

УДК 621.373.826: 504.064.37

Е.И. Веденин, С.В. Половченко, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин

*Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Россия, 353900, Новороссийск, ул. Карла Маркса, 21,
E-mail: vshemanin@mail.ru*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МНОГОВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

На основании анализа более 100 экспериментальных функций распределения аэрозольных частиц были восстановлены функции распределения частиц при прохождении потока на различных этапах технологического процесса по результатам аэродинамической классификации. Используя интегральный метод светорассеяния и модифицированный метод спектральной прозрачности, определены длины волн и найдены углы рассеяния наиболее чувствительные к изменению спектров размеров частиц. Получены исходные параметры для построения аэрозольного лидара на базе полупроводниковых лазеров. Определен диапазон изменения спектров размеров частиц промышленных аэрозолей, в котором возможно решение обратных задач на выбранных длинах волн лазерного излучения.

ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ АЭРОЗОЛИ, ЛИДАР, ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Аэродисперсные потоки широко распространены в природе и технике. При производстве, связанном с измельчением различных материалов, например, помоле цементного клинкера при производстве цемента, образуются аэродисперсные потоки, которые характеризуются значительными полидисперсностью и концентрациями аэрозоля. Размер и концентрация частиц в таких потоках являются важнейшими параметрами, определяющими технические и экологические характеристики различных устройств. Для достижения оптимальных эффективности и производительности пылеулавливающих установок необходим непрерывный контроль их работы с применением наиболее совершенных методик и приборов при проведении пылегазовых замеров. На сегодняшний день существует большое разнообразие методов диагностики промышленных аэродисперсных потоков, связанных с отбором пробы и без отбора пробы. Наиболее перспективными являются лазерные методы диагностики, которые относятся к бесконтактным методам.

Поэтому целью настоящей работы является исследование параметров аэрозоля в различных точках по ходу аэродисперсного потока, выбор оптимального метода контроля этих параметров, восстановление функции распределения частиц по размерам в потоке на основе многоволнового лазерного зондирования.

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОТОКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЕГО ЧЕРЕЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Рассмотрим технологическую схему измельчения цементного клинкера: механическая активация клинкера происходит во вращающихся трубных мельницах, в который для повышения эффективности подается аспирационный воздух. Аспирационный воздух, увлекая за собой измельченный материал, проходит последовательно пылеулавливающие установки. При прохождении каждой следующей ступени очистки более крупные частицы оседают как готовый цемент, в атмосферу поступает менее 0,001% аэрозольных частиц по массе.

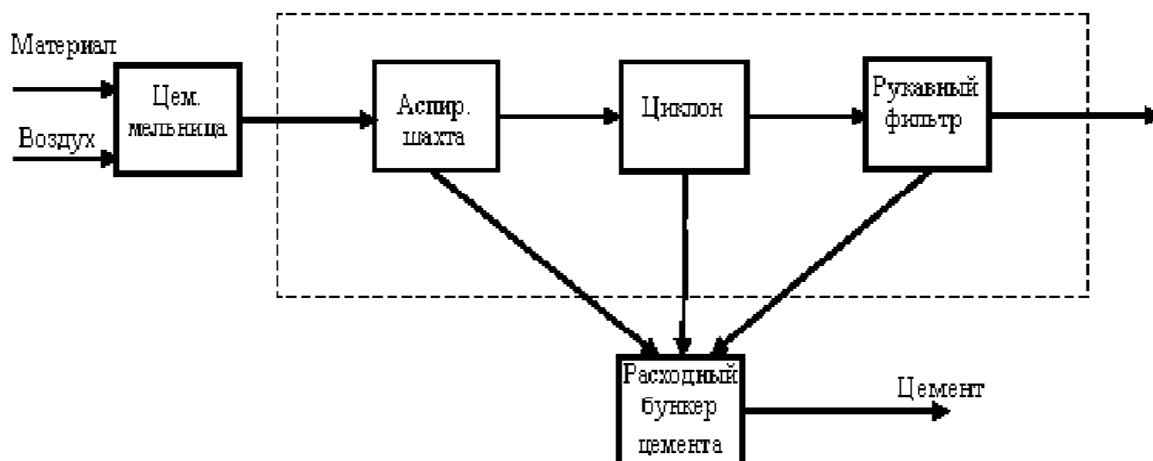


Рис. 1. Схема аэродинамической классификации измельчаемого материала

Ранее авторами на основании балансовых соотношений были рассчитаны фракционные эффективности аэродинамических классификаторов (циклона и рукавного фильтра) [1]. Используя полученные соотношения и 120 функций распределения размеров частиц готового продукта, были восстановлены функции распределения размеров частиц при прохождении каждой пылеулавливающей установки, для чего была составлена математическая модель, реализованная на языке программирования VBA.

Моделирование трансформации функции распределения

Содержание частиц различных размеров в полидисперсной системе полностью определяется заданием её дифференциальной функции счетного $f(x)$ или массового $g(x)$ распределения, где x - параметр, характеризующий размер индивидуальной частицы. Традиционно в промышленности технологи используют массовую функцию распределения, а при использовании теории Ми счетная функция распределения, поэтому для вычисления некоторых параметров аэрозоля необходим переход от одного вида распределения к другому.

