

# Контроль экологической безопасности пылегазоочистных установок модифицированным методом спектральной прозрачности

**В.В. Дьяченко**, декан, профессор, д-р геогр. наук

**В.В. Rogovskiy**, аспирант

**П.В. Чартий**, доцент, канд. физ.-мат. наук

Новороссийский политехнический институт (филиал Кубанского государственного технологического университета), г. Новороссийск

e-mail: vdyachenko@nbkstu.org.ru

## Ключевые слова:

лазер,  
аэрозоль,  
отказ,  
диагностика,  
рукавный фильтр,  
цемент.

*В статье рассмотрен основанный на модифицированном методе лазерной спектральной прозрачности новый подход к повышению экологической безопасности и эффективности работы пылегазоочистных установок. Выполнены исследования запыленного воздушного потока в специальном пылевом стенде модифицированным методом спектральной прозрачности. Разработка основана на использовании лазерного излучения на трех длинах волн для определения не только массовой концентрации пыли, но и ее дисперсного состава. Это позволяет создать регистратор, обнаруживающий отказы рукавного фильтра на ранней стадии в режиме реального времени.*

## 1. Введение

В связи с нарастающим техногенным преобразованием биосферы проблемы загрязнения окружающей среды и, как следствие, экологической безопасности, становятся всё более актуальными [1]. Одной из наиболее важных проблем является загрязнение атмосферного воздуха во многих отраслях промышленности, где применяются технологии, сопровождающиеся образованием пылегазовых потоков. Большое количество пыли выбрасывают предприятия цементной промышленности.

Обеспыливание техногенных аэродисперсных потоков актуально в двух аспектах — экологическом и экономическом. С одной стороны, это возвращение в технологический цикл сырья, а с другой — повышение экологической безопасности производства, снижение запыленности воздуха рабочих и санитарно-защитных зон. Пыль выступает фактором повышения заболеваемости. Поэтому важен такой параметр пыли, как ее дисперсный состав. Пыль оказывает негативное влияние на здоровье, и снижение ее выбросов имеет большое гигиеническое значение.

Распространенное средство обеспыливания промышленных аэродисперсных потоков — рукавные

фильтры, которые в процессе эксплуатации постепенно изнашиваются, что приводит к снижению эффективности работы или к полному отказу (прорывы рукавов). Мониторинг обеспыливающих агрегатов позволяет предотвратить как потерю сырья, так и сверхлимитное загрязнение окружающей среды.

Учитывая, что к 2017 г. на юге России может быть введено в эксплуатацию 10 новых заводов общей мощностью около 17 млн т цемента в год, производственные мощности цементной промышленности Северного Кавказа возрастут более чем в три раза. Для предотвращения увеличения выбросов твердых частиц в атмосферу важнейшего в рекреационном отношении региона России необходимо создать эффективные и надежные аспирационные системы. В данной работе описана разработка регистратора отказа пылегазоочистной установки (ПГУ на примере рукавного фильтра), способного выявлять отказы на ранней стадии и в реальном времени.

## 2. Постановка задачи и ее решение

Для своевременного обнаружения отказа пылегазоочистной установки необходимо постоянно контролировать ее эффективность. С этой целью

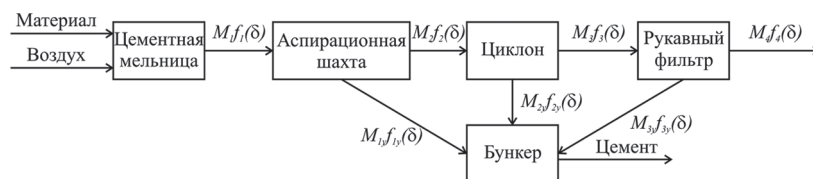


Рис. 1. Схема аэродинамической классификации измельчаемого материала

либо производятся пылегазовые замеры, достаточно трудоемкие и не позволяющие быстро оценить состояние установки, либо устанавливаются пылемеры на входе и выходе установки для контроля концентрации. Однако концентрация на входе и, как следствие, на выходе пылегазоочистной установки может меняться в результате не только отказа самой установки, но и изменения технологического процесса. Соответственно, нужен другой параметр запыленного потока, который характеризовал бы именно отказ ПГУ. Как показано в [2], таким параметром может быть средний размер частиц пыли, характеризующий дисперсный состав на выходе ПГУ.

