

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_23

УДК 504.064.37

ВАК 05.11.13

ГРНТИ 87.15.15, 87.17.15

Обработка сигналов лидара дифференциального ослабления лазерного излучения в аэрозольном потоке

Веденин Е. И., Половченко С. В., * Сарычев И. А., Чартий П. В.

353900, Россия, Новороссийск, ул. Карла Маркса 20,
Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

e-mail: svetokdojdei@mail.ru

Контроль параметров аэрозольных частиц в выбросах промышленного производства, таких как массовая концентрация и дисперсный состав частиц, является актуальной задачей. Наиболее подходящими для контроля таких параметров в реальном времени являются лазерные методы решения обратной задачи. Целью работы является описание метода расчета массовой концентрации и параметра, позволяющего определять дисперсный состав частиц – среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, путем обработки сигналов ослабления лазерного излучения. С этой целью были разработаны устройство многоволновой лазерной системы на основе метода дифференциального ослабления лазерного излучения и пылевой стенд, создающий поток аэрозольных частиц, схожий по параметрам с потоком частиц на выходе пылегазоочистного оборудования реального производства. Была произведена серия измерений сигналов ослабления лазерного излучения на трех разных длинах волн с помощью лазерной системы на разработанном стенде. По измеренным сигналам ослабления были рассчитаны значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, оценены относительные погрешности значений рассчитанных параметров.

Ключевые слова: лазерное зондирование, массовая концентрация, средний объемно-поверхностный диаметр, аэрозольные частицы.

Введение

Контроль параметров аэрозольных частиц, поступающих в атмосферный воздух в составе выбросов промышленного производства, является актуальной задачей. Среди наиболее информативных параметров аэрозольных частиц, позволяющих определить возникновение, источник, характер и генезис загрязнения, являются массовая концентрация и средний объемно-поверхностный диаметр частиц, позволяющий восстанавливать функцию распределения аэрозольных частиц по размерам [1–4]. При этом наиболее подходящими для контроля указанных параметров аэрозольных частиц в реальном времени являются лазерные методы решения обратной задачи [1, 2]. Среди методов решения обратной задачи наибольшими преимуществами для контроля указанных параметров обладает метод дифференциального ослабления лазерного

излучения. Среди этих преимуществ: техническая реализация и юстировка систем отличается относительной простотой, возможность зондирования высокотемпературных аэрозольных потоков большой оптической плотности, малая чувствительность к вибрациям. Целью работы является описание метода расчета массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц путем обработки сигналов ослабления лазерного излучения.

Устройство экспериментальной лазерной системы

Для решения задачи восстановления функции распределения аэрозольных частиц по размерам и измерения их концентрации разработана экспериментальная лазерная система на основе метода дифференциального ослабления [5–7]. Рассмотрим оптическую схему такой лазерной системы, представленную на рис. 1.

