

УДК 533.9.08.541.182.2/3

В.Е. Привалов, С.В. Половченко, П.В. Чартий

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ АЭРОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ

В данной статье отражены результаты исследования зависимости оптических параметров аэродисперсных потоков, созданных на специальном пылевом стенде, от среднего диаметра частиц пыли. Установка представляет собой замкнутый контур с импульсной инжекцией аэрозольного материала и реализует возможности лазерного зондирования аэродисперсного потока одновременно на нескольких длинах волн методом спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния. Установлено, что по измеренному методами лазерного зондирования (основаны на теории рассеяния Ми) среднему объемно-поверхностному диаметру функции распределения частиц по размерам на выходе в атмосферу можно восстанавливать саму функцию распределения частиц по размерам.

ПОТОК, АЭРОЗОЛЬ, АЭРОДИСПЕРСНЫЙ ПОТОК, ЛАЗЕР, РАЗМЕР ЧАСТИЦ, СРЕДНИЙ ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДИАМЕТР ЧАСТИЦ, ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

Введение

Различные аэрозоли часто встречаются в повседневной жизни, а также присутствуют во многих технологических процессах. Измерение концентрации и распределения промышленных аэрозольных частиц по размерам как в технологических газовых потоках, так и в атмосферном воздухе является по-прежнему актуальной задачей. Дополнения к санитарно-гигиеническим требованиям (приняты в 2010 году), которые предъявляются к содержанию в атмосфере мелкодисперсных взвешенных частиц [1], поставили перед исследователями новую задачу, связанную с необходимостью оценки концентраций $PM_{2,5}$ и PM_{10} . Последние подразумевают фракции частиц с аэродинамическими диаметрами менее 2,5 и 10 мкм, соответственно.

Промышленные аэродисперсные потоки характеризуются значительными концентрациями и полидисперсностью. При этом функция распределения частиц по размерам и концентрация, как правило, несут в

себе информацию о состоянии технологического процесса. Для контроля указанных параметров аэрозолей требуются приборы и измерительные комплексы, отвечающие основным требованиям, характерным для диагностических приборов: достоверность, оперативность представляемых показателей, компактность и возможность компьютерной обработки необходимого объема данных в режиме реального времени.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили оптические методы анализа аэрозолей. Такой выбор связан с определенными преимуществами данных методов перед прочими:

неразрушающим воздействием оптического излучения на структуру аэрозоля;

хорошо разработанной теорией распространения и взаимодействия электромагнитного излучения с различными средами;

существованием большого количества промышленно выпускаемых разнообразных типов источников излучения, оптических систем и их компонентов;



большим выбором прикладных программных продуктов и математических методов расчета, относящихся к оптическим измерениям.

При выборе методики регистрации излучения, рассеянного аэрозолями, необходима априорная информация о его связи с заданными характеристиками аэрозоля (средний размер, концентрация и др.) для выбранного приемника излучения.

Таким образом, цель настоящей работы – создание управляемого аэродисперсного потока и анализ параметров аэрозоля в потоке, нахождение связи этих параметров с регистрируемым рассеянием. На этой основе ставилась задача выбора оптимального метода контроля базовых параметров. За отправную точку разработки метода были приняты аэродисперсные потоки на цементном производстве.

Методы исследования

Наиболее перспективными из всего многообразия методов и систем, которые используются для измерения массовых концентраций и распределения частиц по размерам, являются интегральные методы лазерного зондирования. Такие методы применяются, в частности, и при исследовании аэродисперсных потоков реальных технологических процессов цементного производства, и при условиях рассеяния воздушных потоков в атмосфере.

Особое место среди указанных применяемых методов лазерного зондирования занимают методы модифицированной спектральной прозрачности (ММСП) и интегрального светорассеяния (полной индикатрисы, МИСР).

Что касается дифференциальных оптических методов, то они не нашли практического применения для измерения концентрации твердых частиц в реальном потоке полидисперсного цементного аэрозоля, так как последний характеризуется широким диапазоном концентраций (от 10 до 100 г/м³); при этом размеры частиц находятся в пределах от 0,1 до 100 мкм [2, 3].