Итак, имея в распоряжении дифференциальные функции массового распределения цементного аэрозоля по диаметрам $g_1(D)$ на входе первого классификатора считаем функцию распределения на выходе по формуле

$$g_2(D) = \frac{g_1(D) \cdot (1 - \eta_{\text{ц}}(D))}{\int_0^{\infty} g_1(D) \cdot (1 - \eta_{\text{ц}}(D)) dD}$$

где $\eta_{ц}(D)$ – парциальная эффективность первого классификатора (циклона), определяемая из соотношения

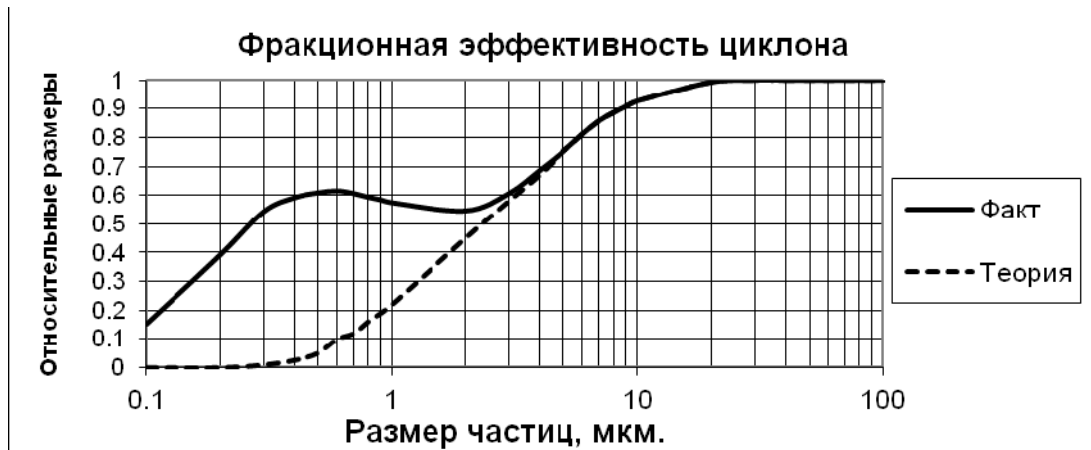


Рис. 2. Парциальная (фракционная) эффективность первого классификатора (циклон)

Функцию распределения уловленного в первом классификаторе аэрозоля определяем как разность входящего и выходящего из него аэрозоля:

$$g_1(D) = \frac{g_2(D) - g_3(D)}{\int_0^{\infty} (g_2(D) - g_3(D)) dD}$$

Выход первого классификатора считаем как вход второго, и определяем функцию распределения на выходе последней ступени пылеулавливания

$$g_2(D) = \frac{g_3(D) \cdot (1 - \eta_{рф}(D))}{\int_0^{\infty} g_3(D) \cdot (1 - \eta_{рф}(D)) dD}$$

где парциальная эффективность второго классификатора (рукавный фильтр), определяемая из соотношения

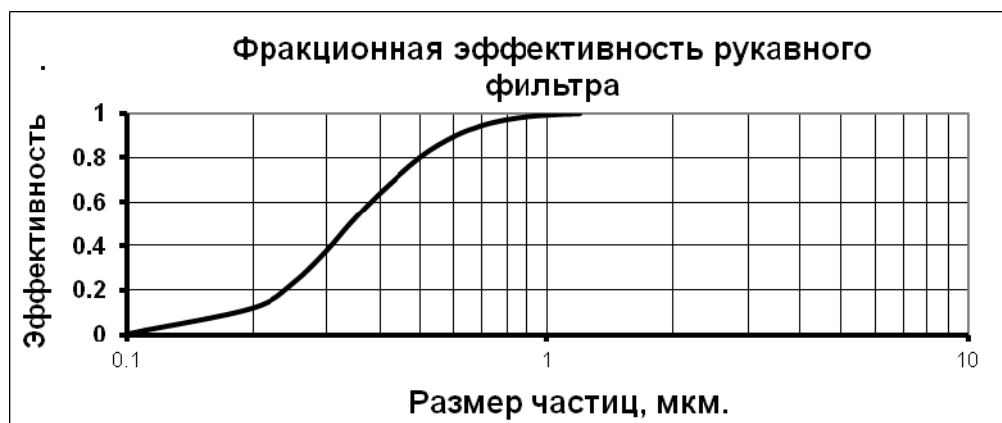


Рис. 3. Парциальная (фракционная) эффективность второго классификатора (рукавный фильтр)

Функцию распределения уловленного в втором классификаторе аэрозоля находим как разность функции распределения на входе и выходе соответствующей установки

$$g_4(D) = \frac{g_1(D) - g_2(D)}{\int_0^{\infty} (g_1(D) - g_2(D)) dD}$$

По нормированным дифференциальным функциям массового распределения находим интегральные функции распределения и, исходя из соотношения $G(D_m) = 0,5$, определяем массовый медианный диаметр для каждого распределения. Так как планируется использовать метод спектральной прозрачности, то для его реализации используем средний объемно-поверхностный диаметр, что приводит к необходимости перехода от функции массового распределения к дифференциальной функции счетного распределения $f(D)$.

Согласно [2], переход от счетного к массовому распределению имеет вид

$$g(D) = \frac{m(D)}{\bar{m}} f(D),$$

где $m(D)$ – масса частицы с диаметром D , \bar{m} – средняя (арифметическая) масса частиц аэрозоля. Предполагая, что частицы сферической формы приходим к соотношению

$$f(D) = \frac{\bar{m}}{m(D)} g(D) = \frac{\frac{1}{6} \pi \rho D_0^3}{\frac{1}{6} \pi \rho D^3} g(D) = \frac{D_0^3}{D^3} g(D),$$

где D_0 – мода соответствующего массового распределения.

