

Восстановление функции распределения частиц по размерам с использованием методов лазерного зондирования

С.В. Половченко, ст. преподаватель, доцент

П.В. Чартий, канд. физ.-мат. наук

доцент, Новороссийский политехнический институт (филиал) ФГБОУ Кубанский государственный технологический университет, г. Новороссийск

email: polosveta@mail.ru

Ключевые слова:

экологический мониторинг, функция распределения частиц по размерам, лазерное зондирование, лазеры.

В статье предложен метод решения обратной задачи лазерного зондирования без использования интегральных уравнений, который может быть использован для создания аппаратуры непрерывного контроля размера и концентрации аэрозольных частиц в реальных условиях промышленного производства. Этот метод основан на ослаблении лазерного излучения при ограниченном наборе длин волн зондирующего лазерного излучения. 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 создана установка, реализующая возможность лазерного зондирования на разной длине волн одновременно методом спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния. Исследован комплексный показатель преломления исследуемого вещества. Выявлена зависимость между параметрами функции распределения логарифмически-нормального распределения и значениями среднего объемно-поверхностного диаметра, полученного в результате зондирования. Предложенный метод решения задачи может быть развит для обнаружения отказов пылегазоочистного оборудования.

1. Введение

При производстве цемента и других строительных материалов в атмосферу выбрасывается пыль. Основные технологические процессы этих производств — механическая активация и химическая обработка полуфабрикатов и получаемых продуктов в потоках горячих газов — всегда сопровождаются 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 исполь-

зуется 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] установлена предельно допустимая концентрация аэрозольных частиц в зависимости от их аэродинамического диаметра — PM₁, PM_{2.5} и PM₁₀. Экологический производственный контроль загрязнений атмосферы осуществляется в соответствии с действующим проектом предельно-допустимых выбросов. При этом контроль источников выбросов проводится импактными методами и с периодичностью, как правило, один раз в месяц или в квартал.

Остается актуальной задача разработать простые методы и надежную аппаратуру для непрерывного контроля размера и концентрации аэрозольных частиц в реальных условиях промышленного производства. Лазерные оптические методы в настоящее время относятся к числу наиболее перспективных при дистанционном зондировании промышленных аэрозольных потоков. Цель настоящей работы — реализовать метод лазерного зондирования, который позволяет восстановить функцию распределения частиц по значению среднего диаметра.

2. Описание статистической микрофизической аэрозольной модели

Регрессионный метод решения обратных задач предполагает, что искомые микрофизические параметры аэрозоля могут быть найдены при помощи некоторой статистической функции от измеряемых оптических характеристик аэрозоля, что позволяет избежать решения некорректных обратных задач. Возможность решения подобной задачи во многом зависит от априорной информации о микрофизических и оптических характеристиках аэрозоля.

В качестве объекта исследования использован аэрозоль, получаемый из цементного порошка. При анализе технологии производства цемента установлено, что в результате аэродинамической классификации (классификаторами выступают пылегазоочистное оборудование) частицы аэрозоля смещаются в область малых размеров. Представительная выборка из 120 массовых функций распределения частиц по размерам исходного цемента, полученная на разных предприятиях, послужила основой моделируемого потока. Моделирование потока производилось на основе фракционной эффективности классификаторов и разработанных ранее балансовых соотношений [2]. Численное моделирование трансформации потока показало, что при штатной работе предприятия в определенной точке технологического процесса аэрозоль может быть описан некоторой функцией распределения частиц по размерам [3].

При изучении свойств дисперсных материалов, а также при разработке способов их получения и использования часто необходимо выявить закономерности распределения частиц по размерам. Наличие таких закономерностей в определенных классах порошков, позволяющих аппроксимировать кривые распределения математическим выражением, отмечалось неоднократно на основании многочисленных экспериментальных данных. Аналитическая форма записи кривых распределения практически удобнее графической и облегчает экстраполирование распределения, вычисление его средних характеристик. Стремление выявить закономерности распределения

обусловлено также необходимостью в ряде случаев описать дисперсность порошков ограниченным набором параметров [4].

