случае полидисперсного аэрозоля интенсивность прошедшего света может быть представлена в виде [6]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[-\frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q(\alpha, \lambda, m) a^2 f(a) da \right], \quad (3)$$



Метод дифференциального ослабления применим в области, где зависимость фактора эффективности ослабления от λ наиболее сильно выражена (в области до первого максимума функции Q). Техническая реализация метода требует применения не менее трех лазеров. Преимуществом метода является возможность получения информации о малых частицах (диапазон измеряемых радиусов находится в пределах от 0,05 мкм до 5 мкм) [7]. Этот метод используется для определения функции распределения частиц по размерам [5, 7]. Он основан на измерении спектрального коэффициента пропускания T_λ для двух фиксированных длин волн λ_1 и λ_2 излучения зондирующего лазера, а отношение экспериментально измеренных оптических толщ на двух длинах волн равно отношению усредненных факторов эффективности ослабления и представляет собой функцию среднего объемно-поверхностного диаметра частиц:

$$\frac{\tau_{\lambda i}}{\tau_{\lambda j}} = \frac{\bar{Q}(a_{32}, \lambda_i, m)}{Q(a_{32}, \lambda_j, m)} = F_{ij}(a_{32}) \quad (4)$$

Усреднённый фактор эффективности ослабления и объёмно-поверхностный диаметр определяются по формулам:

$$\bar{Q}(a, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} Q(a, \lambda, m) a^2 f(a) da}{\int_0^{\infty} a^2 f(a) da}, \quad (5)$$

$$a_{32} = \frac{\int_0^{\infty} a^3 f(a) da}{\int_0^{\infty} a^2 f(a) da}, \quad (6)$$

где a – диаметр частиц, $f(a)$ – функция распределения частиц по размерам

По экспериментально измеренным $\tau_{\lambda i}$ на трёх длинах волн можно определить среднее значение a_{32} . А по этому значению a_{32} согласно процедуре, развитой в [8] можно восстановить функцию распределения аэрозольных частиц по размерам.

Экспериментальная проверка этого метода и соответствия рассчитанных отношений Q_i/Q_j с экспериментально измеренным отношением τ_i/τ_j была выполнена на примере цементного аэрозоля и результат приведен на рисунке 2.

Из графиков рисунка 2 видно, что рассчитанное отношение Q_i/Q_j и экспериментальное отношение τ_i/τ_j совпадают в пределах погрешности. Поэтому возможно, измерив отношение τ_i/τ_j , найти по отношению Q_i/Q_j величину a_{32} . Полученная временная зависимость соответствует зависимости отношения величин Q_i/Q_j от a_{32} в диапазоне от 0,21 до 1 мкм. По этим данным для образца цементного аэрозоля на выходе рукавного фильтра величина a_{32} составляет 0,43 мкм в хорошем согласии с другими результатами [9].

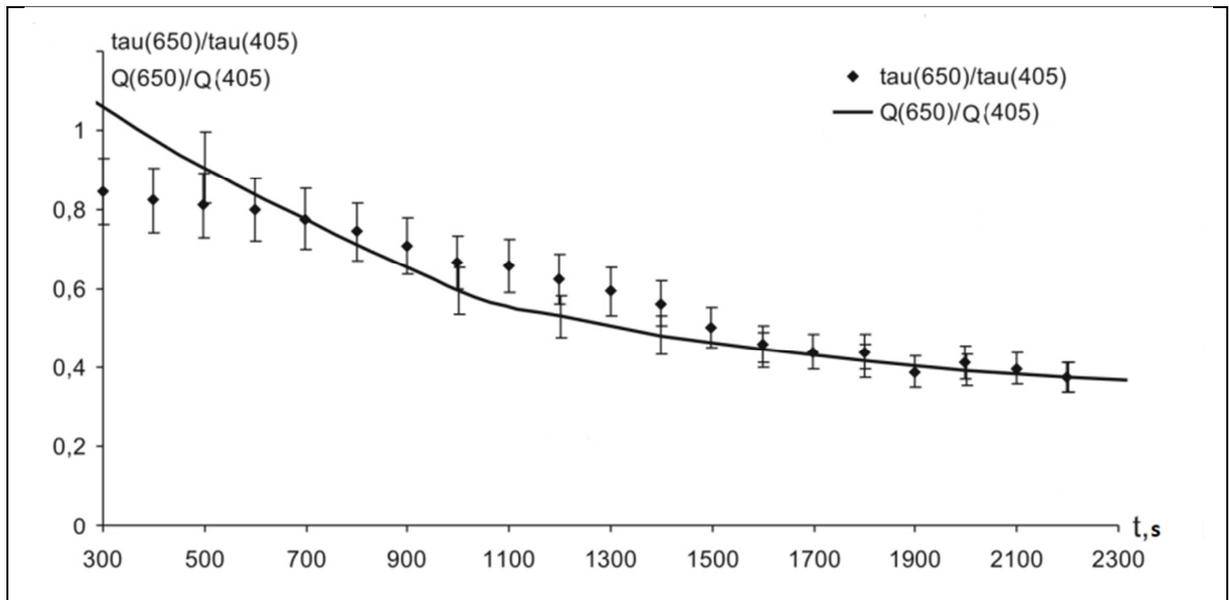


Рис. 2. Графики временной зависимости отношения Q_i/Q_j от τ_i/τ_j для длин волн лазерного излучения 650 и 405 нм частиц цементного аэрозоля

Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение a_{32} по результатам измерений на трёх длинах волн. Для нашей экспериментальной ситуации были измерены оптические плотности на трёх длинах волн лазерного излучения и найдены отношения τ_{650}/τ_{405} и рассчитано значение $a_{32} = 0,44 \pm 0,03$ мкм. Такая же процедура позволила получить для отношения τ_{1064}/τ_{405} значение $a_{32} = 0,60 \pm 0,02$ мкм и для отношения τ_{1064}/τ_{650} значение $a_{32} = 0,80 \pm 0,04$ мкм. В итоге было рассчитано среднее значение, которое составило $a_{32} = 0,61 \pm 0,04$ мкм и относительной погрешности $\varepsilon = 11 \%$.

В итоге были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трёх длинах волн на разработанной лазерной системе и по измеренным сигналам ослабления лазерного излучения были рассчитаны значения среднего объёмно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента, по которым может быть восстановлена функция распределения аэрозольных частиц по размерам [8].

Таким образом, на предприятиях с механической активацией вещества и получения дисперсных материалов, например, при производстве цемента, использование предложенного аэрозольного лидара дифференциального ослабления и рассеяния позволяет решить сразу несколько проблем [10, 11].

- создание автоматической системы непрерывного контроля выбросов и передачи информации о них в Госреестр.
- автоматизированная корректировка параметров работы технологического оборудования в случае превышения нормативных выбросов предприятия.
- непрерывный контроль и корректировка дисперсного состава продукции, за счёт её насыщения определёнными фракциями материала, улавливаемого на различных технологических этапах (например, различных фильтрах) для поддержания ФРЧ на определённом уровне.
- мониторинг установок по обеспыливанию техногенных аэродисперсных потоков (например, рукавных фильтров), для предотвращения или раннего обнаружения сверхнормативных выбросов при выходе из строя.
- для контроля состояния атмосферного воздуха на рабочем месте или в цеху в целом.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

- 1 Дьяченко В. В., Чартий П. В., Чартий Р. П., Шеманин В. Г. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы в реальном времени // *Безопасность в техносфере*, Москва, № 3, 2008. С. 36–43.
- 2 Максимов В. В. Системы непрерывного контроля выбросов. // *Экология производства*. 2018. Ноябрь. С. 48–57.
- 3 Дьяченко В. В., Роговский В. В., Чартий П. В. Контроль экологической безопасности пылегазоочистных установок модифицированным методом спектральной прозрачности // *Безопасность в техносфере*, Москва, № 4, 2014. С. 17–22.
- 4 Привалов В. Е. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы [Текст] / В. Е. Привалов, А. Э. Фотиади, В. Г. Шеманин – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 288 с.
- 5 Архипов В. А. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей [Текст] / В. А. Архипов, И. Р. Ахмадеев, С. С. Бондарчук, Б. И. Ворожцов, А. А. Павленко, М. Г. Потапов // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 01. С. 48–52.
- 6 Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
- 7 Архипов В. А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 1987. – 140 с.

8 Половченко С. В. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования [Текст] / С. В. Половченко, В. Е. Привалов, П. В. Чартий, В. Г. Шеманин, // Оптический журнал.- 2016. – Т.83. -№5 - С. 43–49.

9 Веденин Е. И., Половченко С. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Изменение функции распределения частиц по размерам при различных режимах работы пылеулавливающего оборудования // Безопасность в техносфере. –2016 - № 1(58) январь-февраль. – с.41–47.

10 Privalov V. E., Shemanin V. G. On the selection of a radiation source for one of the problems of laser probing. //Optics and Spectr. 1997. V. 82. No. 4. P. 650–652.

11 Веденин Е. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Устройство для контроля параметров аэрозольных потоков. Патент РФ на полезную модель № 159104 U1 от 27.01.2016 г.

Laser remote sensing of atmospheric aerosol and its dispersed composition determination

Avdonkin A. S., Vedenin E. I., Dyachenko V. V., Charty P. V.

*Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of the Kuban State Technological University,
353900, Novorossiysk, str. K. Marx, 20, Russian Federation*

In the work, the possibilities of the differential attenuation method for remote measurement of the parameters of the dispersed composition of aerosol contamination of the atmospheric boundary layer over an industrial enterprise were evaluated. The measured laser attenuation signals were used to calculate the average volume-surface diameter of the aerosol particles of cement, from which the particle size distribution function can be restored.

Key words: differential attenuation method, dispersed composition, aerosol contamination, atmospheric boundary layer, aerosol particles average volume-surface diameter.