По полученным функциям счетного распределения находим средний объемно-поверхностный диаметр

$$D_{32} = \frac{\int_0^\infty D^3 f(D) dD}{\int_0^\infty D^2 f(D) dD}.$$

В настоящее время с целью унификации природоохранных требований и норм, получивших широкое применение в развитых странах, в Российской Федерации были приняты новые санитарно-гигиенические нормативы к содержанию мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере [3]. Необходимость определения концентрации частиц в выбросах в атмосферу с аэродинамическим диаметром $PM_{2,5}$ и PM_{10} (концентрация фракции частиц с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм и менее 10 мкм) потребовала добавить в программу функцию определения в аэрозолях доли частиц соответствующего диаметра.

В результате был получен банк из 120 проанализированных спектров размеров частиц в виде

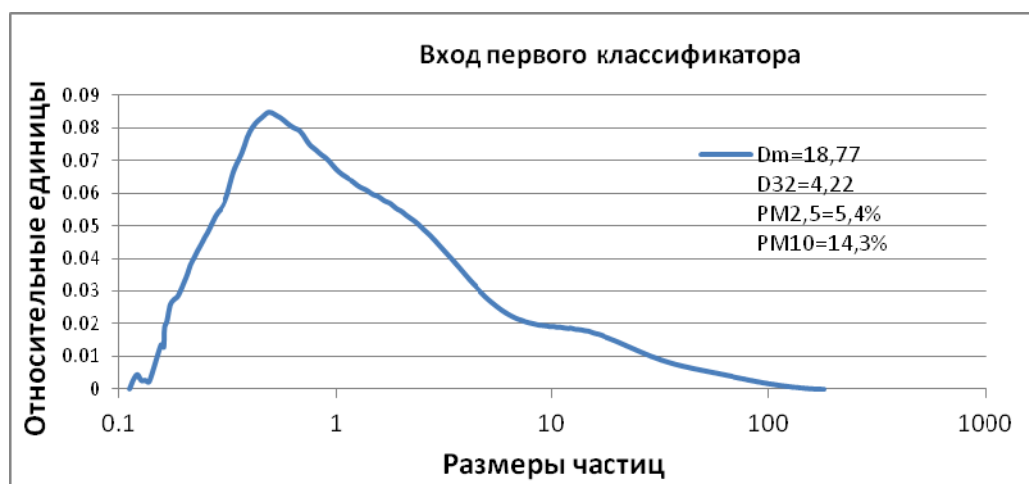


Рис. 4. Дифференциальная функция массового распределения готового продукта

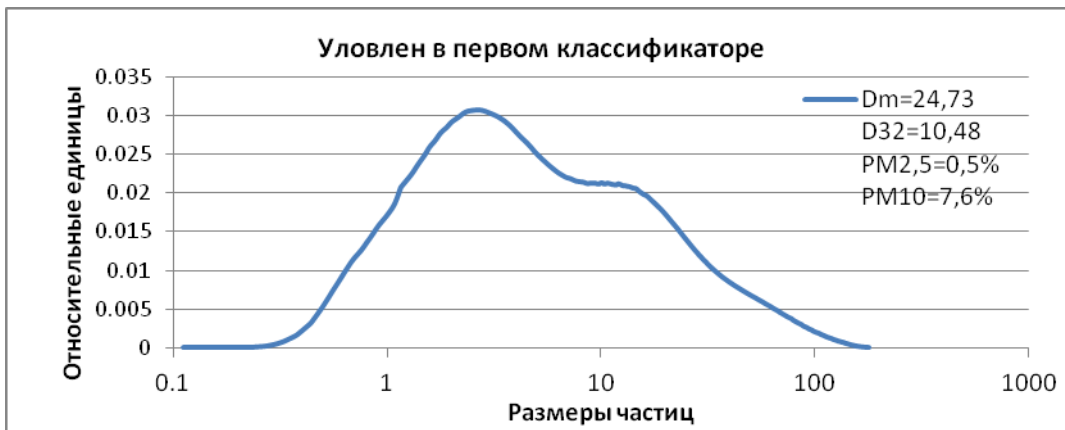


Рис. 5. Дифференциальная функция массового распределения уловленного в первом классификаторе аэрозоля

