УДК 533.9.08.541.182.2/3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ АЭРОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Половченко С.В., Чартий П.В.

Новороссийский политехнический институт (филиал), ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», Новороссийск, e-mail: polosveta@mail.ru

В данном докладе отражены результаты выполненных исследований на специальном пылевом стенде. Для исследования зависимости оптических параметров получаемых аэродисперсных потоков была собрана установка, реализующая возможность лазерного зондирования аэродисперсного потока на нескольких длинах волн одновременно методом спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния. В работе показано, что в специальном пылевом стенде в виде замкнутого газохода обеспечивается стабилизация равномерного распределения аэрозоля по всему объему на десятой секунде после импульсной инжекции аэрозольного порошка в поток, что позволяет с этого момента времени проводить исследования таких аэродисперсных потоков. Для проведения одновременных исследований таких потоков методами спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния создана автоматизированная экспериментальная установка на основе трех полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 532 и 650 нм. Достигнуто необходимое повышение амплитудного разрешения и точности измерений за счет: одновременного зондирования общего измерительного объема исследуемого потока на трех длинах волн; двойной импульсной модуляция лазерного излучения и соответственно двойного синхронного детектирования измерительных сигналов; наличия опорного канала, построенного по аналогичной с измерительным каналом схеме; использования общего фотоприемника для всех длин волн в каждом методе; управления параметрами лазерного излучения и чувствительности фотоприемников, обеспечивающего оптимизацию работы АЦП. Было установлено, что динамика изменения сигналов рассеяния и ослабления лазерного излучения аэрозольными частицами на всех длинах волн согласуется с результатами расчетов на основании теории рассеяния Ми с коэффициентом детерминации не менее 0,97, что подтверждает адекватность использованных в работе моделей.

Ключевые слова: аэродисперсный поток, аэрозоль, лазерное излучение, спектральная прозрачность, интегральное рассеяние света

RELAXATION AERODISPERSE FLOW LASER SENSING INTEGRAL METHODS STUDIES

Polovchenko S.V., Chartiy P.V.

Novorossiysk Polytechnic Institute, Kuban State Technological University, Novorossiysk, e-mail: polosveta@mail.ru

This report presents the results of research on a special stand the dust. To investigate the dependence of the optical parameters obtained aerodispersed flow was collected installation realizes the possibility of laser sensing Aerodisperse flow at several wavelengths simultaneously in a spectral transmittance and light scattering integral. It is shown that in a special dust stand in a closed flue stabilization provided uniform distribution of aerosol over the entire volume on the tenth second after pulsed injection into the flow of the aerosol powder that makes this point in time to carry out such studies aerodispersed flows. To conduct simultaneous investigations of such flows methods of spectral transparency and integral scattering an automated experimental setup based on three semiconductor lasers with wavelengths of 405, 532 and 650 nm ... reached the desired increase in the amplitude resolution and measurement accuracy due to: simultaneous sensing of total measuring volume flow of the test at three different wavelengths; double-pulse modulation of laser radiation and thus double synchronous detection measurement signals; presence of the reference channel, built in the same channel with the measuring circuit; using a common photodetector for all wavelengths in each method; control the parameters of laser radiation and the sensitivity of photodetectors, providing optimization of the ADC. It was found that the dynamics of the signal scattering and attenuation of laser radiation by aerosol particles at all wavelengths is consistent with the results of calculations based on the Mie scattering theory with a coefficient of determination of at least 0,97, which confirms the adequacy of the models used in this work.

Keywords: aerosol flow, aerosol, laser radiation, spectral transmittance, integral light scattering

Лазерные и оптические методы широко применяются для диагностики гетерогенных сред. Аэродисперсные среды являются динамичными образованиями, степень устойчивости которых зависит от микрофизических свойств частиц. К ним можно отнести и аэрозольное загрязнение атмосферы и технологические аэродисперсные потоки, применяемые в различных производствах [12]. Одним из источников поступления аэрозолей в атмосферу являются промышленные выбросы, поэтому контроль аэродисперсных потоков в самих выбросах и на всех стадиях их образования при прохождении через систему пылегазоочистки является актуальным.

