

УДК 621.373.826+504.064.37

С.В. Половченко, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин

*Новороссийский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО Кубанский
государственный технологический университет, Россия,
353900, г. Новороссийск, ул. Карла Маркса, 20, E-mail: polosveta@mail.ru*

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ

АННОТАЦИЯ

В продолжении исследований авторов по зондированию аэрозольных потоков лазерными методами получено, что зондирование потоков на нескольких длинах волн интегральными методами позволяет измерять не только концентрацию частиц, но и оценивать распределение частиц по размерам.

Поэтому целью настоящей работы является разработка алгоритма восстановления функции распределения частиц по размерам по измеренным величинам оптической плотности потока на нескольких длинах волн лазерного излучения.

В статье предложен метод решения обратной задачи лазерного зондирования без использования интегральных уравнений, который может быть использован для создания аппаратуры непрерывного контроля размеров и концентрации аэрозольных частиц в реальных условиях промышленного производства. Этот метод основан на ослаблении лазерного излучения при ограниченном наборе длин волн зондирующего лазерного излучения. Было выполнено численное моделирование параметров аэрозольного потока, которое показало, что при штатной работе пылеулавливающего оборудования предприятия в определенной точке технологического процесса аэрозоль может быть описан некоторой функцией распределения частиц по размерам, зависящей от конечного числа параметров. После последней ступени пылеулавливающего оборудования – рукавного фильтра - функция распределения частиц по размерам описывается логарифмически-нормальным законом.

Для исследования зависимости оптических параметров исследуемых аэрозольных потоков была создана установка, реализующая возможность лазерного зондирования на нескольких длинах волн одновременно методом спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния. Исследован комплексный показатель преломления исследуемого вещества.

Таким образом, выявлена зависимость между параметрами логарифмически-нормального распределения и значениями среднего объемно-поверхностного диаметра, полученного в результате многоволнового лазерного зондирования, что позволило разработать и реализовать алгоритм восстановления функции распределения частиц по размерам.

**ПОТОК, АЭРОЗОЛЬ, АЭРОДИСПЕРСНЫЙ ПОТОК, ЛАЗЕР, РАЗМЕР ЧАСТИЦ,
СРЕДНИЙ ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНЫЙ ДИАМЕТР ЧАСТИЦ**

ВВЕДЕНИЕ

Производство цемента и других строительных материалов является источником загрязнения атмосферы пылью. Основные технологические процессы этих производств: механическая активация и химическая обработка полуфабрикатов и получаемых продуктов в потоках горячих газов всегда сопровождается выбросами пыли и других вредных веществ в атмосферу.

Для уменьшения количества пыли в отходящих газах в аспирационном воздухе используются различные пылеулавливающие установки. В соответствии с действующими правилами и нормативами для контроля работы подобных установок используется массовая концентрация частиц пыли. Согласно дополнению № 8 к ГН 2.1.6.1338-03 от 19.04.2010 «ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» [1] установлены предельно допустимые концентрации аэрозольных частиц в зависимости от их аэродинамического диаметра, так называемые PM₁, PM_{2.5} и PM₁₀. Экологический производственный контроль загрязнений атмосферы осуществляется в соответствии с действующим проектом предельно-допустимых выбросов. При этом периодичность контроля источников выбросов проводится импактными методами и с периодичностью, как правило, один раз в месяц или в квартал.

Поэтому по-прежнему актуальна задача разработки простых методов и надежной аппаратуры для непрерывного контроля размеров и концентрации аэрозольных частиц в реальных условиях промышленного производства.