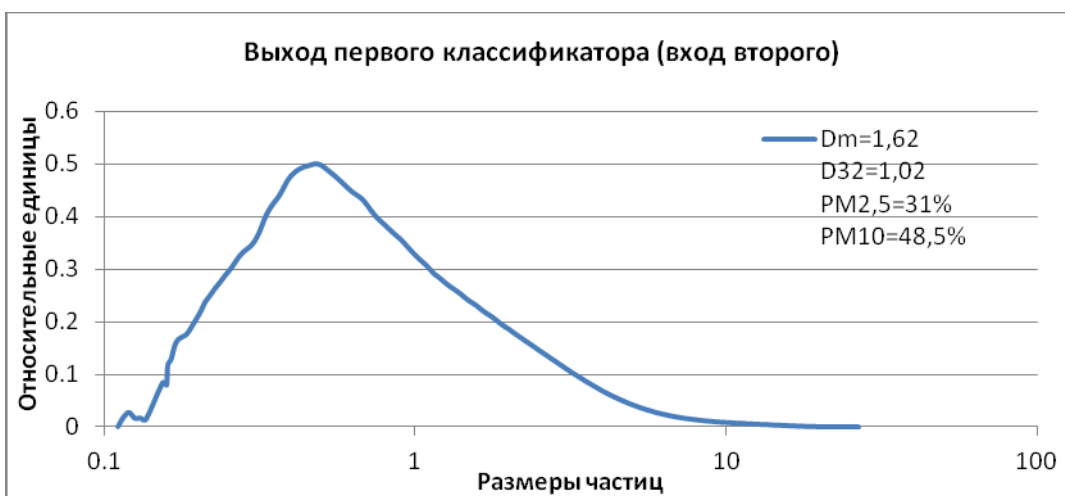


Рис. 6. Дифференциальная функция массового распределения на выходе циклона

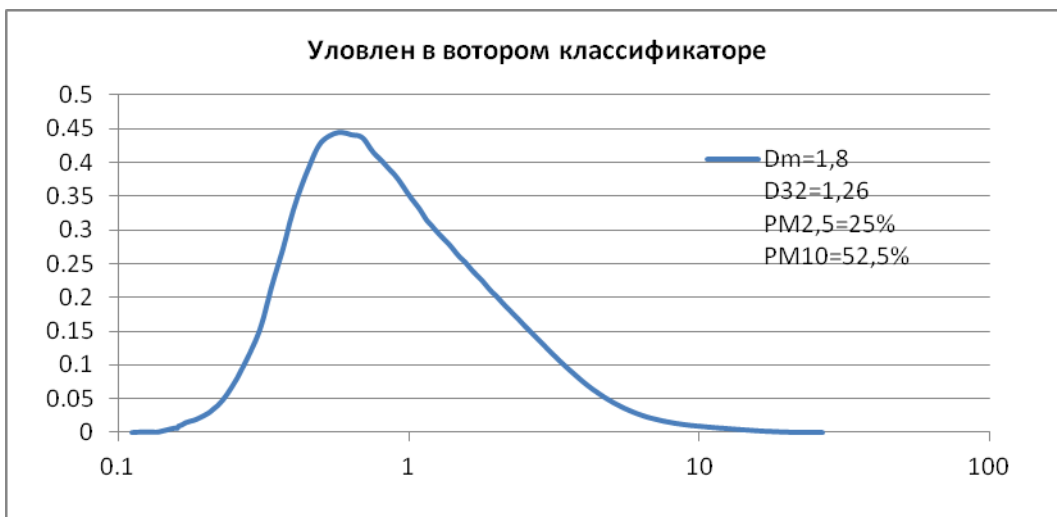


Рис. 7. Дифференциальная функция массового распределения уловленного в рукавном фильтре

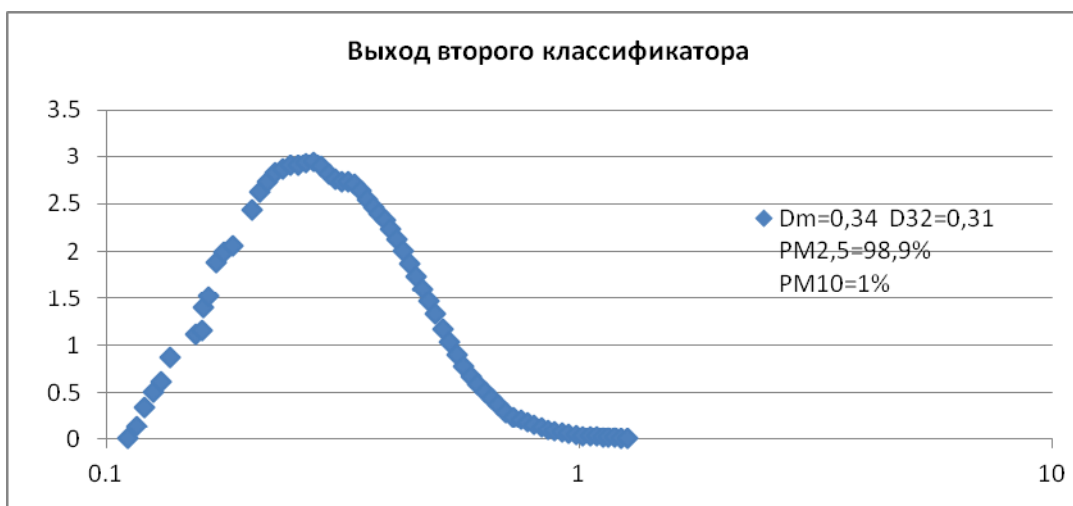


Рис. 8. Дифференциальная функция массового распределения на выходе рукавного фильтра

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН ЗОНДИРОВАНИЯ

Массовые концентрации частиц аэрозоля в потоке перед первым аэродинамическим классификатором находятся в пределах от 10 г/м^3 до 100 г/м^3 , при этом размеры частиц, как видно из приведенных выше рисунков находятся в пределах от $0,1 \text{ мкм}$ до 100 мкм , следовательно, целесообразно использовать интегральные методы лазерного зондирования.