В основе большинства лазерных и оптических методов лежит теория рассеяния

Ми, количественно описывающая взаимодействие электромагнитного излучения с аэрозольными частицами [4]. Отдельной задачей является лазерное зондирование аэродисперсных потоков, в которой проявляются такие свойства частиц, как размеры, форма, плотность, концентрация и степень их полидисперсности. При всём многообразии методов зондирования аэродисперсных сред возникает необходимость повышения точности решения обратных задач лазерного зондирования таких потоков и проведения калибровки лазерных средств измерения [12]. Кроме того, возникает задача установления связей параметров распределения аэрозольных частиц по размерам со средними размерами частиц [1].

Целью настоящей работы является создание воспроизводимых аэродисперсных потоков, в которых концентрация и дисперсный состав аэрозольных частиц могут задаваться и точно контролироваться. Это позволит как решить задачу метрологического обеспечения самих измерительных приборов, так и проверить точность решения обратных задач лазерного зондирования.

Методы измерения

Для создания аэродисперсных потоков в [13] было предложено использовать импульсную инжекцию исследуемого порошка в замкнутый воздушный поток и релаксационный спад концентрации с течением времени после инжекции. При этом в начальный период времени после инжекции происходит распределение аэрозольных частиц по всему объёму замкнутого потока, после чего его параметры становятся плавно меняющимися от времени, что даёт возможность его исследования различными методами. Реальные аэродисперсные потоки, образующиеся при производстве цемента, характеризуются широким спектром размеров частиц (от 0,1 до 100 мкм и более) и широким диапазоном концентраций (от долей мг/м^3 до нескольких десятков тысяч мг/м^3). Поэтому кроме гравиметрического метода [3] целесообразно контролировать эти потоки методами лазерного зондирования – интегрального светорассеяния и спектральной прозрачности [7].

Описание экспериментальной установки

В данной работе на базе замкнутого пылевого стенда, подробно описанного в [13], собрана экспериментальная установка, реализующая методы интегрального светорассеяния (МИСР) и модифицированной спектральной прозрачности (МСП) на нескольких длинах волн лазерного излучения [2]. Функциональная схема установки представлена на рис. 1. В ней зондирование аэродисперсного потока осуществляется одновременно на трёх длинах волн лазеров 1. В установке использовались полупроводниковые лазеры с длинами волн 650, 405 нм и вторая гармоника YAG-Nd – микролазера с накачкой лазерным диодом – 532 нм. С помощью светофильтров 2 обеспечивается фильтрация необходимой гармоники излучения и одновременное приведение интенсивности излучений на всех длинах волн к необходимым уровням. Светофильтр, устанавливаемый на выходе излучения последнего лазера, подбирался таким образом, чтобы исключить излучение на первой гармонике.

Приведение интенсивности излучения на всех длинах волн к необходимым уровням обеспечивалось подбором нейтральных светофильтров и заключалось в том, чтобы сигналы на всех длинах волн были максимальными, не оказывая влияния друг на друга, или, иными словами, чтобы обеспечить работу фотоприемника в линейном режиме при максимально возможной интенсивности падающего на него излучения. Светоделители 4 формируют общий луч зондирующего излучения 6, который через диафрагму в стенке газохода 7 стенда направляется в геометрический центр поперечного сечения исследуемого аэродисперсного потока 8. После прохождения потока ослабленное аэрозольными частицами излучение попадает в фотоприемник 11. Рассеянное под углом θ излучение регистрируется фотоприёмником 9, имеющим возможность поворота в пределах от 0 до 180 градусов по окружности 10. Часть излучения лазеров с помощью светоделителей общим потоком направляется через зеркало 3 на фотоприёмник 5 для формирования опорного канала. Опорный канал обеспечивает контроль уровня посылаемого излучения, что позволяло исключить влияние энергетической нестабильности лазеров и чувствительности фотоприёмников. Все три лазера работают в импульсном режиме независимо друг от друга. Для оптимального подавления шумов и помех и исключения влияния сигналов друг на друга применена двойная импульсная модуляция излучения лазеров и соответствующее двойное синхронное детектирование. Двойная импульсная модуляция лазерного излучения осуществлялась следующим образом: на выходе задающего генератора импульсов формируется меандр, который поступает на вход двоичного делителя частоты с коэффициентом деления 2^n. Электрическое питание полупроводникового лазера осуществляется меандром тока на