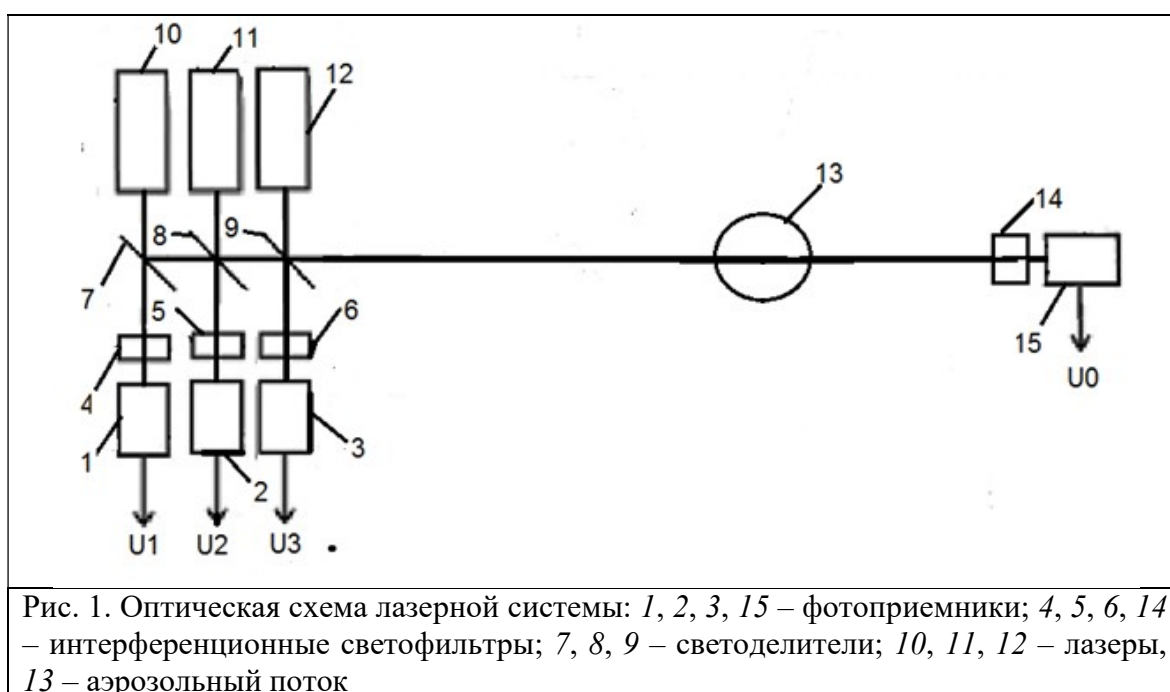


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1, 2, 3, 15 – фотоприемники; 4, 5, 6, 14 – интерференционные светофильтры; 7, 8, 9 – светоделители; 10, 11, 12 – лазеры, 13 – аэрозольный поток

Через поток аэрозоля 13, сформированный на выходе газохода и проходящий перпендикулярно лазерному лучу, пропускались три луча лазеров 10, 11 и 12 с длинами волн 405, 650 и 1064 нм, которые в схеме дифференциального ослабления направлялись на один фотоприемник 15 со своей схемой обработки сигнала. Измеренные сигналы ослабления позволяют рассчитать средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Сигналы с выходов фотоприемников U_0 , U_1 , U_2 , U_3 регистрировались системой сбора данных, работающей на линии с ПК. В экспериментальной лазерной системе для определения только концентрации аэрозоля в качестве излучателя 12 использовалась вторая гармоника YAG-Nd лазера, работающий на длине волны 532 нм в непрерывном режиме с мощностью до 0,2 т.

Последовательности импульсов лазерного излучения проходят через светоделительные пластины 7, 8 и 9. Часть прошедшего через светоделители 7, 8 и 9 излучения поступает на опорные фотоприемники 1, 2 и 3, а основная часть излучения проходит сквозь аэрозольный поток 13.

Для экспериментального исследования зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц методами дифференциального ослабления разработан экспериментальный генератор частиц цементного аэрозоля. Воздушный поток цементных частиц схожий по своим свойствам с потоками реального производства поступает в измерительный объем V перпендикулярно лазерному лучу. Изменение параметров сгенерированных аэрозольных потоков, позволяет исследовать зависимости лазерных сигналов от этих параметров.

Экспериментальное исследование сигналов ослабления

Экспериментальное исследование зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц на разработанном экспериментальном стенде осуществляется посредством лазерного зондирования аэрозольных потоков в реальном времени с одновременной записью сигналов ослабления и последующей обработкой записанных сигналов.

Измерение сигнала ослабления осуществляется в течении 9 минут.

Рассмотрим алгоритм проведения измерений. В интервале времени от 0 до 60 секунд осуществляется «нулевое» измерение. На этом этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует. В интервале времени от 60 до 120 секунд включается нагнетатель воздуха, создающий воздушный поток, питатель цементного порошка отключен. Аэрозольный поток на данном этапе отсутствует, однако в воздушный поток попадает некоторое количество цементного порошка, высыпавшееся при размещении питателя в отверстии трубки Вентури, что выражается в залповом выбросе частиц при включении питателя. В интервале времени от 120 до 420 секунд включены нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка. На данном этапе через измерительный объем лазерной установки проходит аэрозольный поток. Из-за спрессовывания цементного порошка поступление аэрозольного потока в измерительный объем лазерной установки происходит не в момент включения питателя (120 с), а через некоторое время. Устойчивый аэрозольный поток формируется в интервале – от 180 до 200 секунд и продолжается до 380...400 секунд.