Измерения такого широкого изменения размеров частиц является технически сложной задачей, которая выполнима, как правило, только в лабораторных условиях, а не в реальном потоке. Используя модифицированный метод спектральной прозрачности на двух и более длинах волн можно измерять средний объемно-поверхностный диаметр D_{32} в потоке в реальном времени, а зная взаимосвязь объемно-поверхностного диаметра со средним массовым медианным диаметром можно решать обратные задачи лазерного зондирования по восстановлению функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Значения длин волн выбираются таким образом, чтобы отношения средних значений фактора эффективности рассеяния для этих длин волн было монотонной функцией объемно-поверхностного диаметра. Тогда, рассчитывая оптическую толщину этого потока по измерениям ослабления лазерного излучения в нем, можно найти среднее значение объемно-поверхностного диаметра.

При априорном знании диапазона возможных значений объемно-поверхностного диаметра, длины волн зондирующего излучения должны быть вблизи следующих значений

$$\lambda^{\min} = \pi D_{32} \sqrt{\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}}, \quad \lambda^{\max} = \pi D_{32} \sqrt{\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}},$$

где m – показатель преломления вещества аэрозольного материала. При этом длины волн должны перекрывать значения, полученные по приведенным выше формулам [4].

Статистический анализ 120 функций массового распределения готового продукта и их производных вплоть до выхода из последнего классификатора показал, что перед первым классификатором $3,01 \leq D_{32} \leq 5,44$ мкм, следовательно, $\lambda^{\min} = 2,46$ мкм, а $\lambda^{\max} = 4,44$ мкм. Поэтому в качестве излучателя можно использовать твердотельный лазер на АИГ: H_0^{3+} с длиной волны $2,1 \text{ мкм}$ и CO_2 -лазер с преобразованием во вторую гармонику с длиной волны $5,3 \text{ мкм}$. Особый интерес для этого случая представляет лазер на парах стронция при использовании линии генерации с длинами волн $1,092 \text{ мкм}$ и $6,456 \text{ мкм}$. Перед вторым классификатором $0,83 \leq D_{32} \leq 1,15$ мкм, следовательно, $\lambda^{\min} = 0,680$ мкм, а

$\lambda_{\text{max}} = 0,940$ мкм. Для этого случая в качестве излучателя можно использовать твердотельный лазер на АИГ: Nd^{3+} с длиной волны 1,064 мкм и его вторую гармонику с длиной волны 0,532 мкм, а также полупроводниковые лазеры с длинами 0,65 мкм и 1,2 мкм. На выходе потока из аэродинамических классификаторов $0,271 \leq D_{\text{ex}} \leq 0,33$ мкм, следовательно, $\lambda_{\text{min}} = 0,221$ мкм, а $\lambda_{\text{max}} = 0,276$ мкм. Значит, в качестве излучателя можно использовать твердотельный лазер АИГ: Nd^{3+} на длинах волн 0,213 мкм (пятая гармоника) и 0,355 мкм (третья гармоника).

Таким образом, анализ трансформации спектра размеров частиц в аэродинамических классификаторах на примере реального промышленного потока цементных аэрозольных частиц на основе данных метода спектральной прозрачности на двух длинах волн показали возможность измерения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц в потоках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УГЛОВ ЗОНДИРОВАНИЯ

После выбора длин волн зондирующего излучения определим диапазон углов с наибольшей чувствительностью к изменению фракционного состава аэрозоля, связанного с частичным или полным отказом пылеулавливающего оборудования. Для этого применяется метод интегрального светорассеяния или метод полной индикатрисы. Для идентификации функции распределения частиц на основании теории Ми выполнены расчеты элементов матрицы Стокса для распределения частиц реального цементного аэрозоля, как для исправной работы пылегазоочистного оборудования, так и для различных случаев его отказа. Анализируя отношения интенсивностей для различных пар длин волн, приходим к выводу, что наиболее чувствительные к изменению состава аэрозоля диапазоны углов от 20° до 140° . В качестве примера приводим результаты, полученные при использовании длин волн 1,064 мкм и 0,405 мкм.