Лазерные оптические методы на сегодняшний день являются одними из самых перспективных в дистанционном зондировании промышленных аэрозольных потоков. Поэтому целью настоящей работы является разработка алгоритма восстановления функции распределения частиц по размерам по измеренным величинам оптической плотности потока на нескольких длинах волн лазерного излучения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Широкий диапазон изменения измеряемых диаметров и концентраций аэрозольных частиц, необходимость восстановления функции распределения частиц по размерам в реальном времени непосредственно в аэрозольном потоке сужает выбор методов диагностики. Дифференциальные методы не нашли практического применения для измерения концентрации твердых частиц в реальном потоке полидисперсного цементного аэрозоля, так как они применимы лишь для небольшого диапазона измеряемых величин. Так как измерение параметров аэрозольных частиц предполагается непосредственно в газоходе, то лидарные методы измерения из-за ограниченных размеров газоходов и паразитного рассеяния назад от стенки газохода ограничивают их практическое применение. В связи с тем, что реальное производство цемента сопровождается низкой шумоизоляцией и повышенной вибрацией технологического оборудования, то неприменим и метод малых углов [2].

Известны методы лазерного зондирования аэродисперсных потоков [3], позволяющие измерять средние размеры аэрозольных частиц. Подобный метод прост в реализации, при правильно подобранных длинах волн зондирования есть возможность определять средний объемно-поверхностный диаметр (по разным источникам он может называться диаметр Заутера, эффективный диаметр).

Определение функции распределения частиц по размерам аэрозоля модифицированным методом спектральной прозрачности сводится к измерению спектральной оптической плотности дисперсной среды на нескольких длинах волн и расчету усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Частное экспериментально измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно частному

усредненных факторов эффективности ослабления, и представляет собой функцию среднего размера частиц [3]:

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

где τ_{λ} – спектральная оптическая плотность, $\bar{Q}(\delta_{32}, \lambda_i, m)$ – усредненный фактор эффективности ослабления, δ_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр, λ – длина волны зондирующего излучения, m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления определяется выражением

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

где Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц, δ – диаметр частиц, $f(\delta)$ – функция распределения частиц по размерам.

На рис. 1 приведен пример построенных зависимостей $F_{ij}(\delta_{32})$ на трех длинах волн. Нетрудно заметить, что объемно-поверхностный диаметр однозначно определяется, если его значение находится в интервале от 0.1 мкм до 1 мкм, что полностью перекрывает значения подобных диаметров для распределений мелкодисперсного аэрозоля, поступающего в атмосферу.

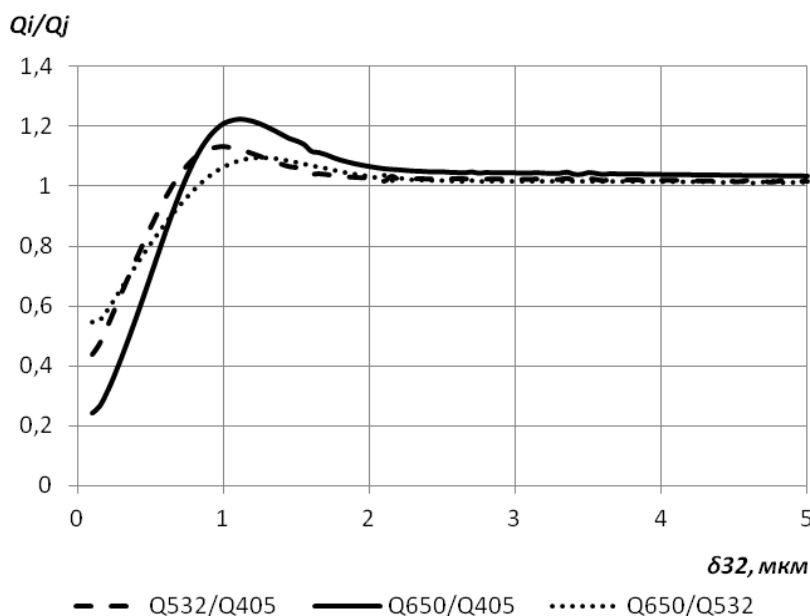


Рис. 1. Графики отношения зависимостей усредненных факторов эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

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

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda i} \rho_p \delta_{32}}{1,5lQ(\delta_{32}, \lambda, m)},$$

где ρ_p – плотность материала частиц; l – оптическая длина зондирования.