В промежутке от 420 до 480 секунд питатель отключен, нагнетатель воздуха включен. На данном этапе аэрозольный поток отсутствует, генерируется только воздушный поток, в который может попадать некоторое количество цементного порошка, оставшееся на стенках газохода после пропускания через него цементной пробы. В интервале времени от 480 до 540 секунд осуществляется «нулевое» измерение. На данном этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует (рис. 2).

По полученным графикам (рисунок 2) видно, что на участке «холостого» измерения от 0 до 60 секунд величина сигнала остается неизменной. При включении нагнетателя воздуха (60 секунд) за счет залпового выброса аэрозольных частиц цемента происходит резкое кратковременное ослабление сигнала, которое продолжатся от 15 до 20 секунд. После возвращения величины сигнала к первоначальному значению на большей части участка от 75...80 до 160...165 секунд сигнал остается неизменным, отмечаются отдельные кратковременные ослабления сигнала (от нескольких до 20 секунд) связанные с попаданием в воздушный поток некоторого количества цементного порошка выдуваемого из открытой части шприца питателя. На участке от 160...165 до 370...375 секунд отмечается непрерывное ослабление сигнала в результате формирования устойчивого аэрозольного потока. Сигнал ослабления возрастает по модулю, что связано со спрессовыванием цементного порошка в шприце питателя, в результате чего

концентрация частиц в нижней части шприца питателя выше, чем в верхней. На участке от 370...375 секунд до 540 секунд сигнал остается неизменным и равным по модулю сигналу на участке от 0 до 60 секунд, что связано с отсутствием аэрозольного потока на данном участке.

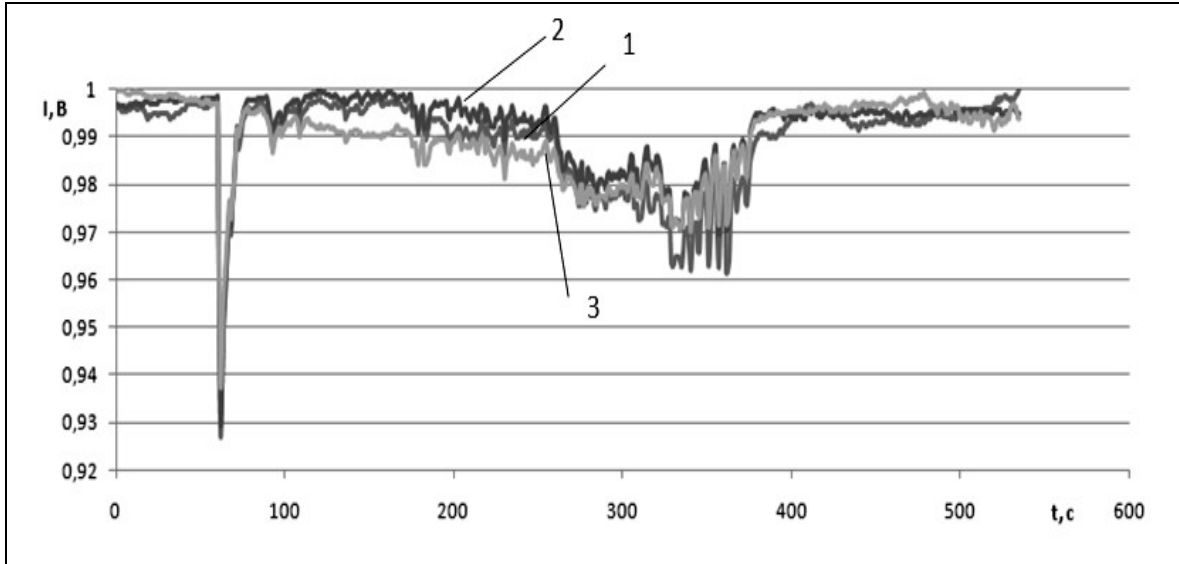


Рис. 2. График зависимости экспериментально измеренных сигналов ослабления, приведенных к максимуму, от времени измерения (после приведения к первоначальному значению нулевого сигнала): 1 – 650 нм; 2 – 1064 нм; 3 – 405 нм