частоте задающего генератора *f*. Последовательность этих импульсов тока прерывается с частотой $f/2^n$, где n – число натурального ряда. Таким образом, излучение лазеров осуществляется периодическими «пачками» импульсов, в этом и заключается его двойная импульсная модуляция. Сигнал на выходе фотоприемника имеет такую же периодичность следования, что позволяет осуществить его первое синхронное детектирование на частоте *f*. После первого синхронного детектирования сигнал на частоте $f/2^n$ усиливается и детектируется вторым синхронным детектором, совмещенным с фильтром низкой частоты. Двойная импульсная модуляция лазерного излучения и двойное синхронное детектирование подробно описаны в [10].

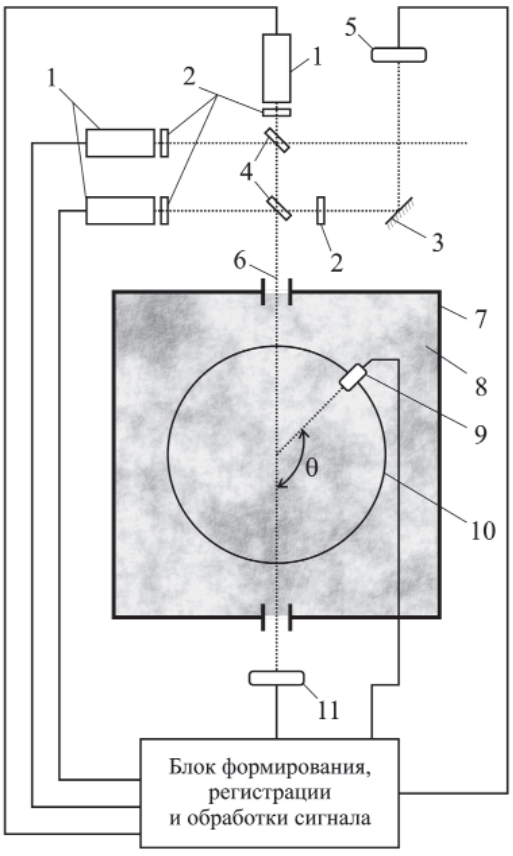

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:^ 1 – источник лазерного излучения; 2 – светофильтры; 3 – зеркала; 4 – светоделительные стекла; 5 – опорный фотоприемник; 6 – лазерный пучок; 7 – газоход; 8 – аэродисперсный поток; 9 – фотоприемник МИСР; 10 – поворотный механизм МИСР; 11 – фотоприемник МСП

Сигнал с выхода второго синхронного детектора поступает на вход 16-канального 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а затем в персональный компьютер для дальнейшей обработки и хранения. Частоты импульсной модуляции лазеров подбираются из условия максимального уменьшения влияния различных факторов [10]. Одним из таких факторов являются паразитные шумы и вибрации, влияние которых и способы борьбы с ними описаны в [9]. Все фотоприёмники построены по одинаковой схеме на базе кремниевых фотодиодов ФД-7К. В «Блок формирования, регистрации и обработки сигнала» входят генераторы импульсов для управления работой лазеров и синхронных детекторов полезных сигналов, которые через многоканальный АЦП поступают в персональный компьютер. Все регистрируемые сигналы после синхронного детектирования были квазипостоянными (имели полосу частот в пределах 1 Гц) и поступали на входы 16-канального десятиразрядного АЦП типа ЛА-50USB производства ЗАО «Руднев-Шиляев» с частотой дискретизации до 20 кГц. Коэффициент усиления каждого канала АЦП задавался таким образом, чтобы значения сигналов соответствовали уровню 50–75 % от максимально допустимого значения в этом канале, что обеспечивало относительную погрешность за счет оцифровки в пределах 0,2 %.