Диапазон измерений средних размеров частиц зависит от выбора длин волн зондирующего излучения. При априорном знании диапазона возможных средних размеров частиц, длины волн зондирующего излучения должны быть вблизи следующих значений:

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

где m – комплексный показатель преломления вещества аэрозольного материала.

Комплексный показатель преломления цемента был рассчитан по методике [4] на основании его химического состава и известных значений комплексных показателей преломления для входящих в него компонентов [5].

Химический состав цемента достаточно сложен и может очень сильно различаться в зависимости от применяемого сырья и способа производства клинкера. Основные составляющие цемента – это известь CaO, кремнезем SiO₂, оксид алюминия Al₂O₃ и гематит Fe₂O₃ [6]. Величина комплексного показателя преломления цементного порошка рассчитывалась как линейная комбинация спектров комплексных показателей преломления компонентов с учетом их массовых составляющих. В результате получен средний показатель преломления $m = 1.69 - 0,013i$. В силу возможного значительного варьирования процентного содержания составляющих цемента, комплексный показатель преломления цемента может несколько изменяться. Так как для аэрозоля с размерами менее 5 мкм этот фактор практически не оказывает влияния на значение коэффициента ослабления лазерного излучения, то фиксированное значение комплексного показателя преломления в виде найденного среднего значения не приведет к увеличению погрешности измерений и расчетов [7].

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 мкм до 0,51 мкм. Используя формулу (1), получаем, что длины волн лазерного излучения должны находиться вблизи границ промежутка 0,375 мкм — 0,513 мкм. Для исследования были выбраны три полупроводниковых лазера с длинами волн: 405 нм, 532 нм и 650 нм.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Оптическая схема измерителя ММСП (рис. 2) состоит из источников лазерного излучения l на трех длинах волн: 405, 532, 650 нм; фотоприемников излучения 11 , 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 светорассеяния (МИСР) под заданным углом θ [2]. В настоящей работе метод

МИСР использовался для регистрации момента окончания проветривания пылевого стенда, так как имеет большую в сравнении с ММСП чувствительность в диапазоне малых концентраций. Сигнал фотоприемника МИСР становится равным нулю только тогда, когда концентрация аэрозольных частиц в стенде приближается к нулю.