Для разработки регистратора необходимо знать дисперсный состав аэрозольного потока на выходе ПГУ и определить наиболее подходящий метод решения поставленной задачи. Для системы пылеулавливания, представленной на рис. 1, рассчитан дисперсный состав аэрозоля на выходе каждой ступени очистки, в том числе и для рукавного фильтра [2]. Дисперсный состав аэрозоля на выходе рукавного фильтра представлен на рис. 2.

График на рис. 2 построен по результатам измерений с помощью лазерного гранулометра MasterSizer 2000 на цементном заводе г. Новороссийска. Здесь на выходе исправного рукавного фильтра размер пылевых частиц не превышает 1 мкм, а средний размер пылевых частиц составляет 0,3 мкм.

Анализ методов контроля запыленного потока показал, что наиболее оптимальным для решения поставленной задачи является модифицированный метод спектральной прозрачности (ММСП) [3, 4]. Он основан на решении обратной задачи для уравнения

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

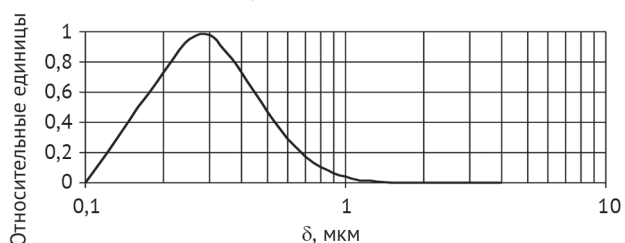


Рис. 2. Распределение частиц по размерам на выходе рукавного фильтра

где:  $\tau_\lambda$  — спектральная оптическая толщина;  $C_n$  — счетная концентрация частиц;  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения;  $Q$  — фактор эффективности ослабления для одиночных частиц;  $l$  — оптическая длина зондирования;  $\delta$  — 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 на массовую

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

получим выражение для оптической толщины:

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

где:  $\rho_p$  — плотность материала частиц;

$$\delta_{32} = \frac{\int_0^\infty \delta^3 f(\delta) d\delta}{\int_0^\infty \delta^2 f(\delta) d\delta} \quad \text{— средний объемно-поверхностный диаметр частиц.}$$

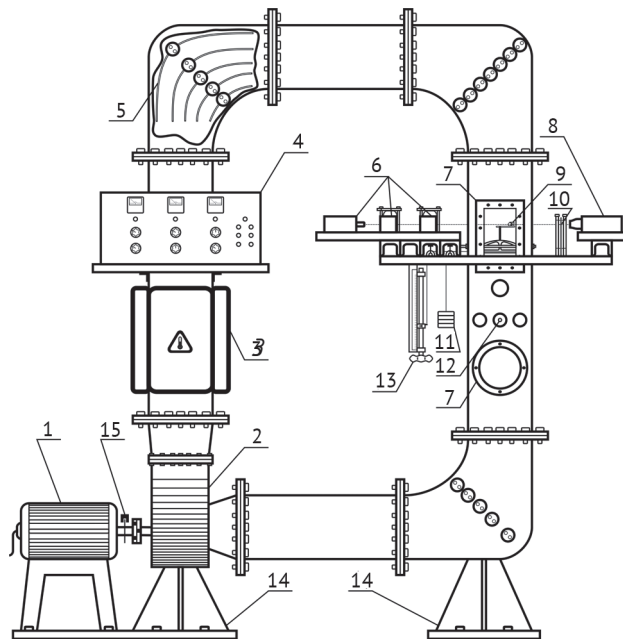
По экспериментально измеренным  $\tau_{\lambda i}$  и расчетным значениям  $\delta_{32}$  массовая концентрация в измерительном объеме определяется по формуле

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

### 3. Результаты эксперимента

Для отработки метода необходимо создать запыленные потоки с известной концентрацией и дисперсным составом. В данной работе был использован специальный пылевой стенд (рис. 3) [5, 6].