Результаты измерений

Для экспериментального исследования релаксационных аэродисперсных потоков была задана скорость 15 м/с как наиболее характерная для индустриальных потоков. Инжекция осуществлялась порцией цемента, просеянной на сите размером ячейки 80 мкм, массой 10 грамм. Для оценки времени стабилизации распределения аэрозольных частиц по всему объёму замкнутого потока было выполнено измерение рассеянного излучения под углом 7 градусов. Измерения проводились на длине волны 650 нм с временем интегрирования выходного сигнала порядка 1 мс. Результирующий сигнал записывался в течение 32 секунд. На рис. 2 показана временная зависимость этого сигнала.

Пространственно-временная стабилизация распределения аэрозольного облака в потоке, позволяющая проводить метрологические измерения, наступает через 9 секунд, после чего происходит стабилизация сигнала рассеяния. Этот факт позволяет считать, что начиная с 9-й секунды от момента импульсной инжекции в поток происходит полное затухание колебательной составляющей концентрации аэрозоля по всему объему потока. С этого момента времени можно начинать измерения параметров этого потока [10].

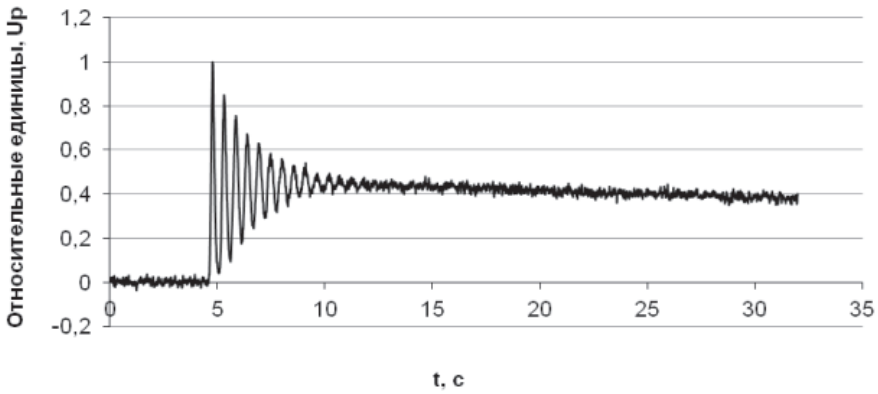

Рис. 2. Сигнал рассеяния при инжекции аэрозоля

Затем были выполнены одновременные измерения сигналов интегрального светорассеяния и ослабления лазерного излучения на трех длинах волн: 405, 532 и 650 нм. Время интегрирования выходных сигналов было выбрано 2–3 с, чтобы уменьшить влияние шумов. Полученные результаты были приведены к максимальным значениям измерительных сигналов, соответствующих моменту импульсной инжекции аэрозоля в поток. Зависимость от времени сигналов рассеяния под углом 7° на длине волны лазерного излучения 532 нм представлена на рис. 3. Выбор угла рассеяния 7° обусловлен тем, что удобней всего регистрировать малые концентрации аэрозольных частиц по сигналу рассеяния лазерного излучения в области малых углов. Конструктивно в установке была возможность надёжно регистрировать излучение, рассеянное в диапазоне углов 7–173° (при других значениях углов рассеяния проявляется «затенение» лазерного излучения корпусом фотоприемника). Поэтому именно под углом 7° ожидалось самое большое значение сигнала рассеяния. (Известно, что при размерах частиц больше длины волны, значительная часть рассеянного излучения частицей приходится на область малых углов). Таким образом, был выбран угол регистрации 7° как угол наибольшей чувствительности фотоприемника рассеянного излучения.