Поскольку измерение параметров аэрозольных частиц целесообразно проводить непосредственно в газоходе, лидарные ме-

тоды измерения практически не используются из-за ограниченных размеров газоходов и паразитного рассеяния назад от стенки газохода. Метод малых углов [3, 4] также оказывается неприменимым, в связи с тем, что реальное производство цемента сопровождается низкой шумоизоляцией и повышенной вибрацией технологического оборудования.

Измерение широкого спектра размеров частиц, как уже отмечалось, представляет собой технически сложную задачу. Она выполняется, как правило, только в лабораторных условиях, на дорогостоящем аналитическом оборудовании, но не в реальных временных рамках и реальном аэродисперсном потоке. Известны методы лазерного зондирования аэродисперсных потоков, которые позволяют измерять средние размеры аэрозольных частиц. В частности, при помощи метода спектральной прозрачности можно определять распределение спектра частиц по размерам; при этом в технологическом процессе измеряют средние спектры частиц и используют инварианты спектров их размеров. Например, в работе [5] показано, что модифицированный метод спектральной прозрачности позволяет измерять средние размеры частиц в потоке в реальном времени на двух и более длинах волн. Значения длин волн лазерного излучения выбираются таким образом, чтобы отношение средних значений фактора рассеяния для этих длин волн (оно равно отношению соответствующих значений оптической толщины) было монотонной функцией среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32} . Тогда мы можем найти среднее значение объемно-поверхностного диаметра, рассчитывая оптическую толщину по результатам измерения степени ослабления лазерного излучения в аэрозольном потоке.

В основе модифицированного метода спектральной прозрачности (ММСП) [5, 6] лежит решение обратной задачи для интегрального уравнения

$$\tau_\lambda = \frac{\pi C_n I}{4} \int_0^\infty \delta^2 Q(\delta, \lambda, m) f(\delta) d\delta, \quad (1)$$

где τ_λ – спектральная оптическая толщина, C_n – счетная концентрация частиц, λ –

длина волны зондирующего излучения, Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц, l – оптическая длина зондирования, δ – диаметр частиц, m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления определяется выражением

$$\bar{Q}(\delta, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} Q(\delta, \lambda, m) \delta^2 f(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta}. \quad (2)$$

Заменив счетную концентрацию C_n на массовую C_m , которая следует выражению

$$C_m = C_n \frac{\pi \rho_p}{6} \int_0^{\infty} \delta^3 f(\delta) d\delta, \quad (3)$$

получим формулу для оптической толщины:

$$\tau_{\lambda} = \frac{1,5 C_m l \bar{Q}(\delta, \lambda, m)}{\rho_p \delta_{32}}, \quad (4)$$

где ρ_p – плотность материала частиц, а

$$\delta_{32} = \frac{\int_0^{\infty} \delta^3 f(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta}$$

– средний объемно-поверхностный диаметр частиц.

По экспериментально измеренным τ_{λ_i} и рассчитанным значениям δ_{32} массовая концентрация в измерительном объеме определяется по формуле

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda_i} \rho_p \delta_{32}}{1,5 l \bar{Q}(\delta_{32}, \lambda, m)}. \quad (5)$$

Физическая модель метода основана на взаимодействии монохроматического излучения с полидисперсной средой, которая описывается теорией Ми, и на сохранении инвариантности усредненного фактора эффективности ослабления относительно вида функции распределения частиц по размерам [5].

Определение дисперсного состава аэрозоля методом спектральной прозрачно-

сти сводится к измерению спектральной оптической толщины дисперсной среды на нескольких длинах волн и к последующему расчету усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Величина отношения экспериментально измеренных оптических толщин на двух длинах волн равна соответствующему отношению усредненных факторов эффективности ослабления, и представляет собой функцию среднего размера частиц [5]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(\delta_{32}, \lambda_i, m)}{\bar{Q}(\delta_{32}, \lambda_j, m)} = F_{ij}(\delta_{32}). \quad (6)$$

Диапазон значений средних размеров частиц, достигаемый такими измерениями, зависит от выбора длин волн зондирующего излучения.