Аппроксимирование различными дифференциальными функциями распределения частиц по размерам выявило, что наиболее полно аэрозоль, поступающий в атмосферу, описывается логарифмически-нормальным законом [5]. Он имеет следующий вид:

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

где: $\ln x_p$ — математическое ожидание логарифма размеров частиц (x_p — средний геометрический диаметр); $\ln \sigma_p$ — среднеквадратическое отклонение логарифма размеров (σ_p — стандартное геометрическое отклонение) [4].

Таким образом, на основе значений, полученных на лабораторном аттестованном измерителе размеров аэрозольных частиц MasterSizer 2000, и в результате проведенного моделирования сформирована база функций распределения размеров частиц на всех стадиях технологического процесса.

3. Моделирование экспериментальных потоков

Чтобы повысить точность решения поставленной в настоящей работе задачи, необходимо провести метрологические исследования объекта измерения. (Такие исследования аэродисперсных потоков в промышленных условиях практически невозможны или чрезвычайно затруднены.) Для этого использован пылевой стенд, позволяющий экспериментально моделировать аэродисперсные потоки [6].

В стенд путем импульсной инъекции подается порция аэрозольного материала в поток. За счет временной релаксации концентрации аэрозоля меняется функция распределения частиц по размерам. Концентрация рассчитывается по экспериментальной зависимости:

$$C = C_0 e^{ad^2 t (bv^2 + c)/\mu},$$

где: a, b, c — константы, зависящие от физико-химических свойств частиц, геометрических параметров стенда; d — диаметр частиц; t — время релаксации; μ — вязкость дисперсионной среды потока; v — скорость потока.

Посекундное сравнение теоретических графиков распределения частиц по размерам с полученными в результате эксперимента модельными показало хорошее согласие, которое выражено коэффициентом детерминации не менее 0,97 на выходе потока в

атмосферу. Это позволяет предполагать, что данный аппарат позволяет создавать воспроизводимые аэрозольные потоки с управляемыми параметрами [7].

4. Методы исследования аэрозольных потоков

Широкий диапазон изменения измеряемых диаметров и концентрации 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 измерять параметры 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, неприменим и метод малых углов [8].

Известны методы лазерного зондирования аэродисперсных потоков, позволяющие измерять средние размеры аэрозольных частиц [9]. Подобный метод прост в реализации, при правильно подобранных длинах волн зондирования есть возможность определять средний объемно-поверхностный диаметр (в разных источниках 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 разной длине 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 [9]:

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

где: τ_{λ} — спектральная оптическая плотность; $\bar{Q}(\delta_{32}, \lambda, m)$ — 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 построенной зависимости $F_{ij}(\delta_{32})$ на трех значениях длины 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 распределения мелкодисперсного аэрозоля, поступающего в атмосферу.

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

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

где: ρ_p — плотность материала частиц; l — оптическая длина зондирования.

Диапазон измерения среднего размера частиц зависит от выбора длины волн зондирующего излучения. При априорном знании диапазона возможных средних размеров частиц значения длины волн зондирующего излучения должны быть близки к следующим:

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

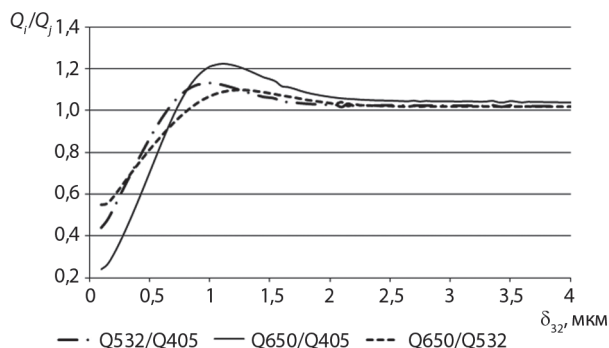


Рис. 1. Зависимость усредненных факторов эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

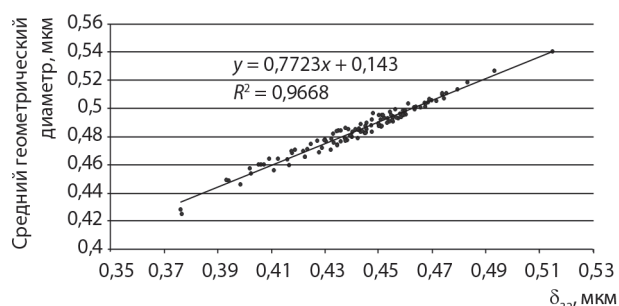


Рис. 2. Зависимость среднегеометрического диаметра x_p от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

где m — комплексный показатель преломления вещества аэрозольного материала.