Специальный пылевой стенд представляет собой замкнутый газоход с квадратным поперечным сечением со стороны стенки газохода 400 мм, выполненный в вертикальной плоскости в виде замкнутого



**Рис. 3.** Схема пылевого стенда:  
1 – электродвигатель; 2 – вентилятор; 3 – нагревательные элементы; 4 – блок управления оптикой; 5 – направляющие лопатки; 6 – оптическая часть измерителя, 7 – смотровые окна; 8 – фотоприемник ММСП; 9 – фотоприемник МИСП (метод интегрального светорассеяния); 10 – светофильтр; 11 – противовес; 12 – отверстие в крышке штуцера; 13 – механизм поворота фотоприемника МИСП; 14 – постамент; 15 – электронный тахометр

контра, в разрыв которого включен центробежный вентилятор 2, позволяющий задавать линейную скорость газового потока в пределах от 0 до 25 м/с, что практически перекрывает значения скоростей, встречающихся в промышленных технологиях, связанных с производством порошковых материалов (строительная и химическая промышленность, металлургия). На вал, соединяющий электродвигатель 1 и вентилятор, установлен электронный тахометр 15 для измерения частоты вращения вентилятора. Для исключения нарушений равномерности пылегазового потока, которые могут возникать после его прохождения в вентиляторе и при изменении направления движения потока в каждом изгибе контра, предусмотрены направляющие лопатки 5, которые устанавливаются и фиксируются в оптимальном положении.

На стенке газохода стенда установлен импульсный инжектор аэрозоля, обеспечивающий введение заданного количества исследуемого материала непосредственно в поток через отверстие 12 в крышке штуцера. Для быстрого проветривания стенда на одном из участков предусмотрен байпасный отвод, через который запыленный поток выбрасывается в атмосферу, а концентрация частиц становится равной нулю. На стенке газохода сразу после центробежного

вентилятора установлены нагревательные элементы 3 для нагревания газового потока.

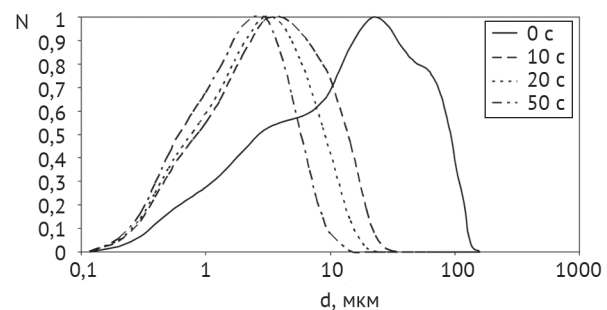
На прямом участке газохода после направляющих лопаток 5 сделаны смотровые окна 7 с отверстиями для прохождения лазерного излучения. На П-образный металлический швеллер, изолированный от газохода, с одной стороны установлен оптический стол с размещенной на нем оптической частью измерителя 6, а с другой — фотоприемник 8 для регистрации лазерного излучения, прошедшего через поток. С помощью этой установки можно исследовать оптические свойства полидисперсных аэрозолей в воздушных потоках. Внутри газохода на поворотном механизме установлен фотоприемник 9 для регистрации рассеянного лазерного излучения под заданным углом. Поворотный механизм представляет собой шкив, вращению которому передается через трос механизма вращения 13 фотоприемника МИСП. К противоположному концу троса прикреплен противовес 11.