Для данного метода характерна достаточно простая аппаратная реализация, и он позволяет диагностировать потоки большой оптической плотности. Для осуществления конкретной схемы модифицированного метода спектральной прозрачности была создана установка на базе специального пылевого стенда [7]. Она позволяет проводить измерения степени ослабления лазерного излучения на трех длинах волн и затем находить две функциональные зависимости: ослабления лазерного излучения от концентрации частиц, а также среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32} от функции распределения частиц по размерам. Нахождение двух указанных зависимостей основано на моделировании концентрации частиц аэрозоля и функции распределения этих частиц по размерам.

Схема экспериментальной установки

Оптическая схема измерителя ММСП (рис. 1) состоит из источников лазерного излучения I на трех длинах волн: 405, 532, 650 нм; фотоприемников излучения II , установленных на противоположной от источников лазерного излучения стороне газохода 7 ; опорного фотоприемника 5 , в который через систему светоделительных стекол 4 и зеркал 3 попадает излучение, не прошедшее через измерительный объем; а также блока формирования, регистрации и обработки

сигнала. В этот блок входят измерительный и опорный синхронные детекторы, усилитель мощности и генератор импульсов. Синхронное детектирование измерительных сигналов позволяет существенно повысить чувствительность фотоприемного устройства [8]. Внутри газохода 7 установлен фотоприемник 9 на специальном поворотном механизме для регистрации рассеянного излучения методом интегрального светорас-

сеяния (МИСР) под заданным углом θ [4]. В настоящей работе метод МИСР использовался для регистрации момента окончания проветривания пылевого стенда, так как имеет большую (по сравнению с ММСП) чувствительность в диапазоне малых концентраций. Сигнал фотоприемника МИСР становится равным нулю только тогда, когда концентрация аэрозольных частиц в стенде приближается к нулю.