Комплексный показатель преломления цемента рассчитан по методике, предложенной в [10], на основании его химического состава и известных значений комплексных показателей преломления для входящих в него компонентов [11]. Химический состав цемента достаточно сложный и может очень различаться в зависимости от применяемого сырья и способа производства клинкера. Основные составляющие цемента — известь CaO , кремнезем SiO_2 , оксид алюминия Al_2O_3 и гематит Fe_2O_3 [12]. 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 размером менее 5 мкм этот фактор практически не оказывает влияния на значение коэффициента ослабления лазерного излучения, фиксированное значение комплексного показателя преломления в виде найденного

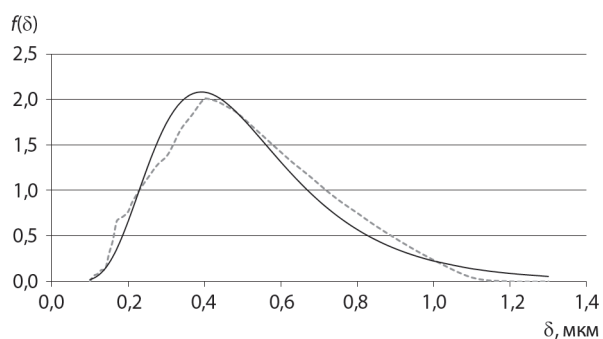


Рис. 4. Исходные данные (пунктир) и результаты восстановления (сплошная) функции распределения частиц по размерам

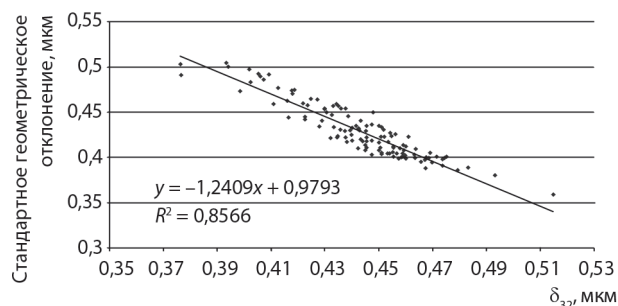


Рис. 3. Зависимость стандартного геометрического отклонения σ от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32}

среднего значения не приведет к увеличению погрешности измерений и расчетов [13].

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 значения длины волн лазерного излучения должны находиться вблизи границ диапазона 0,375–0,513 мкм. Для исследования были выбраны три полупроводниковых лазера с длиной волн 405, 532 и 650 нм.

5. Регрессионные зависимости для восстановления функции распределения частиц по размерам

В результате численного моделирования трансформации функций распределения частиц по размерам в потоке получены функции распределения частиц на выходе в атмосферу. Для каждой полученной функции распределения выполнены расчеты среднеарифметического, среднеквадратического, 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, определены его параметры. Коэффициенты детерминации такой аппроксимации составили не менее 0,87. Между параметрами этих законов и средним объемно-поверхностным диаметром выявлена функциональная зависимость (рис. 2 и 3).

Используя полученные регрессионные зависимости, описывающие функциональные связи параметров логарифмически-нормального закона со средним объемно-поверхностным диаметром, восстановлены функции распределения для всех 120 об-

разцов. Коэффициент детерминации между восстановленными и исходными данными составил не менее 0,74. Пример одного из восстановленных распределений приведен на рис. 4.