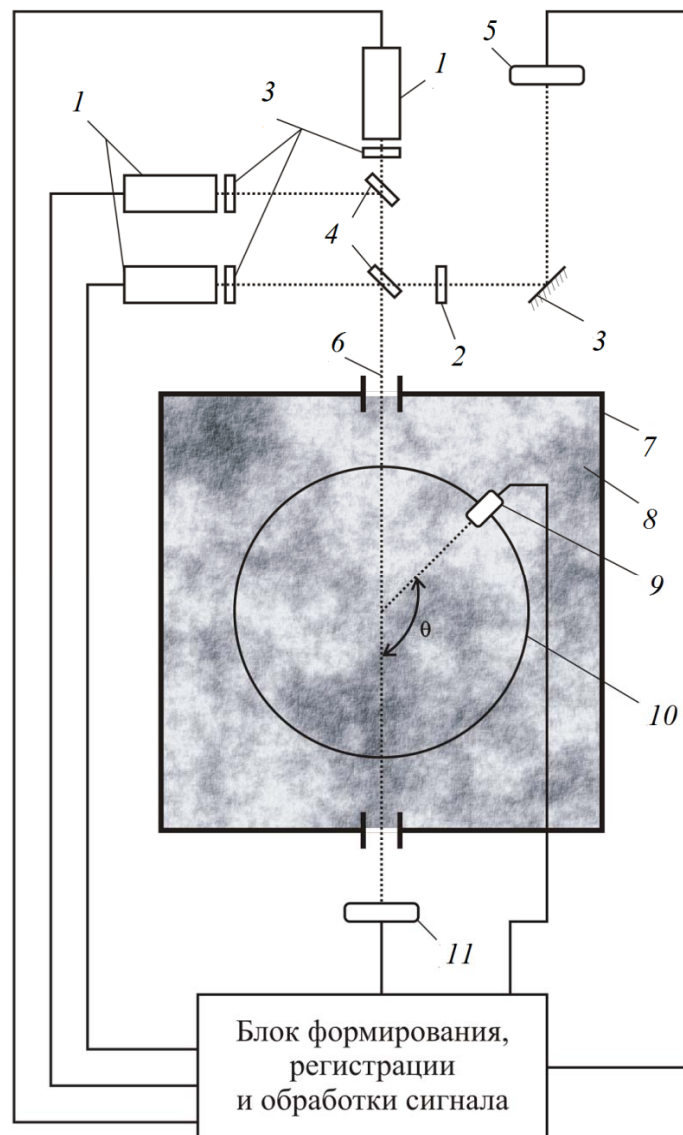


Рис. 2. Оптическая схема измерителя ММСП:
 1 – источник лазерного излучения; 2 – светофильтры; 3 – зеркала;
 4 – светоделительные стекла; 5 – опорный фотоприемник; 6 – лазерный пучок;
 7 – газоход; 8 – аэродисперсный поток; 9 – фотоприемник МИСР;
 10 – поворотный механизм МИСР; 11 – фотоприемник МСП

Структурная схема блока генерации и обработки сигнала измерителя ММСП (лабораторной установки) представлена на рис. 3.