После инъекции порошок исследуемого материала, проходя через центробежный вентилятор, распределяется равномерно по потоку через несколько проходов по газоходу, поэтому исследуемый аэрозоль равномерно распределен по сечению потока [7]. Учитывая инерционное и гравитационное осаждение пылевых частиц в стенде, можно записать формулу

$$C(\delta) = C_0(\delta) e^{-\frac{pvt}{2bl}(\pi v^2(3n+7)+4gl_1)}, \quad (6)$$

где:  $C_0$  — начальная концентрация;  $p$  — вероятность «прилипания» частиц;  $t$  — время;  $b$  — количество направляющих лопаток;  $l$  — суммарная длина всех участков газохода;  $v$  — скорость потока;  $n$  — количество поворотных лопаток;  $g$  — ускорение свободного падения;  $l_1$  — длина горизонтальных участков газохода;  $\delta$  — диаметр частицы.

По формуле (6) составлены графики изменения дисперсного состава инжектируемого порошка во времени (рис. 4).



**Рис. 4.** Дисперсный состав инжектируемого порошка за первую минуту после инъекции

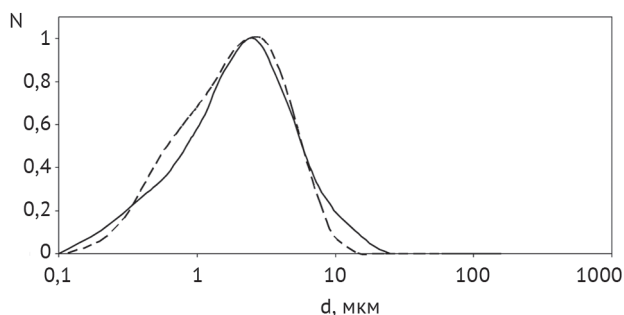


Рис. 5. Дисперсный состав пыли в стенде в 100-ю секунду после инъекции в стенде (пунктирная линия) и на входе в рукавный фильтр (сплошная линия)

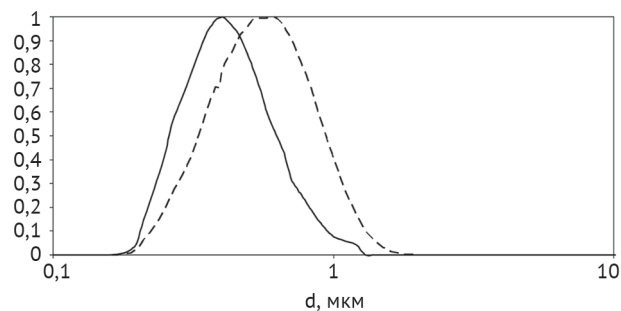


Рис. 6. Дисперсный состав пыли в стенде в 1000-ю секунду после инъекции в стенде (пунктирная линия) и на выходе из рукавного фильтра (сплошная линия)

По графикам на рис. 4 видно, что за первую минуту после инъекции частицы пыли размером более 10 мкм оседают, и в потоке остаются частицы размером не более 10 мкм. В [7] установлено время, когда дисперсный состав аэрозоля в стенде соответствует дисперсному составу на входе и выходе рукавного фильтра с коэффициентом детерминации более 80% (рис. 5, 6).

После инъекции через 80 секунд и до 500 секунд дисперсный состав пыли в стенде соответствует дисперсному составу на входе в рукавный фильтр, а с 770-й секунды — на выходе рукавного фильтра.

Для проведения измерений ослабления лазерного излучения была собрана лабораторная установка, оптическая схема которой приведена на рис. 7. Проветривание стенда осуществлялось после каждого завершения эксперимента путем повышения оборотов вентилятора и контролировалось фотоприемником МИСР.