Оценим возможность расчета массовой концентрации по измеренным сигналам ослабления, исходя из закона Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 e^{-kcl},$$

где I – интенсивность ослабленного излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения; k – коэффициент ослабления; c – массовая концентрация, $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$; l – оптическая длина зондирования, м. Отсюда массовая концентрация определяется по формуле:

$$c = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{kl}.$$

Для расчета концентрации по измеренным сигналам ослабления рассчитаем коэффициенты ослабления для каждой длины волны. Из последней формулы, при умножении обеих частей на объемный расход (V) получаем, равенство

$$kclV = V \ln \frac{I_0}{I},$$

интегрируя которое, имеем

$$\int_{t_1}^{t_2} kclV dt = V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt,$$

где τ – оптическая плотность.

Исходя из того, что масса вещества определяется по формуле

$$m = V \int_{t_1}^{t_2} c dt, \quad (1)$$

получаем

$$k = \frac{V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt}{ml}. \quad (2)$$

Измеренная оптическая длина зондирования составила $l = 493$ мм.

Масса цементного порошка выдавливаемого в ходе экспериментального измерения ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл) составляет $m = 0,51$ г.

Для измерения $\int_{t_1}^{t_2} \tau dt$ были вычислены и проинтегрированы значения $\ln \frac{I_0}{I}$ в интервале времени от $t_1 = 120$ секунд (время включения питателя) до $t_2 = 420$ секунд (время выключения питателя). В качестве I_0 бралось среднее арифметическое значений измеренного сигнала в интервале времени от 0 до 60 секунд («холостое» измерение).

Среднее рассчитанное по (2) значение коэффициента ослабления для сигнала на длине волны 650 нм составило $k_k = 0,174$, для сигнала на длине волны 405 нм составило $k_\phi = 0,250$, для сигнала на длине волны 1064 нм составило $k_{\text{ин}} = 0,137$.

Согласно рис. 2 массовая концентрация имеет непостоянное во времени значение. Для оценки достоверности измеряемых значений массовой концентрации рассчитывается масса пробы, являющаяся интегральной характеристикой массовой концентрации частиц по времени при постоянном расходе воздуха. По рассчитанным средним значениям коэффициента ослабления по формуле (1) рассчитаем массу пробы для каждой серии измерения, включающей измерение сигналов ослабления на трех длинах волн одной пробы цементного порошка ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл). Рассчитанные массы для длины волны 650 нм составили значения от 0,491 до 0,551 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г), для длины волны 405 нм – от 0,480 до 0,542 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г), для длины волны 1064 нм – от 0,489 до 0,594 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г).

По измеренным сигналам ослабления рассчитаем средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Средний объемно-поверхностный диаметр частиц можно определить, исходя из зависимости усредненного фактора эффективности ослабления от среднего объемно-поверхностного диаметра [8]. Кривые зависимости усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, представлены на рис. 3.