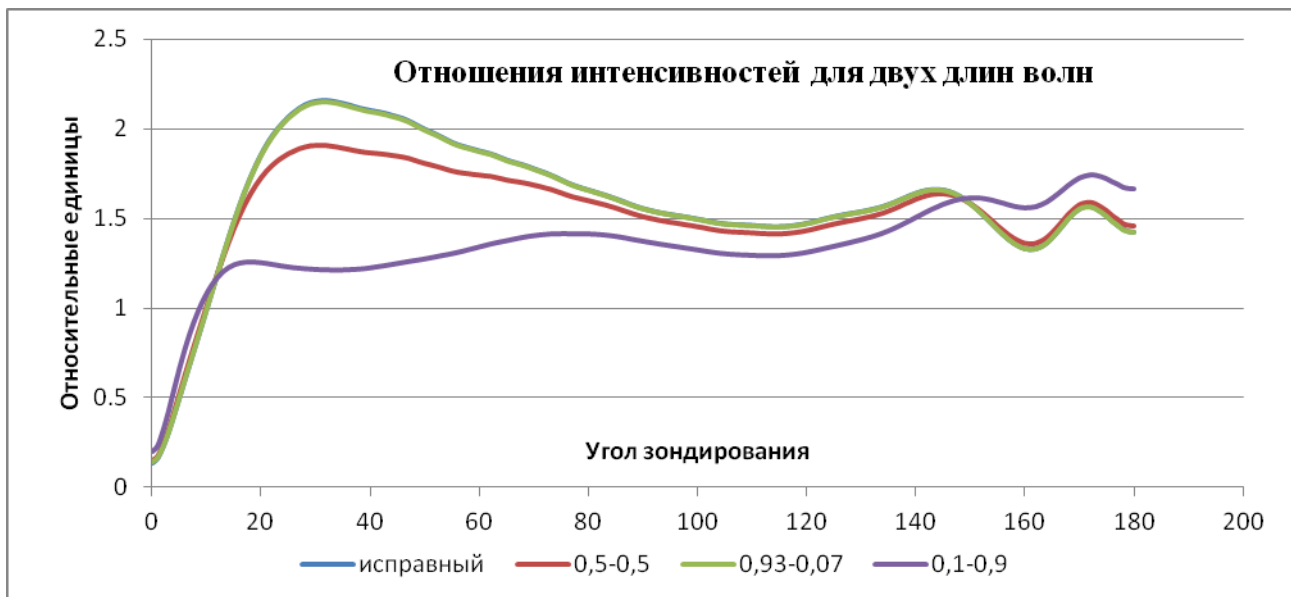


Рис. 9. Зависимость отношений интенсивностей рассеяния от угла рассеяния для разной степени отказа

Для диапазона углов от 155° до 180° наблюдается обратная зависимость отношений интенсивности от отказа, что позволяет идентифицировать отказ при использовании аэрозольного лидара.

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Для оценки повышения точности решения обратных задач по восстановлению функции распределения необходимо оценить зависимость массового медианного диаметра от среднего объемно-поверхностного диаметра и их связь с долями фракций определенного диаметра. Анализ полученного банка распределений частиц аэрозоля и его параметров показал следующее

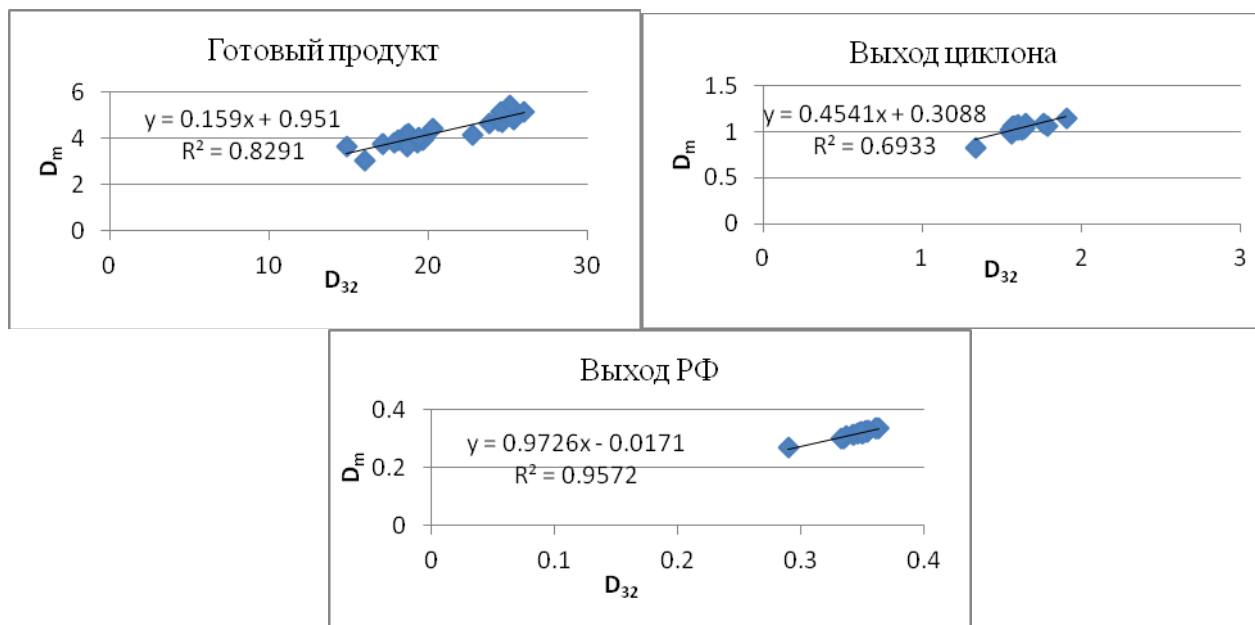
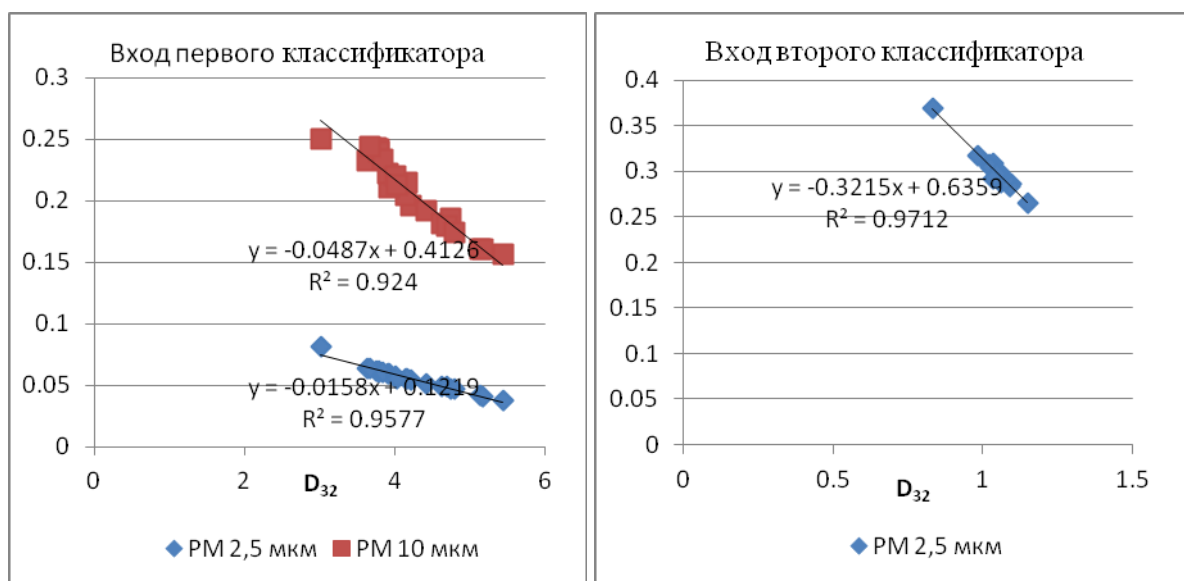