Затем был выполнен расчет интенсивности рассеянного излучения под углом 7° по теории Ми [2] на основании зависимости концентрации цементного аэрозоля в потоке от времени инжекции и размера частиц [10] и рассчитанного комплексного показателя преломления цементного порошка. Комплексный показатель преломления цемента был рассчитан по методике [6] на основании его химического состава и известных значений комплексных показателей преломления для входящих в него компонентов [5].

Химический состав цемента достаточно сложен и может отличаться в зависимости от применяемого сырья и способа производства клинкера. Основные составляющие цемента – это известь CaO, кремнезем SiO_2, оксид алюминия Al_2O_3 и гематит Fe_2O_3. Химический состав портландцемента в основном представлен известью (52,45 %) и кремнеземом (28,25 %) [11]. Величина комплексного показателя преломления цементного порошка рассчитывалась как линейная комбинация спектров комплексных показателей преломления компонентов с учетом их массовых составляющих. В результате получен показатель преломления

$$m = 1{,}51 - 0{,}012i.$$

Для моментов отбора проб аэрозольных частиц (точнее, для середины интервалов, в течение которых отбирались пробы) были измерены гравиметрическим методом значения концентраций аэрозольных частиц и выполнены расчеты ожидаемых сигналов рассеяния и ослабления, результаты которых показаны в виде маркеров на рис. 3 и 4.

Аналогично были выполнены измерения и расчеты для длин волн 405 и 650 нм. Коэффициент детерминации расчетных и экспериментальных точек для рассеяния составил на длине волны лазерного излучения 405 нм – 0,97, на длине волны 532 нм – 0,99 и на длине волны 650 нм – 0,98, в среднем дает значение 0,98. Из полученных результатов видно, что зависимость сигнала рассеяния Ми при релаксационном моделировании аэродисперсных потоков после импульсной инжекции исследуемого аэрозольного материала хорошо согласуется с теоретическими расчетами для всех трех длин волн лазерного излуче-

ния. На рис. 4 представлена временная зависимость сигнала ослабления *T* лазерного излучения аэрозольными частицами от времени на длине волны 532 нм. Кривая на рис. 4 была получена с помощью фотоприемника 11, который регистрировал прошедшее через поток лазерное излучение. До момента инжекции ослабления сигнала не было. Оптическая толща и коэффициент ослабления соответственно составили 0,42 и 1,515 сразу после времени установления однородности распределения аэрозоля в потоке и в конце этапа измерения соответственно 0,014; 1,014.

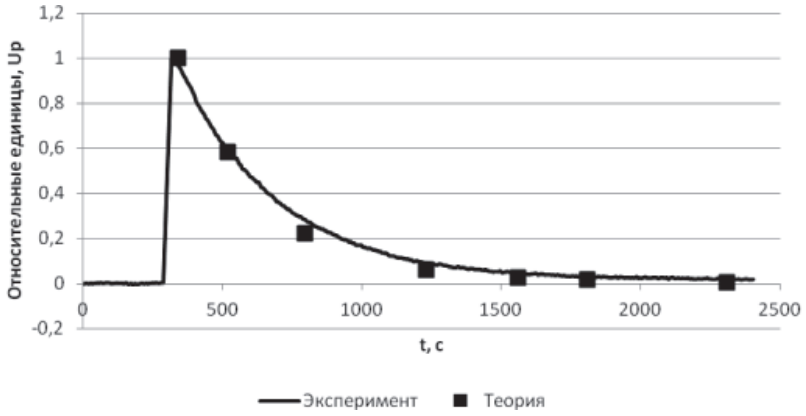

Рис. 3. График временной зависимости сигнала рассеяния Ми под углом 7° на длине волны лазерного излучения 532 нм

Так же, как и на рис. 3, моменту инжекции соответствует резкий скачок ослабления и последующий плавный рост сигнала, обусловленный релаксационным спадом концентрации аэрозоля. Для моментов времени отбора проб были выполнены расчеты в соответствии с теорией Ми ослабления лазерного излучения в предположении справедливости закона Бугера – Бера. Эти моменты времени в виде точек представлены на рис. 4.