Моделируя запыленные потоки с помощью стенда, были получены графики зависимости ослабления лазерного излучения от времени на трех длинах волн — 405, 532 и 650 нм (рис. 8). По графикам на рис. 8 видно, что ослабление лазерного излучения на меньших длинах волн происходит дольше по причине более быстрого осаждения крупных частиц. На этом принципе основано определение дисперсного состава аэрозольных частиц через величину  $\delta_{32}$ . Средний объемно-поверхностный диаметр  $\delta_{32}$  является функцией отношения двух длин волн и двух усредненных факторов эффективности на этих длинах

$$f(\delta_{32}) = \frac{\bar{Q}_{\lambda_i}}{\bar{Q}_{\lambda_j}} = \frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}}. \quad (7)$$

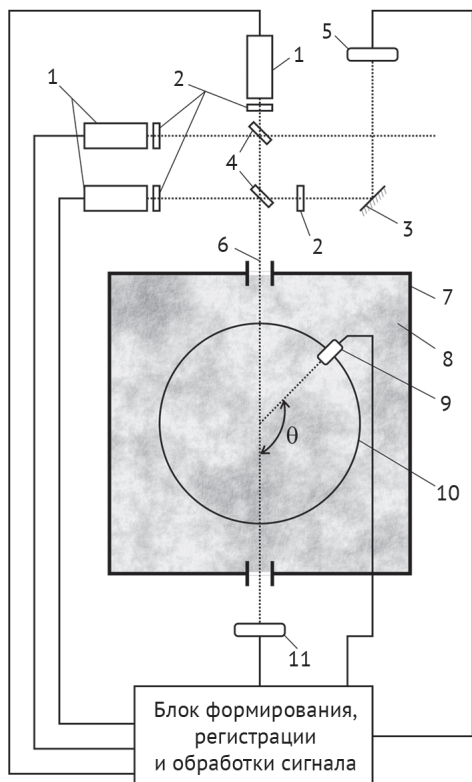


Рис. 7. Оптическая схема установки для измерения ослабления лазерного излучения модифицированным методом спектральной прозрачности

1 — источник лазерного излучения; 2 — светофильтры; 3 — зеркала; 4 — светоделительные стекла; 5 — опорный фотоприемник; 6 — лазерный пучок; 7 — газоподъем; 8 — аэродисперсный поток; 9 — фотоприемник МИСР; 10 — поворотный механизм МИСР; 11 — фотоприемник МСП

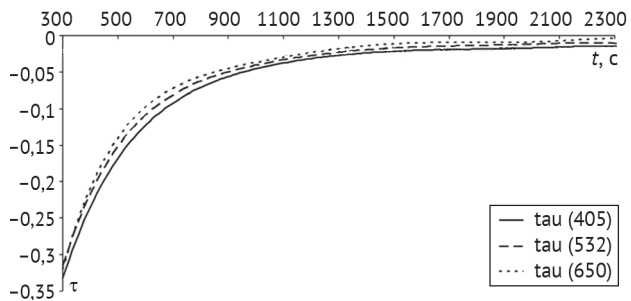


Рис. 8. Зависимость ослабления лазерного излучения на трех длинах волн в промежутке времени от 300 (инъекция) до 1500 секунд (аппроксимация)

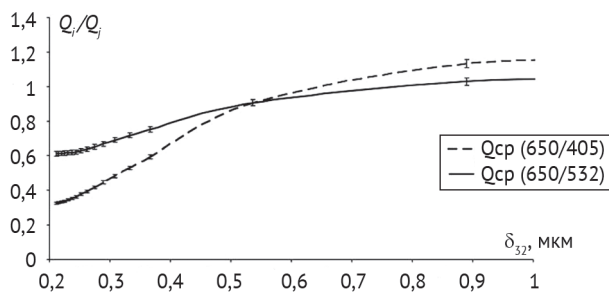


Рис. 9. Зависимость  $\bar{Q}_{\lambda,i}/\bar{Q}_{\lambda,j}$  от  $\delta_{32}$  для трех длин волн