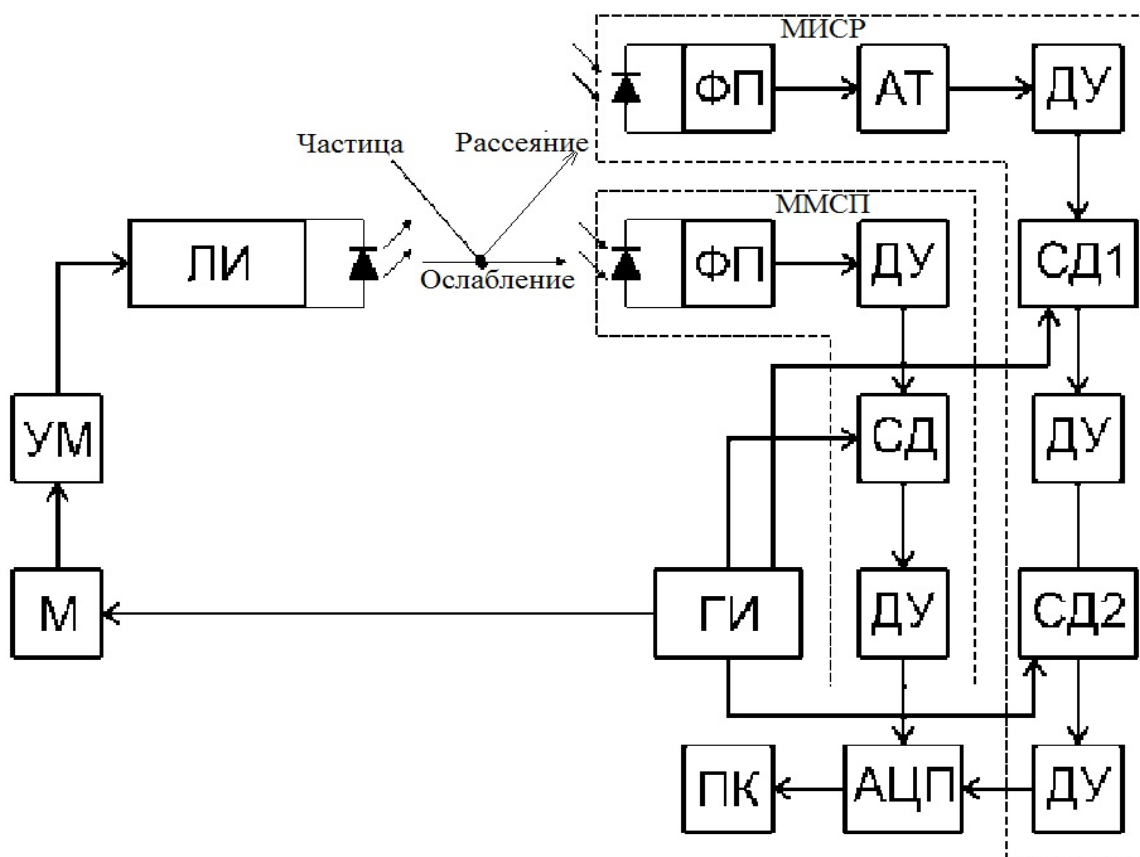


Рис. 3. Структурная схема блока генерации и обработки сигнала измерителя ММСР (лабораторной установки): ЛИ – источник лазерного излучения; УМ – усилитель мощности; М – модулятор; ФП – фотоприемники; ДУ – дифференциальные усилители; СД – синхронные детекторы; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; АТ – аттенюатор; ГИ – генератор импульсов

Измеритель ММСР работает следующим образом. Лазеры ЛИ генерируют излучение на трех длинах волн (405, 532, 650 нм) с частотой 5 кГц, заданной генератором импульсов (ГИ). Лазерные лучи проходят через светоделительные стекла; при этом часть излучения, отразившись от зеркала, попадает на опорный фотоприемник. Для выделения нужных длин волн на пути луча установлены держатели для светофильтров. Излучение, прошедшее через светоделительные пластины, попадает через металлическую трубку, установленную в отверстии смотрового окна, и, пройдя через газоход, ослабляется аэрозольным потоком. Ослабленное излучение регистрируется фотоприемником ФП. Сигналы с фотоприемника, пройдя через дифференциальный усилитель (ДУ) и синхронный детектор (СД), снова усиливаются дифференциальным усилителем (ДУ). Сигнал со второго дифференциального усилителя подается на АЦП, который подключен к персональному компьютеру (ПК). Фотоприемник МИСР путем вращения маховика изменяет угол, под которым принимает рассеянное излучение. При этом указатель перемещается, поднимая или опуская противовес, соединенный с указателем при помощи троса, перекинутого через поворотное колесо (оно 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 воздухопроводке. Это сделано для того, чтобы не допустить выдувание аэрозоля за пределы стенда.

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

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 среднего арифметического, среднего квадратического, среднего массового и среднего объемно-поверхностного диаметра. Между средним объемно-поверхностным диаметром, который измеряется лазерными методами и остальными средними диаметрами установлены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации не менее 0.85.

Аппроксимируя полученные функции распределения частиц логарифмически-нормальным законом, определили его параметры.

$$f(x) = A \frac{1}{x\sqrt{2\pi} \ln \sigma_p} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_p)^2}{2(\ln \sigma_p)^2}\right),$$

где $\ln x_p$ — математическое ожидание логарифма размеров частиц (x_p — **средний геометрический диаметр**), $\ln \sigma_p$ — среднее квадратическое отклонение логарифма размеров (σ_p — **стандартное геометрическое отклонение**)

Коэффициенты детерминации такой аппроксимации составили не менее 0,87. Между параметрами этих законов и средним объемно-поверхностным диаметром выявлена функциональная зависимость (рис. 4 и рис. 5).

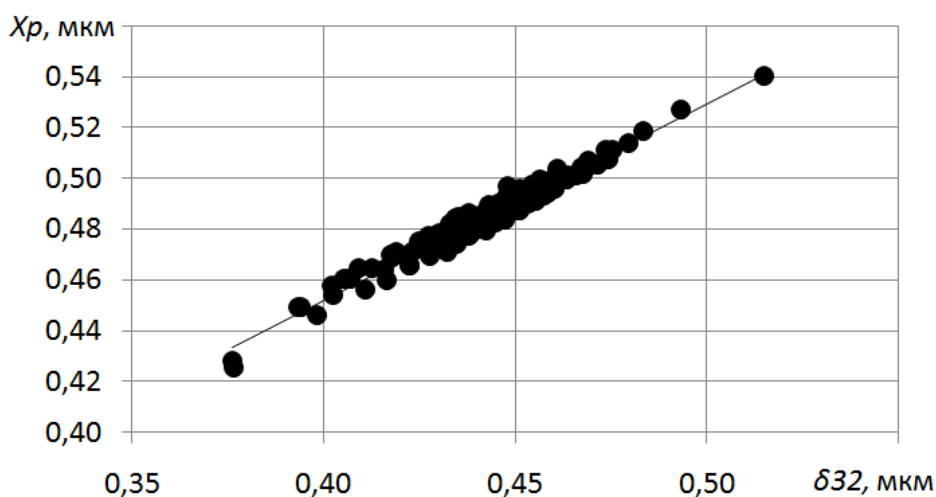


Рис. 4. Зависимость среднего геометрического диаметра x_p от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