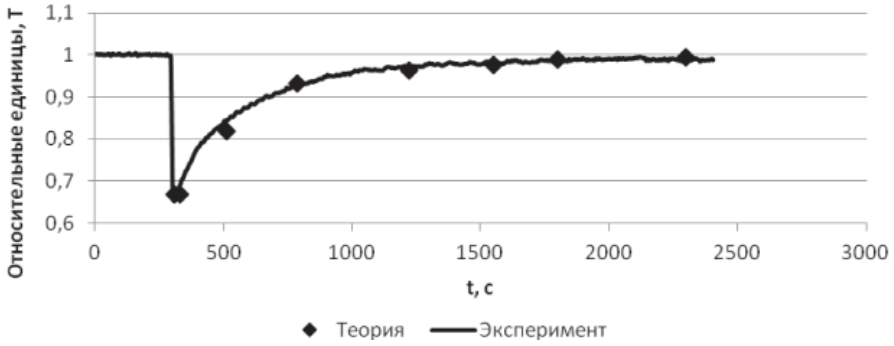

Рис. 4. Временная зависимость сигнала ослабления T лазерного излучения аэрозольными частицами от времени на длине волны 532 нм

Коэффициенты детерминации экспериментальных временных зависимостей ослабления в расчетных точках для всех длин волн составили: 405 нм – 0,97, 532 нм и 650 нм – 0,99 в хорошем согласии с данными по рассеянию.

Заключение

Таким образом, из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что в специальном пылевом стенде в виде замкнутого газохода обеспечивается стабилизация равномерного распределения аэрозоля по всему объему на десятой секунде после импульсной инжекции аэрозольного порошка в поток, что позволяет с этого момента времени проводить исследования таких потоков.

2. Создана экспериментальная установка для проведения одновременных исследований аэродисперсных потоков методами спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния.

3. Достигнуто необходимое повышение амплитудного разрешения и точности измерений за счет:

● одновременного зондирования общего измерительного объема исследуемого потока на трех длинах волн;

● двойной импульсной модуляции лазерного излучения и соответственно двойного синхронного детектирования измерительных сигналов;

● наличия опорного канала, построенного по аналогичной с измерительным каналом схеме;

● использования общего фотоприемника для всех длин волн в каждом методе; управления параметрами лазерного излучения и чувствительности фотоприемников, обеспечивающего оптимизацию работы АЦП.

4. Установлено, что динамика изменения сигналов рассеяния и ослабления лазерного излучения аэрозольными частицами на всех длинах волн согласуется с результатами расчетов на основании теории рассеяния Ми с коэффициентом детерминации не менее 0,97, что подтверждает адекватность использованных в работе моделей.

Научно-исследовательская работа выполнена при частичной поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (проект № 2284).

Список литературы

1. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Квеско Н.Г., Росляк А.Т., Трофимов В.Ф. Идентификация унимодальных распределений частиц по размерам // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 5–6. – С. 513–516.

2. 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. – № 01. – С. 48–52.

3. ГОСТ Р 50820-95 Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков.

4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.

5. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: справочник. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.

6. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1986. – 360 с.

7. Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В.. Шеманин В.Г. Идентификация спектров размеров индустриальных аэрозолей лазерными методами зондирования // Лазеры. Измерения. Информация: сборник докладов 20 международной конференции (Санкт-Петербург, июнь, 2010). – СПб.: СПбГПУ, 2010. – С. 145–160.

8. Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В.. Шеманин В.Г. Лазерная диагностика релаксационных аэродисперсных потоков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 41–43.

9. 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.

10. Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Повышение чувствительности оптоэлектронного устройства путем двойного синхронного детектирования // Прикладная оптика: Сборник трудов 6-ой Международной конференции. – СПб., 2004. – Т.1. – С. 242–246.