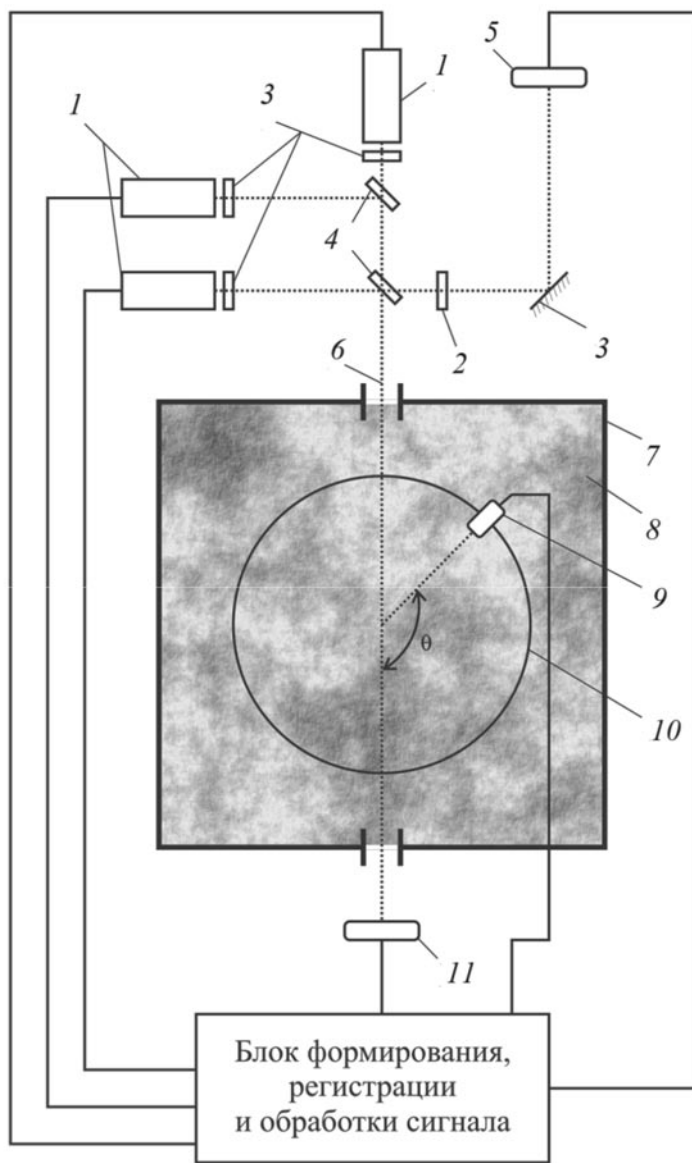


Рис. 1. Оптическая схема измерителя ММСП:
 1 – источник лазерного излучения; 2 – светофильтры; 3 – зеркала; 4 – светоделительные стекла;
 5 – опорный фотоприемник; 6 – лазерный пучок; 7 – газоход; 8 – аэродисперсный поток;
 9 – фотоприемник МИСР; 10 – поворотный механизм МИСР; 11 – фотоприемник МСП



находится в газоходе).

Во всех экспериментах фотоприемник МИСР находился в области малых углов, и его сигнал являлся индикатором чистоты стенда во время проветривания.

В смотровых окнах с двух сторон газохода на пути луча проделаны отверстия, в которые вставлены металлические трубки с подсоединенными к ним резиновыми трубками; последние, в свою очередь, присоединены к воздушовке. Это сделано для того, чтобы не допустить выдувание аэрозоля за пределы стенда.

Сигналы измерителя ММСР поступают на блок обработки сигналов, подключенный к аналогово-цифровому преобразователю, который передает их далее на ПК. Блок обработки сигналов задействован на девять каналов АЦП.

Предварительные оценки для проведения экспериментов

При знании *a priori* диапазона возможных средних размеров частиц, длины волн зондирующего излучения должны находиться вблизи следующих значений:

$$\lambda^{\min} = \pi \delta_{32}^{\min} \left(\frac{|m|^2 - 1}{|m|^2 + 3} \right),$$
$$\lambda^{\max} = \pi \delta_{32}^{\max} \left(\frac{|m|^2 - 1}{|m|^2 + 3} \right),$$
(7)

где m – показатель преломления вещества аэрозольного материала.

Комплексный показатель преломления цемента был рассчитан по методике [9] на основании его химического состава и известных значений комплексных показателей преломления входящих в него компонентов [10].

Химические составы цемента достаточно сложны и могут очень сильно различаться 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 [11]. Величина комплексного показателя преломления цементного порошка рассчитывалась как ли-

нейная комбинация спектров комплексных показателей преломления компонентов с учетом их массовых составляющих. В результате получен средний показатель преломления

$$m = 1,690 - 0,013i.$$

В силу возможного варьирования процентного содержания составляющих цемента, комплексный показатель преломления цемента может несколько изменяться. Поскольку для аэрозоля с размерами менее 5 мкм этот фактор практически не влияет на значение коэффициента ослабления лазерного излучения, было ясно, что фиксированное значение комплексного показателя преломления в виде найденного среднего значения не должно приводить к увеличению погрешности измерений и расчетов.

Исследование трансформации 120 функций распределения частиц по размерам реального цементного потока показало, что после прохождения последней ступени очистки распределение частиц по размерам характеризуется средним объемно-поверхностным диаметром, лежащим в диапазоне от 0,37 до 0,51 мкм. Используя формулу (1), мы определили, что длины волн лазерного излучения должны находиться вблизи границ промежутка 0,375 – 0,513 мкм. Для исследования были выбраны три полупроводниковых лазера с длинами волн 405, 532 и 650 нм.