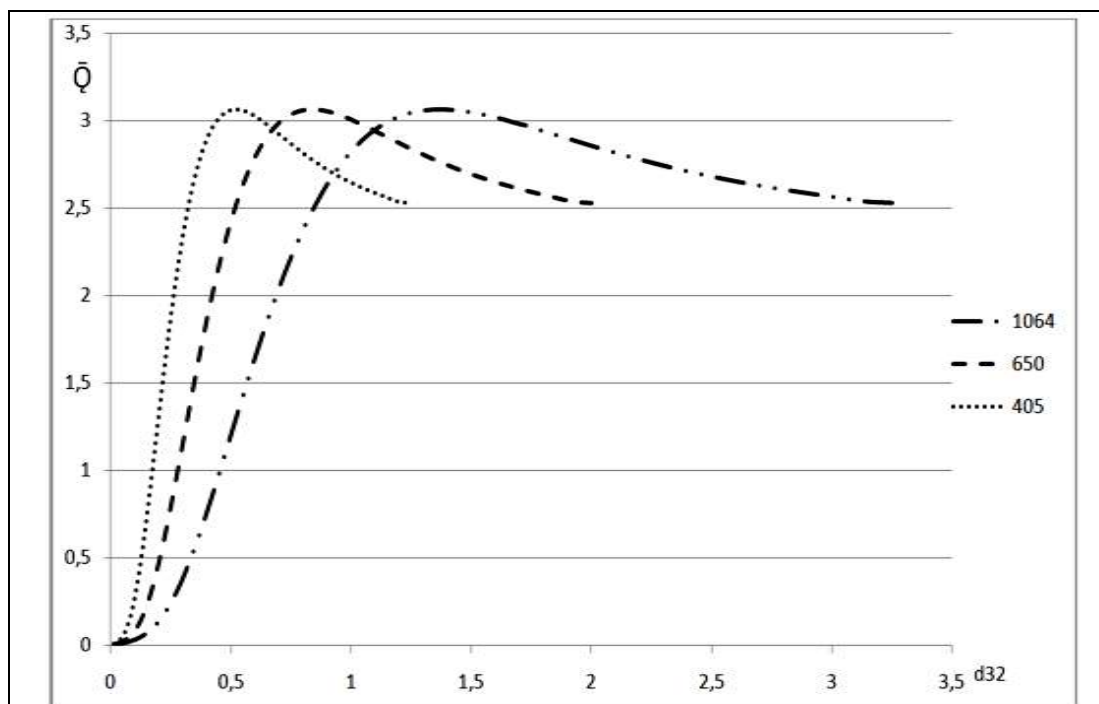
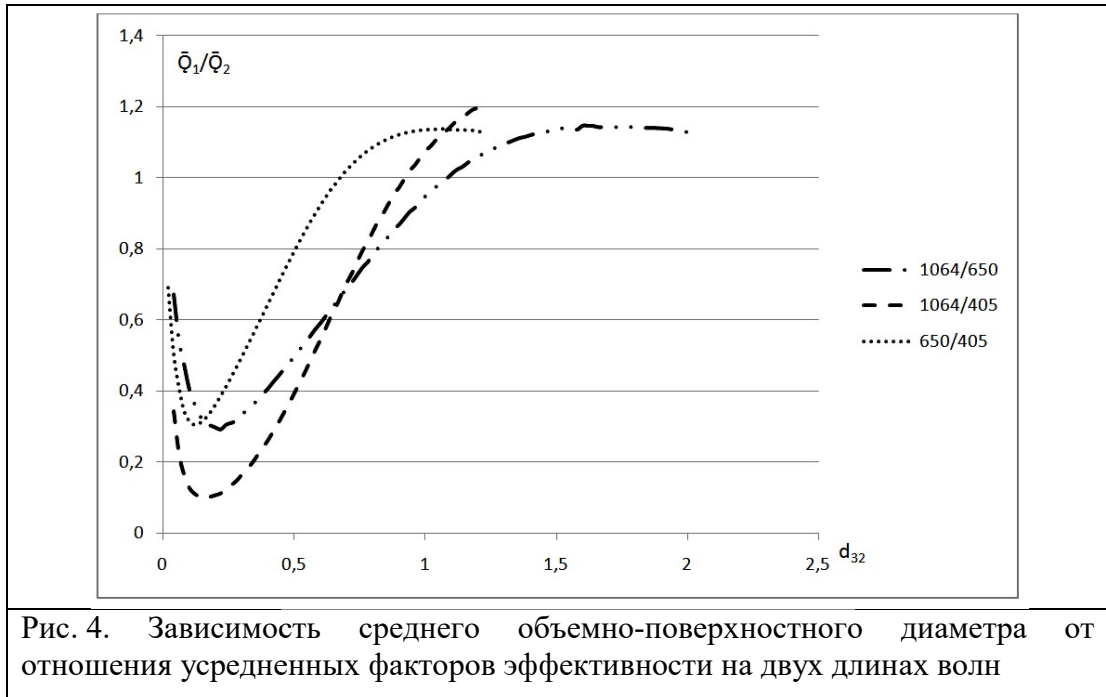


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от усредненных факторов эффективности

По известным зависимостям усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц построены кривые зависимости отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра (рис. 4).