Рис. 10. Корреляционные зависимости массового медианного диаметра от среднего объемно-поверхностного диаметра

Как видно из рисунков корреляция между указанными параметрами очень высокая (выше 0,8), что позволяет говорить о тесной связи между массовым медианным и средним объемно-поверхностным диаметрами.

Далее была найдена зависимость доли фракций с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм и менее 10 мкм от среднего объемно-поверхностного диаметра на входе и выходе каждого классификатора. На выходе первого классификатора доля аэрозольных частиц менее 10 мкм составляет более 75%, что не вызывает необходимости определения корреляционной связи.



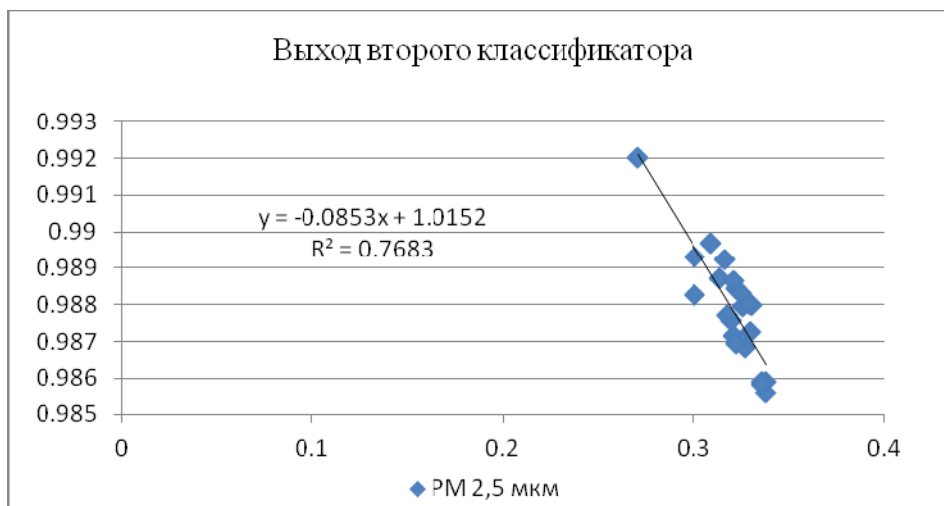


Рис.11. Зависимость доли фракций от среднего объемно-поверхностного диаметра

Таким образом, установлены сильные корреляционные связи среднестатистических параметров распределений частиц по размерам (массовый медианный, средний объемно-поверхностный диаметр). Это позволяет по результатам измерения одного из них восстанавливать значение другого, а также рассчитывать фракционную долю частиц в распределении их по размерам.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для исследования индикатрисы рассеяния оптического излучения аэрозольными частицами в аэродисперсном потоке собрана на базе пылевого стенда, структура, работа и основные характеристики которого описаны в [5,6,7]. Для проведения измерения рассеянного аэрозольными частицами излучения под различными углами, экспериментальная установка состоит из следующих функциональных узлов, и ее схема представлена на рисунке 12. На вертикальном участке газохода 1, имеющего поперечное сечение в форме квадрата, установлены два смотровых окна 2 для визуального наблюдения за ходом эксперимента. На одной из стенок газохода 1 установлен оптический излучатель 3, направленного перпендикулярно направлению движения аэродисперсного потока. Внутри газохода 1 помещен фотоприемник рассеянного излучения (ФПР) 4, установленный на направляющей 5, которая жестко размещена внутри газохода. Часть излучения, рассеянного частицами аэрозоля, находящимися в измерительном объеме 6, образованном пересечением диаграммы направленности излучения (ширина - $\phi_{и}$) излучателя и поля зрения (ПЗ) ФПР (ширина - $\phi_{фпр}$), попадает на ФПР. На противоположной стенке газохода, напротив излучателя, для регистрации излучения, прошедшего сквозь аэродисперсный поток, установлен фотоприемник (ФПП) 7. Оптические оси излучателя 3 и ФПП 7 совмещены. Заданное положение ФПР внутри газохода обеспечивается тягой 8 с указателем положения ФПР (стрелкой) 9 по шкале 1.