11. Физико-химические и механические свойства аэрозолей и пыли выделяемых основным оборудованием цементных заводов (справочные материалы) / под общ. ред Г.И. Водолазского / НИПИОТСТРОМ. – Новороссийск, 1976. – 112 с.

12. Хмелевцов С.С., Коршунов В.А., Никитин В.М., Кобелев В.В. Многоволновое и поляризационное лидарное зондирование аэрозольных промышленных выбросов // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18. – № 03. – С. 232–237.

13. Vadim E. Privalov, Pavel V. Charty and Valery G. Shemanin Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // Proceeding of SPIE. – 2004. – Vol. 5447. – P. 251–259.

References

1. Arhipov V.A., Bondarchuk S.S., Kveskо N.G., Rosljak A.T., Trofimov V.F. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2004, Vol. 17, no. 5–6, pp. 513–516.

2. Arhipov V.A., Ahmadeev I.R., Bondarchuk S.S., Vorozhcov B.I., Pavlenko A.A., Potapov M.G. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2007,Vol. 20, no. 1, pp. 48–52.

3. *GOST R 50820-95 Oborudovanie gazoochistnoe i pyleulavlivajushhee. Metody opredelenija zapylennosti gazopylevyh potokov*. [GOST R 50820-95 Equipment gas-scrubbing and dust-collecting. Methods for determination of dusty gas and dust flows.].

4. Deirmendjian D. *Electromagnetic Scattering on spherical polydispersions*. American Elsevier Publishing Company, Inc. New York, 1969.

5. Zolotarev V.M., Morozov V.N., Smirnova E.V. *Opticheskie postojannye prirodnyh i tehnicheskih sred. Spravochnik.*[The optical constants of natural and technical environments. Handbook.] Leningrad, 1984. 216 p.

6. Ivlev L.S., Andreev S.D. *Opticheskie svojstva atmosfernyh ajerozolej*. [Optical properties of atmospheric aerosols] Leningrad, 1986. 360 p.

7. Polovchenko S.V., Rogovskij V.V., Chartij P.V.. Shemanin V.G. *Trudy 20 mezhdunarodnaja konferencija «Lazery. Izmerenija. Informacija»*. [Lasers. Measurement. Information]. Sankt-Peterburg, 2010, pp. 145–160.

8. Polovchenko S.V., Rogovskij V.V., Chartij P.V. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*.[Scientific and Technical Gazette *Povolzh'ja*]. Kazan, 2013, no. 2, pp. 41–43.

9. Privalov V.E., Rybalko A.V., Chartij P.V., Shemanin V.G. *Zhurnal tehnicheskoj fiziki*. [Journal of Technical Physics]. 2007, Vol. 77, no. 3,pp. 62–65.

10. Privalov V.E., Chartij P.V., Shemanin V.G. *Prikladnaja optika: Sbornik trudov 6-oj Mezhdunarodnoj konferencii.* [Applied Optics]. Sankt-Peterburg, 2004, Vol.1, pp. 242–246.

11. *Fiziko-himicheskie i mehanicheskie svojstva ajerozolej i pyli vydeljaemyh osnovnym oborudovaniem cementnyh zavodov (spravochnye materialy)*. Novorossijsk, 1976, 112 p.

12. Hmelevcov S.S., Korshunov V.A., Nikitin V.M., Kobelev V.V. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2005, Vol. 18, no. 3, pp. 232–237.

13. Vadim E. Privalov, Pavel V. Charty and Valery G. Shemanin Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies// Proceeding of SPIE, 2004. Vol. 5447. pp. 251–259.

Рецензенты:

Аткарская А.Б., д.т.н., профессор, (филиал) ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет», г. Новороссийск;

Шеманин В.Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общих дисциплин, Новороссийский политехнический институт (филиал), ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», г. Новороссийск.

Работа поступила в редакцию 12.11.2014.