Средний объемно-поверхностный диаметр частиц аэрозольных потоков определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [9]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(d, \lambda_i, m)}{\bar{Q}(d, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}), \quad (3)$$

где λ — длина волны зондирующего излучения; Q — фактор эффективности ослабления для одиночных частиц; d — диаметр частиц; m — комплексный показатель преломления материала частиц.

Рассчитанные, исходя из формулы (3), кривые зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн применимы для отношения оптических плотностей на двух длинах волн.

Для рассчитанных оптических плотностей на трех длинах волн были найдены отношения $\frac{\tau_{\lambda_{650}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$, $\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$, $\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{650}}}$. По построенным кривым зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн были определены значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для каждого рассчитанного отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, измеренного на трех длинах волн. Для полученных

средних значений d_{32} каждой серии было рассчитано среднее значение, которое составило $d_{32} = 0,61$ мкм.

Таким образом, были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной установке в составе экспериментального стенда. Измеренные сигналы ослабления лазерного излучения позволяют рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента.

Расчет погрешностей измерений

Рассчитаем погрешность проведенных на экспериментальном стенде измерений среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации.

В эксперименте используются пробы цемента одинакового объема ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл), при этом значения масс проб, использованных в разных сериях измерений, могут колебаться в определенных пределах. Оценим погрешность определения массы используемых проб цемента.

Для оценки погрешности определения массы проб были последовательно измерены массы восемнадцати проб цемента объемом 0,6 мл. Для исключения влияния массы шприца, в который набирались пробы, все пробы последовательно засыпались и удалялись из одного и того же шприца.

Масса пробы определялась по формуле:

$$m_{\text{пр.}} = m - m_0,$$

где m – масса шприца наполненного цементом, г; m_0 – масса чистого шприца, определяемая каждый раз после удаления предыдущей измеренной пробы, г. По рассчитанным для каждого взвешивания массам пробы было вычислено среднее значение массы пробы для всех взвешиваний

$$\bar{m}_{\text{пр.}} = \frac{\sum m_{\text{пр.}}}{n} = 0,51 \text{ г,}$$

где n – число измерений.

Среднеквадратическое отклонение результата проведенного ряда из 18 измерений составит

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum (m_{\text{пр.}} - \bar{m}_{\text{пр.}})^2}{n - 1}} = 0,016 \text{ г.}$$

Граница доверительного интервала проведенных измерений составит:

$$\Delta m = t \cdot S_m = 0,034 \text{ г,}$$

где t – табличное значение функции Стьюдента (для доверительной вероятности $P = 0,95$ и 18 измерений $t = 2,11$).

Относительная погрешность определения массы используемых в измерениях проб цемента составит [10]:

$$\delta = \frac{\Delta m}{\bar{m}_{\text{пр.}}} \cdot 100\% = 6,7 \%. \quad (4)$$

Из проведенных расчетов относительная погрешность определения массы пробы цемента составляет 6,7 %, что не может существенно повлиять на рассчитанные параметры.

Рассчитаем относительные погрешности рассчитанных значений массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц. Относительная погрешность измеренных значений среднего объемно-поверхностного диаметра на каждой длине волны для разных серий измерений и всех рассчитанных значений среднего объемно-поверхностного диаметра рассчитывалась последовательно по формуле (4).

Относительная погрешность всех рассчитанных значений средних объемно-поверхностных диаметров на трех длинах волн составила 11,4 %. Исходя из формулы (1) относительная погрешность массовой концентрации частиц равна относительной погрешности рассчитанной массы цементного порошка. Относительная погрешность измеренных значений массы на каждой длине волны для разных серий измерений и всех рассчитанных значений массы рассчитывалась последовательно по формуле (4). Относительная погрешность всех рассчитанных значений масс на трех длинах волн составила 13,4 %.