Заключение

Результаты работы показывают, что по измеренному методами лазерного зондирования на основе теории рассеяния Ми среднему объемно-поверхностному диаметру функции распределения частиц

по размерам на выходе в атмосферу можно восстанавливать саму функцию распределения частиц по размерам. Восстановление функции распределения позволяет адекватно оценивать распространение аэрозольных частиц и контролировать предельно допустимую концентрацию РМ1 и РМ2,5 в режиме реального времени.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338–03 от 19.04.2010 «ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
2. Чартий П.В., Черетун О.В., Шеманин В.Г. Повышение точности решения обратной задачи лазерного зондирования аэродисперсных потоков за счет корреляции средних размеров частиц и распределения частиц по размерам в области малых и больших размеров // Лазеры. Измерения. Информация / Сборник докладов 19-ой Междунар. конф. Санкт-Петербург, 7–10 июня 2009. — СПб.: СПбГТУ, 2009. Т. 1. С. 287–298.
3. Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В. и др. Идентификация спектров размеров промышленных аэрозолей лазерными методами зондирования // 20-я международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация» / Сборник докладов. Санкт-Петербург, июнь, 2010. — СПб.: СПбГПУ, 2010. — С. 145–160
4. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. — М.: Издательство литературы по строительству, 1972.
5. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Доклады Академии Наук СССР. — 1941. Т. XXXI. № 2.
6. Половченко С. В., Роговский В. В., Чартий П. В. и др. Лазерная диагностика релаксационных аэродисперсных потоков // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. № 2. — С.41–43
7. Веденин Е.И., Половченко С.В., Роговский В.В. и др. Исследование времени стабилизации модельных аэродисперсных потоков после импульсной инъекции аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы /
8. 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.
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. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. — Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1986.
11. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред / Справочник. — Л.: Химия, 1984.
12. Физико-химические и механические свойства аэрозолей и пыли выделяемых основным оборудованием цементных заводов (справочные материалы) / Под общей редакцией Г.И. Водолазского. НИПИОТСТРОМ. — Новороссийск, 1976.
13. 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. — С. 90.

REFERENCES

1. *Dopolnenie №8 k GN 2.1.6.1338–03 ot 19.04.2010 «PDK zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh naseleennykh mest»* [Supplement to №8 GN 2.1.6.1338–03 from 19.04.2010 "MPC pollutants in the ambient air of residential areas"].
2. Chartiy P.V., Cheretun O.V., Shemanin V.G. Increasing the accuracy of the solution of the inverse problem of laser sensing aerodisperse streams by correlating the average particle size and particle size distribution in the range of small and large sizes. *Lazery. Izmereniya. Informatsiya: Sbornik dokladov 19-oy Mezhdunar. konf. – g. Sankt-Peterburg, 7–10 iyunya 2009* [Lasers. Measurements. Information: Proceedings of the 19th Intern. Conf. — St. Petersburg, June 7–10, 2009]. St. Petersburg, SPbGTU Publ., 2009, V. 1, pp. 287–298. (in Russian)
3. Polovchenko S.V., Rogovskiy V.V., Chartiy P.V. Identification of the spectra of the size of industrial aerosols sensing laser methods. *20 mezhdunarodnaya konferentsiya «Lazery. Izmereniya. Informatsiya»: sbornik dokladov.* (Sankt-Pe-