Регрессионные зависимости для восстановления функции распределения частиц по размерам

В результате численного моделирования трансформации функций распределения частиц по размерам в потоке были получены функции распределения частиц на выходе в атмосферу. Для каждой полученной функции распределения выполнены расчеты величин среднего арифметического, среднего квадратичного, среднего массового и среднего объемно-поверхностного диаметра. Между средним объемно-поверхностным диаметром, который измеряется лазерными методами, и остальными средними значениями диаметров установлены регрессион-

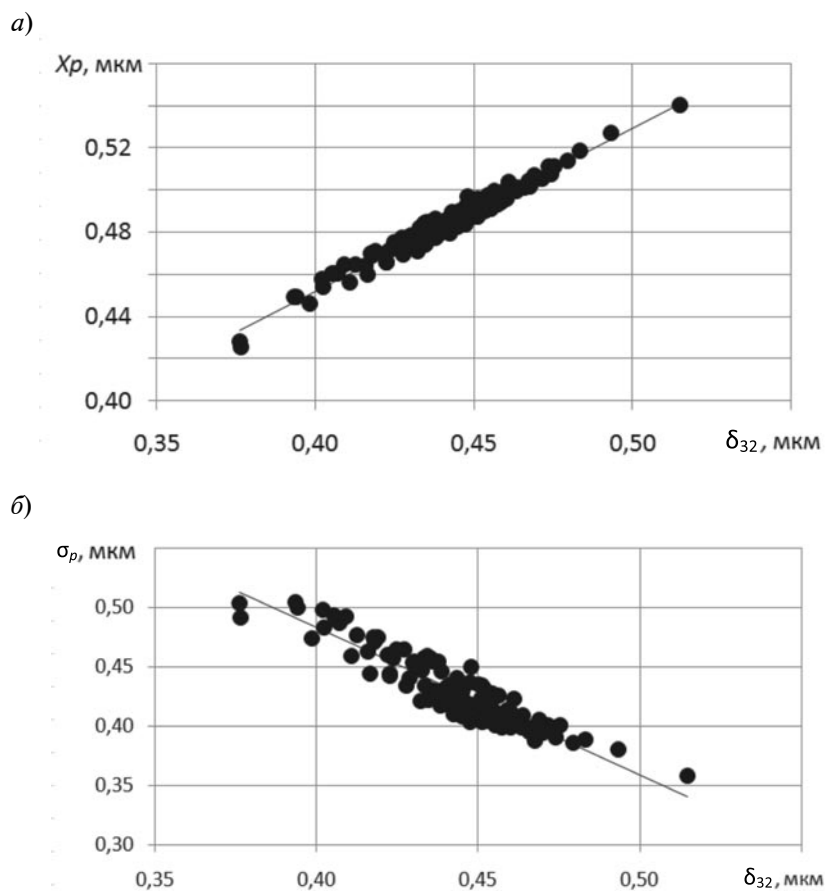


Рис. 3. Зависимости среднего геометрического диаметра x_p (а) и стандартного геометрического отклонения σ_p (б) от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

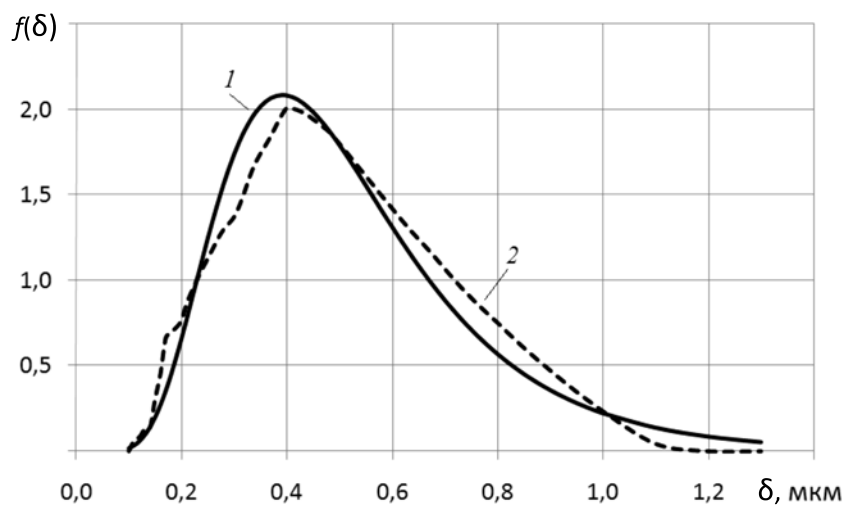


Рис. 4. Пример восстановленной функции распределения частиц по размерам (кривая 1); сравнение с исходными данными (кривая 2)



ные зависимости с коэффициентом детерминации не менее 0,85.