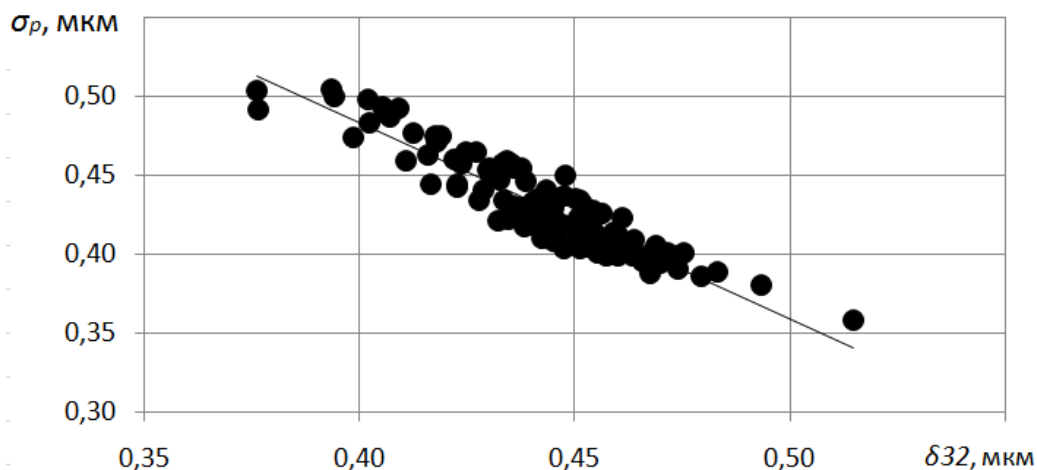


Рис. 5. Зависимость стандартного геометрического отклонения σ_p от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

Используя полученные регрессионные зависимости, описывающие функциональные связи параметров логарифмически-нормального закона со средним объемно-поверхностным диаметром были восстановлены функции распределения для всех 120 образцов. Коэффициент детерминации между восстановленными и исходными данными составил не менее 0,74. Пример одного из восстановленных распределений приведен на рис. 6.