Таким образом, относительные погрешности рассчитанных по экспериментально измеренным сигналам ослабления значений среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации аэрозольных частиц цемента являются допустимыми.

Заключение

Разработанная многоволновая лазерная система на основе метода дифференциального ослабления позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения. Измерение ослабления сигналов лазерного излучения позволяет рассчитывать массовую концентрацию и средний объемно-поверхностный диаметр в реальном времени. Относительная погрешность рассчитанных таким образом значений массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц является допустимой. Развитый в работе полуэмпирический подход дает новые перспективы для решения обратной задачи лазерного зондирования аэрозоля [11, 12].

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.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проект 19-42-230004 и проект 19-45-230009.

Список литературы

1. Веденин Е. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аварийных выбросов промышленных аэрозолей в атмосферу // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/3. С. 278–280.
2. Chartiy P. V., Privalov V. E. Shemanin V. G. Nano- and micropowder laser multy wavelengths sensing and aerodynamics classifications // Key Engineering Materials. 2010. V. 437. P. 571–574.
3. Веденин Е. И., Дьяченко В. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерный контроль среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для оценки параметров аэрозольного загрязнения атмосферы // Безопасность в техносфере. 2017. № 6(69) ноябрь–декабрь. С.3–11.

4. 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). С. 41–47.
5. Веденин Е. И. Экспериментальная установка для измерения параметров цементного аэрозоля // *Материалы конференции ВНКСФ-22*. (г. Ростов-на-Дону, 21–28 апреля 2016 г.). г. Ростов-на-Дону, 2016. С. 269–271.
6. Привалов В. Е., Рыбалко А. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. О влиянии шума и вибрации цементного оборудования на работу лазерного измерителя концентрации частиц // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77, вып. 3. С. 62–65.
7. Privalov V. E., Chartii P. V., Shemanin V. G. Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5447. P. 251–259.
8. Polovchenko S. V., Privalov V. E., Chartii P. V., Shemanin V. G. Reconstructing the distribution function of particles over sizes based on the data of multiwave laser probing // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83, Issue 5. P. 300–304. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000300>
9. Архипов В. А., Ахмадеев И. Р., Бондарчук С. С., Ворожцов Б. И., Павленко А. А., Потапов М. Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 1. С. 48–52.
10. Лютиков И. В., Фомин А. Н., Леусенко В. А. / Под общ. ред. Д. С. Викторова. *Метрология и радиоизмерения: – Красноярск: СФУ, 2016. – 508 с.: ISBN 978-5-7638-3477-2. – [Электронный ресурс]. URL: <https://znanium.com/catalog/product/967405> (дата обращения: 05.11.2021)*
11. Qing Yan, Huige Di, Jing Zhao, Xiaonan Wen, Yufeng Wang, Yuehui Song, Dengxin Hua. Improved algorithm of aerosol particle size distribution based on remote sensing data // *Applied Optics*. 2019. V. 58. No. 12. P. 8075–8082.
12. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Измерение мощности упругого рассеянии атмосферного аэрозоля реальным лидаром // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 19–21.

Lidar signals processing for the laser radiation differential extinction in the aerosol flow

Vedenin E. I., Polovchenko S. V., Sarychev I. A., Chartiy P. V.

353900, Russia, Novorossiysk, Karl Marx st. 20,

Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University

Aerosol particles parameters in industrial production emissions control, such as mass concentration and dispersed particles composition, is actual task. The most suitable to control this parameters in real time are laser methods to decision reverse task. This work purpose is mass concentration and parameter, which allow to determine dispersed particles composition – volume-surface particles diameter count method description by the way of laser radiation attenuation signals processing. To this purpose have been developed multi-wave laser system arrangement based on laser radiation differential attenuation method and dust stand, which create aerosol particles flow similar by parameters with particles flow at the real production dust and gas cleaning equipment exit. Have been produced series measurements laser radiation signals attenuation on three different wave lengths by laser system on developed stand. According to the measured attenuation signals have been counted mass concentration and volume-surface particles diameter values, calculated parameters values relative errors are estimated.

Key words: laser sensing, mass concentration, volume-surface diameter, aerosol particles.