Аппроксимируя полученные функции распределения частиц логарифмически-нормальным законом, мы определили его параметры. Коэффициенты детерминации такой аппроксимации составили не менее 0,87. Между параметрами этих законов и средним объемно-поверхностным диаметром выявлена функциональная зависимость (рис. 3). Полученные линейные зависимости подчиняются уравнениям

$$x_p = 0,7723 \delta_{32} + 0,1430 \text{ (рис. 3, а);}$$

$$\sigma_p = -1,2409 \delta_{32} + 0,9793 \text{ (рис. 3, б);}$$

коэффициенты детерминации составили:

$$R_1^2 = 0,9678 \text{ (рис. 3, а);}$$

$$R_2^2 = 0,8566 \text{ (рис. 3, б).}$$

С помощью этих регрессионных зависимостей нами были восстановлены функции распределения для всех 120 образцов. Значение коэффициента детерминации между восстановленными и исходными данными

составило не менее 0,74. Пример одного из восстановлений приведен на рис. 4.

Заключение

Таким образом, в результате создания экспериментальной установки, проведенных измерений рассеянного лазерного излучения методом интегрального светорассеяния, на примере анализа параметров аэрозоля аэродисперсного потока цементного производства, установлено следующее.

Измерение методами лазерного зондирования (основаны на теории рассеяния Ми) среднего объемно-поверхностного диаметра функции распределения частиц по размерам на выходе в атмосферу позволяет восстанавливать саму функцию распределения частиц по размерам.

Восстановление указанной функции распределения дает возможность адекватно оценивать распространение аэрозольных частиц в атмосферном воздухе и контролировать их предельно допустимые концентрации в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дополнения № 8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». М.: Издание Роспотребнадзора РФ, 2010. 2 с.
2. Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Анализ методов диагностики воздушных потоков полидисперсных аэрозольных частиц // Вестник СПб О РАИН. 2008. Вып. 5. С. 102–138.
3. Чартий П.В., Чартий Р.П., Шеманин В.Г. Контроль дисперсности минеральных веществ в реальном времени при их механической активации // Труды СПбГТУ. «Радиофизика, электроника, информационные технологии». 2008. № 507. С. 298–309.
4. 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.
5. 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.
6. Архипов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. 140 с.
7. Чукардин В.Е., Чартий П.В. Стенд для моделирования промышленного пылегазового потока // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 9. С. 50–52.
8. Privalov V.E., Charty P.V., Shemanin V.G. Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5447, pp. 251-259.
9. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1986. 360 с.
10. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
11. Физико-химические и механические свойства аэрозолей и пыли, выделяемых основным оборудованием цементных заводов (справочные материалы). Под общ. ред. Г.И. Водлазского. Новороссийск: Издание НИПИ-ОТСТРОМ, 1976. 112 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРИВАЛОВ Вадим Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vaevpriv@yandex.ru

ПОЛОВЧЕНКО Светлана Васильевна – аспирантка кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Polosveta@mail.ru

ЧАРТИЙ Павел Валикович – докторант кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
pvc-60@yandex.ru

Privalov V.E., Polovchenko S.V., Chartiy P.V. AN EXPERIMENTAL STUDY OF INDUSTRIAL AIR DISPERSE FLOWS.