- terburg, iyun', 2010) [20 International Conference "Lasers. Measurements. Information": a collection of papers]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2010, pp. 145–160 (in Russian)
4. Khodakov G.S. *Tonkoe izmel'chenie stroitel'nykh materialov* [Fine grinding of construction materials]. Moscow, Publishing House of construction literature, 1972
 5. Kolmogorov A.N. On the log-normal distribution of particle sizes in crushing. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1941, V.XXXI, I.2. (in Russian)
 6. Polovchenko S.V., Rogovskiy V.V., Chartiy P.V. Laser diagnostics relaxation aerodisperse streams. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Gazette of the Volga region]. 2013, I. 2, pp.41–43. (in Russian)
 7. Vedenin E.I., Polovchenko S.V., Rogovskiy V.V. Issledovanie vremeni stabilizatsii model'nykh aerodispersnykh potokov posle impul'snoy inzheksii aerozolya [Study of the stabilization time model aerodisperse streams after pulsed injection of aerosol]. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery: sbornik dokladov XIX Mezhdunarodnogo simpoziuma (Altay, g.Barnaul, 1–6 iyulya 2013)* [Atmospheric and Oceanic Optics. Atmospheric Physics: summary reports of the XIX International Symposium (Altai, Bratislava, 1–6 July 2013)]. Tomsk, IAO SO RAN Publ., 2013, pp.228–231
 8. Privalov V.E., Rybalko A.V., Chartiy P.V., Shemanin V.G. O vliyani shuma i vibratsii tsementnogo oborudovaniya na rabotu lazernogo izmeritelya kontsentratsii chastits [On the influence of noise and vibration cement equipment to work the laser particle concentration meter]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2007, V. 77, I.3, pp.62–65.
 9. Arkhipov V.A., Akhmadeev I.R., Bondarchuk S.S., Vorozhtsov B.I., Pavlenko A.A., Potapov M.G. Modifitsirovannyi metod spektral'noy prozrachnosti izmereniya dispersnosti aerozoley [Modified method of spectral transmittance measurement of dispersion of aerosols]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2007, V. 20, I. 1, pp. 48–52.
 10. Ivlev L.S., Andreev S.D. Opticheskie svoystva atmosferykh aerozoley [Optical properties of atmospheric aerosols]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1986. 360 p.
 11. Zolotarev V.M., Morozov V.N., Smirnova E.V. *Opticheskie postoyannye prirodnykh i tekhnicheskikh sred. Spravochnik* [The optical constants of natural and technical environments. Handbook]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 216 p.
 12. Vodolazskiy G.I. *Fiziko-khimicheskie i mekhanicheskie svoystva aerozoley i pyli vydelyaemykh osnovnym oborudovaniem tsementnykh zavodov (spravochnye materialy)* [Physico-chemical and mechanical properties of aerosols and dust emissions main equipment of cement plants (References)]. NIPIOTSTROM. Novorossiysk, 1976. 112 s.
 13. Polovchenko S.V., Semenycheva O.V., Chartiy P.V. Modelirovanie pokazatelya prelomleniya tsementa dlya zadach lazernogo zondirovaniya aerodispersnykh potokov [Simulation of the refractive index of cement for laser sensing aerodisperse streams]. *Trudy XXI Mezhdunarodnoy konferentsii «Lazerno-informatsionnye tekhnologii v meditsine, biologii i geologii – 2013» (Novorossiysk, 2013)* [Proceedings XXI International Conference "Laser and Information Technologies in Medicine, Biology and Environmental Geoscience — 2013" (Novorossiysk, 2013)]. Novorossiysk, 2013, p.90.

Reconstruction of Function of Particles Distribution by Sizes with Laser Sensing Method Use

S.V. Polovchenko, Senior Lecturer, Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of FSBEI Kuban State Technological University, Novorossiysk

P.V. Chartiy, Ph.D. of Physics and Mathematics, Associate Professor, Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of FSBEI Kuban State Technological University, Novorossiysk

A laser sensing inverse task solution method without using of integral equations has been suggested in this paper and it can be used for aerosol particles' sizes and concentration monitoring equipment creation for the real practice of the industrial production. This method is based on the laser radiation intensity weakening at a limited set of the probing laser radiation wavelengths. The computer simulation of aerosol flow parameters has been fulfilled and its results showed that during the regular operation of enterprise's dust cleaner equipment at the certain point of the technological process the aerosol can be described by a function of particles distribution by sizes, and this function depends on finite number of parameters. The particles' sizes distribution function is described by the logarithmic normal law after a fabric filter as a last step of the dust cleaner equipment. The laboratory setup realizing the laser sensing at the several laser radiation wavelengths possibilities simultaneously by the spectral transparency and integral light scattering methods for investigation of studied aerosol flows' optical parameters dependence has been created. A complex refractive index of the studied substance has been investigated. The dependence between the logarithmic normal distribution function parameters and the average volume - surface diameter values received as a result of the sensing has been revealed. The suggested method of the inverse task solution can be developed for the dust gas cleaning equipment refusals detection.

Keywords: environmental monitoring, function of particles distribution by sizes, laser sensing, lasers