Графики зависимости  $\bar{Q}_{\lambda,i}/\bar{Q}_{\lambda,j}$  от  $\delta_{32}$  для трех длин волн представлены на рис. 9. По этим графикам видно, что зависимость отношения величин  $\bar{Q}_{\lambda,i}/\bar{Q}_{\lambda,j}$  от  $\delta_{32}$  в диапазоне  $\delta_{32}$  от 0,21 до 1 мкм монотонно возрастает. Также для каждой точки показана относительная погрешность. Для дисперсного состава на выходе исправного рукавного фильтра величина  $\delta_{32}$  составляет 0,43 мкм. Измерив ослабление лазерного излучения на двух длинах волн, можно определить  $\delta_{32}$ , а затем отказ рукавного фильтра. Это позволяет создать регистратор отказов рукавного фильтра, который работает в реальном времени. При отказе рукавного фильтра дисперсный состав на выходе из рукавного фильтра будет суммой дисперсных составов на входе и выходе из него (рис. 10).

На рис. 10 видно, что при отказе на выходе рукавного фильтра появляются частицы, размер которых не характерен для его исправной работы. Соответ-

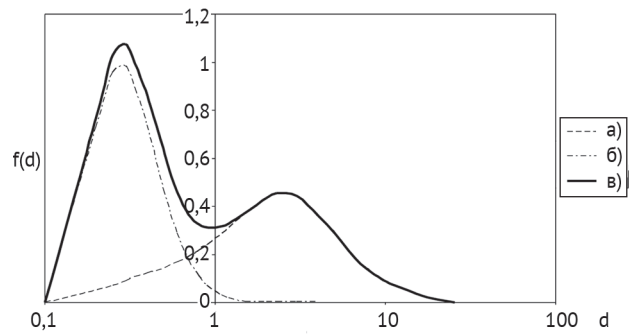


Рис. 10. Распределение частиц по размеру на входе (а) и выходе (б) рукавного фильтра при исправной работе и при степени отказа 1 (в)

ственно, изменение дисперсного состава является сигналом отказа рукавного фильтра.

Для измерения  $\delta_{32}$  при отказе рукавного фильтра на пылевом стенде был смоделирован отказ рукавного фильтра со степенью отказа  $k = 0,4$  (рис. 11).

Отказ рукавного фильтра моделировался путем дополнительной инъекции порошка цемента, уловленного в циклоне, в момент, когда дисперсный состав в стенде соответствует дисперсному составу на выходе рукавного фильтра. При этом изменяется не только концентрация, но и дисперсный состав, который соответствует отказу рукавного фильтра со степенью  $k = 0,4$ . На рис. 11 показаны сигналы на двух длинах волн, по аппроксимациям которых видно, что после дополнительной инъекции не только возросло ослабление, но и изменилось отношение сигналов. Отсюда можно сделать вывод, что можно регистрировать отказы рукавных фильтров до степени отказа  $k = 0,4$ .