This paper studies the dependence of optical parameters on the aerosol particle average diameter. The air disperse flows were generated using a special duster set-up. This set-up operates in a closed gas circuit with pulse aerosol material injection and makes it possible to sense the air disperse flows by simultaneous laser emission with different wavelengths through both the spectral transparency and integrated light scattering methods. The authors put forward a procedure of the inverse problem solution for the industrial aerosol flows dumped into the atmosphere obviating the application of integral equations by solving the direct problem system by jointly using the two laser sensing methods mentioned above. It was found that the aerosol particles size distribution function could be reconstructed according to the average volume surface diameter being measured in the aerosol flow at the output into the atmosphere. Those measurements could be taken by laser sensing methods based on the Mie scattering theory. The procedure described can serve as a basis for engineering instruments of industrial flows monitoring in real-time processing.

FLOW, AEROSOL, AIR DISPERSE FLOW, LASER, PARTICLES SIZE. AVERAGE VOLUME SURFACE DIAMETER, PARTICLES SIZE DISTRIBUTION FUNCTION, MIE SCATTERING THEORY.

REFERENCES

1. *Dopolneniya №8 k GN 2.1.6.1338-03 «Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh naseleennykh mest»*. Rospotrebnadzor RF. Moscow, 2010, 2 p. (rus)
2. **Privalov V.E., Chartiy P.V., Shemanin V.G.** Analiz metodov diagnostiki vozdushnykh potokov polidispersnykh aerazol'nykh chastits. *Vestnik SPbO RAIN*. 2008. Iss. 5, pp. 102-138. (rus)
3. **Chartiy P.V., Chartiy R.P., Shemanin V.G.** Kontrol' dispersnosti mineral'nykh veshchestv v real'nom vremeni pri ikh mekhanicheskoy aktivatsii. *Trudy SPbGTU «Radiofizika, elektronika, informatsionnye tekhnologii»*, 2008, № 507, pp. 298-309. (rus)
4. **Privalov V.E., Rybalko A.V., Chartiy P.V., Shemanin V.G.** O vliyanii shuma i vibratsii tsementnogo oborudovaniya na rabotu lazernogo izmeritelya kontsentratsii chastits. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2007, Vol. 77, Iss. 3, pp. 62-65. (rus)
5. **Arkipov V.A., Akhmadeev I.R., Bondarchuk S.S., Vorozhtsov B.I., Pavlenko A.A., Potapov M.G.** Modifitsirovannyj metod spektral'noj prozrachnosti izmereniya dispersnosti aerazolej. *Optika atmosfery i okeana*, 2007, Vol. 20, No. 1, pp. 48-52. (rus)
6. **Arkipov V.A.** *Lazernye metody diagnostiki geterogennykh potokov: Uchebnoe posobie*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Universiteta, 1987. 140 p. (rus)
7. **Chukardin V.E., Chartiy P.V.** Stend dlya modelirovaniya promyshlennogo pylegazovogo potoka. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* 2003, No. 9, pp. 50-52. (rus)
8. **Privalov V.E., Chartiy P.V., Shemanin V.G.** Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies. *Proceedings of SPIE*, 2004. Vol. 5447, pp. 251-259.
9. **Ivlev L.S., Andreev S.D.** *Opticheskie svoystva atmosferynykh aerazolej*. Leningrad, Izd-vo Leningradskogo Universiteta, 1986. 360 p. (rus)
10. **Zolotarev V.M., Morozov V.N., Smirnova E.V.**



Opticheskie postoyannye prirodnykh i tekhnicheskikh sred. Spravochnik. Leningrad, Khimiya, 1984, 216 p. (rus)

11. *Fiziko-khimicheskie i mekhanicheskie svoystva*

aerozolej i pyli vydelyaemykh osnovnym oborudovaniem tsementnykh zavodov (spravochnye materialy).

Pod obshchej redaktsiej G.I. Vodolazskogo. NIPIOTSTROM. Novorossijsk, 1976, 112 p. (rus)

THE AUTHORS

PRIVALOV Vadim E.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

vaevpriv@yandex.ru

POLOVCHENKO Svetlana V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Polosveta@mail.ru

CHARTIY Pavel V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

pvc-60@yandex.ru