Направляющая имеет заданную кривизну в форме дуги окружности с центром, расположенным в точке пересечения оптической оси излучателя 3 и ПЗ ФПР. Направляющая 5 расположена таким образом, чтобы максимум ПЗ ФПР при любом его положении всегда был направлен на оптическую ось излучателя (на центр окружности). Направляющая и помещенный на ней ФПР, выполнены таким образом, чтобы не оказывать заметного влияния на поток излучения, попадающий от излучателя на ФПП. При этом ФПР в процессе эксперимента должен принимать рассеянное излучение в диапазоне углов от 6 до 165 град.

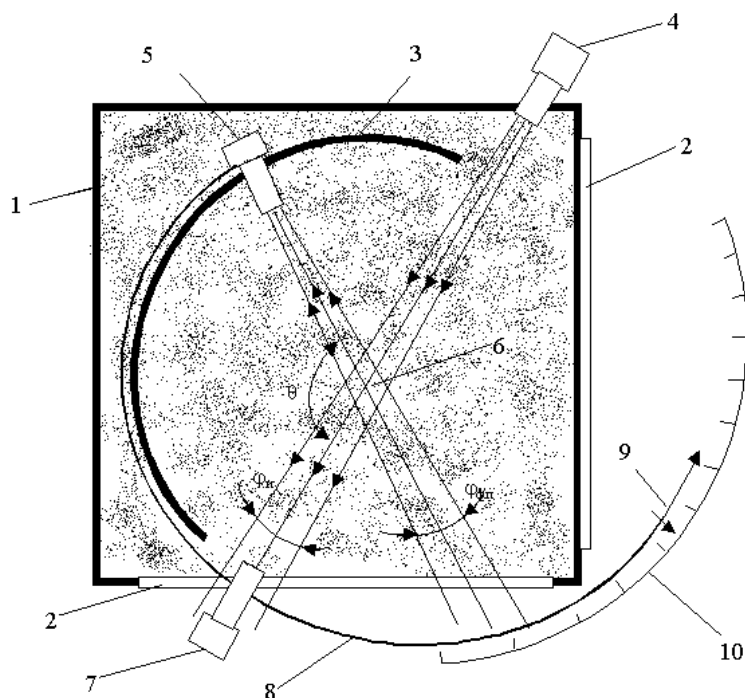


Рис. 12. Схема экспериментальной установки для определения индикатрисы рассеяния света частицами пыли: 1 – газоход; 2 - оптические окна; 3 –излучатель; 4 – фотоприемник рассеянного света (ФПР); 5 – направляющая ФПР; 6 – измерительный объем ФПР; 7 – фотоприемник прошедшего света (ФПП); 8 – тяга для перемещения ФПР; 9 – указатель положения ФПР; 10 – шкала положения ФПР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассчитаны функции распределения частиц на входах и выходах аэродинамических классификаторов на основе экспериментальных функций распределения аэрозольных частиц по размерам в готовом мелкодисперсном продукте (цементе). Установлены сильные корреляционные связи между среднестатистическими параметрами распределения аэрозолей и долями фракций. Выбраны методы лазерного зондирования аэрозолей и найдены для них оптимальные длины волн, позволяющие реализовать максимальную чувствительность выбранных методов. Показана возможность измерения среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц и восстановления по полученному значению полного его спектра размеров.

Таким образом, показана возможность решения обратной задачи лазерного зондирования промышленных аэрозолей модифицированным методом спектральной прозрачности и методом интегрального светорассеяния в наиболее чувствительных интервалах углов рассеяния на выбранных длинах волн и предложены излучатели для их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 Международной конференции, том. 1., 2009. С. 287-298.
2. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955, 184 с.

3. Дополнения №8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест»//Роспотребнадзор РФ. М.2010, 2 с.
4. 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.
5. Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Экспериментальное исследование индикатрисы рассеяния на полидисперсном аэрозоле в воздушном потоке.// Тезисы докладов конференции “Лазеры для медицины, биологии и экологии”. Санкт-Петербург. 2004. С. 19-20.
6. Vadim E. Privalov, Pavel V. Charty and Valery G. Shemanin. Polydisperse aerosol in air flow Mi scattering indicatrix experimental studies// Proceeding of SPIE, 2004. V. 5447. P. 242-250.
7. Методы электрических измерений: Учебное пособие для вузов. Под редакцией Цветкова Э.И. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 288 с.

E.I. Vedenin, S.V. Polovchenko, P.V. Chartiy, V.G. Shemanin

Kuban State Technological University, Novorossiysk Polytechnic Institute,
Russia, Novorossiysk, 20 K. Marx Str.

E-mail: vshemanin@nbkstu.org.ru

PARTICLES DISTRIBUTION FUNCTION RECONSTRUCTION BASED ON INDUSTRIAL AEROSOLS MULTYWAVES LASER SENSING

Particles distribution functions were reconstructed on the basis of analysis more than 100 experimental aerosol particles distribution functions along the flow pass on different stages of technological process by the aerodynamic classification. Applying integral methods of diagnostic radiation wavelengths and the scattering angles which are more sensitive to the particles sizes spectra changes were estimated. Thereby, the initial parameters of aerosol lidar construction with the diode lasers were obtained. The range of the industrial aerosols spectra size changing were estimated and it is possible to solve the inverse task on the selected radiation wavelengths.

INDUSTRIAL AEROSOL, LIDAR, INTEGRAL LIGHT SCATTERING METHODS