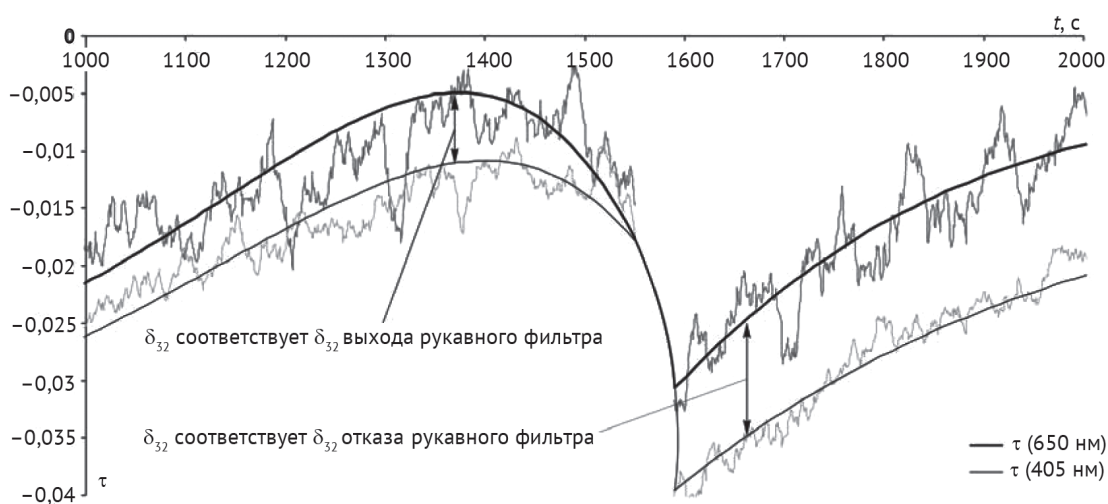


Рис. 11. Зависимость величины  $\tau_{\lambda,i}$  в момент повторной инъекции

В случае превышения этого значения для выбранных нами длин волн можно определить факт отказа рукавного фильтра.

#### 4. Заключение

Установлена возможность регистрации отказов рукавного фильтра на ранней стадии в реальном времени. Предлагаемый регистратор отказов рукавного фильтра модифицированным методом спектральной прозрачности позволяет контролировать не только концентрацию, но и дисперсный состав пыли после рукавного фильтра с целью предотвратить аварийный выброс. Для этого наиболее

подходит контроль одновременно концентрации и дисперсного состава, так как изменение только концентрации может быть вызвано другими причинами, не связанными с прорывом. После выявления изменения дисперсного состава последовательное отключение рукавов при непрерывном мониторинге позволит обнаружить рукав, нуждающийся в замене (без выключения всей установки и остановки производства), что существенно повышает экономическую эффективность и экологическую безопасность всей установки.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ — грант 13-05-96514 p\_юг\_a*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко В.В., Матасова И.Ю., Rogovskiy V.B. Проблемы техногенного преобразования ландшафтов Российского Причерноморья // Безопасность в техносфере. — 2012. — № 5. — С. 24–29.
2. Половченко С.В., Rogovskiy V.B., Chartiy P.V., Шеманин В.Г. Идентификация спектров размеров промышленных аэрозолей лазерными методами зондирования // Сборник докладов 20-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Санкт-Петербург, 2010 / СПбГПУ. — СПб.: СПбГПУ, 2010. — С. 145–160.
3. Архипов В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987.
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. — № 1. С. — 48–52.
5. Privalov V.E., Chartiy P.V., Shemanin V.G. Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // Proceeding of SPIE. — 2004. — V. 5447. — P. 251–259.
6. Дьяченко В.В., Половченко С.В., Rogovskiy V.B., Chartiy P.V. Экологический мониторинг аэрозолей с цементной дисперсной фазой // Научный диалог. Естествензнание и экология. — 2012. — № 7 — С. 6–17.
7. Половченко С.В., Rogovskiy V.B., Chartiy P.V., Шеманин В.Г. Лазерная диагностика релаксационных аэродисперсных потоков // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 2. — С. 41–43.

## Spectral Clarity Modified Method in Ecological Safety Monitoring of Dust-Trapping and Gas-Cleaning Units

**V.V. Dyachenko**, Dean, Professor, Doctor of Geography, Novorossiysk Polytechnic Institute (Branch of Kuban State Technological University), Novorossiysk

**V.V. Rogovskiy**, Ph.D. Candidate, Novorossiysk Polytechnic Institute (Branch of Kuban State Technological University), Novorossiysk

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

*The article develops a new approach to the enhancement of ecological safety and productivity of dust-trapping and gas-cleaning units; technique is based on modified spectral clarity method. Dusted airflow was studied on special dust-test bed with modified spectral clarity method. Research is based on implementing three-wavelength lasers for discovering not only mass concentration of dust, but its size-consist determination. It allows constructing a sensor able to detect faults of sock filters in real-time on early stages.*

**Keywords:** laser, aerosol, rejection, diagnostics, sock filter, cement.