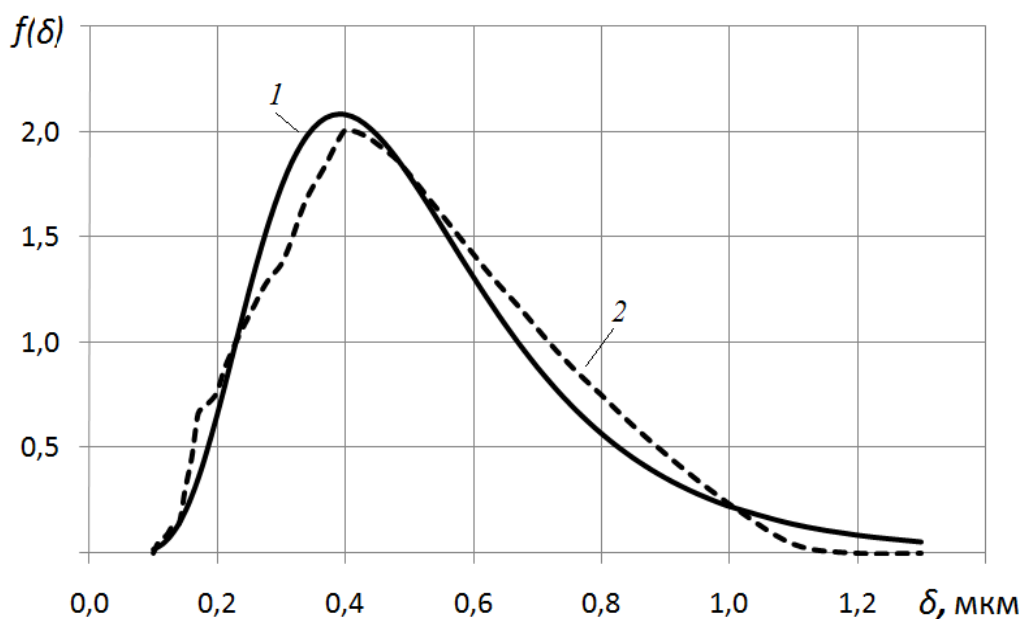


Рис. 6. Исходные данные (пунктир) и результаты восстановления (сплошная) функции распределения частиц по размерам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявлена зависимость между параметрами логарифмически-нормального распределения и значениями среднего объемно-поверхностного диаметра, полученного в результате многоволнового лазерного зондирования, что позволило разработать и реализовать алгоритм восстановления функции распределения частиц по размерам.

Восстановление функции распределения дает возможность адекватно оценивать распространение аэрозольных частиц и контролировать предельно допустимые концентрации PM1 и PM2,5 в режиме реального времени.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338-03 от 19.04.2010 «ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»
2. **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.
3. 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.
4. **Ивлев Л.С., Андреев С.Д.** Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1986. 360 с.
5. **Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В.** Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
6. Физико-химические и механические свойства аэрозолей и пыли выделяемых основным оборудованием цементных заводов (справочные материалы) /Под общей редакцией Г.И. Водолазского/ НИПИОТСТРОМ. Новороссийск, 1976. 112 с.
7. **Половченко С.В., Семенычева О.В., Чартий П.В.** Моделирование показателя преломления цемента для задач лазерного зондирования аэродисперсных потоков//Труды XXI Международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии – 2013» (Новороссийск, 2013). – Новороссийск, 2013. – С.90
8. **Privalov V.E., Charty P.V., Shemanin V.G.** Optical properties of the poydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5447, pp. 251-259.

S.V. Polovchenko., P.V. Charty, V.G. Shemanin

*Novorossiysk Polytechnic Institute, Kuban State Technological University, Russia
353900, Novorossiysk, st. Karl Marx, 20, e-mail: polosveta@mail.ru*

THE RECONSTRUCTION ALGORITHM OF THE PARTICLES SIZE DISTRIBUTION FUNCTION BY THE RESULTS OF THE AEROSOL FLOWS MULTI WAVES LASER SENSING

Throughout the authors studies of the aerosol flows sensing by the laser methods it has been resulted that these flows sensing at the laser radiation several wavelengths by the laser integrated methods allows to measure not only the particles concentration value, but also to estimate particles size distribution.

Therefore this work purpose is the development of the reconstruction algorithm for the particles size distribution function by the measured values of the flow optical density at the several laser radiation wavelengths.

It has been suggested the method of the inverse task solution of the laser sensing without of the integrated equations using that can be used for creation of the continuous control equipment for the aerosol particles size and concentration values in the real conditions of the industrial production. This method is based on the laser radiation weakening at a limited set of the probing laser radiation wavelengths. The aerosol flow parameters computer simulation has been fulfilled which showed that these aerosol can be described by some particles size distribution function depending on the limited number of parameters during the regular work of the enterprise dust cleaning equipment in a certain point of technological process. The particles size distribution

function was described by the logarithmic normal law after the last step of the dust cleaning equipment – the fiber filter.

The installation realizing the possibility of the laser sensing on several wavelengths simultaneously by the spectral transparency and integrated light scattering methods was created for these aerosol flows optical parameters dependence studies. The complex refractive index of the studied particles substance has been determined.

Thus, the logarithmic normal distribution parameters versus the average volume surface diameter values dependence received as a result of multi waves laser sensing has been appeared that allowed to develop and realize the reconstruction algorithm for the particles distribution function.

FLOW, AEROSOL, LASER, PARTICLES SIZE.