

Подавление нереспираторной фракции пыли при измерении ее массовой концентрации в рабочей среде

А. ГМИТЕРКО*, М. ДОВИЦА*, Р. ПАЛЕНЧАР***, М. КЕЛЕМЕН*, С. СЛОСАРЧИК*, Т. КЕЛЕМЕНОВА*, Л. ШООШ**, С. ДЮРИШ***

* Технический университет, Кошице, Словакия,

** Словацкий технический университет, Братислава, Словакия

*** Словацкий институт метрологии, Братислава, Словакия,

e-mail: duris@smu.gov.sk

Предложено для подавления нереспираторной фракции пыли при измерении ее массовой концентрации в рабочей среде использовать оптический пылемер, основанный на рассеивании излучаемого света частицами пыли. Данный способ улучшит сепарацию пыли в результате замены механических частей пылемера (циклона) электронной обработкой сигнала.

Ключевые слова: респираторная и нереспираторная фракции пыли, циклон, оптический пылемер.

The use of optical dust meter based on light scattering by dust particles for dust mass concentration measurement is proposed. This method will improve the dust separation as a result of replacement of dust meter part (cyclone) by the electronic processing of signal.

Key words: respirable and nonrespirable dust fractions, cyclone, optical dust meter.

Один из наиболее часто измеряемых и контролируемых параметров рабочей среды, опасной для человека, — массовая концентрация пыли в воздухе. С гигиенической точки зрения пыль определяется как твердое загрязняющее вещество, состоящее из частиц, которые рассеяны в воздухе или находятся на поверхности различных объектов. Такие частицы появляются в результате различных технологических операций (в металлургии, цементном производстве, при сжигании различных веществ, обработке рудных материалов, металла, дерева, очистке зерна и т. п.)

На частицы пыли влияют гравитация, сопротивление и движение воздуха, электростатическое притяжение и отталкивание и др. Частицы радиусом более 10 мкм самопроизвольно оседают в течение нескольких минут вблизи источника запыления после их возникновения или повторного поднятия. Это означает, что рабочая среда загрязнена частицами пыли радиусом менее 10 мкм, которые с трудом или вообще не оседают. Такие частицы опасны для человека, поскольку проникают во внутренние органы (дыхательные пути, легкие) [1—9].

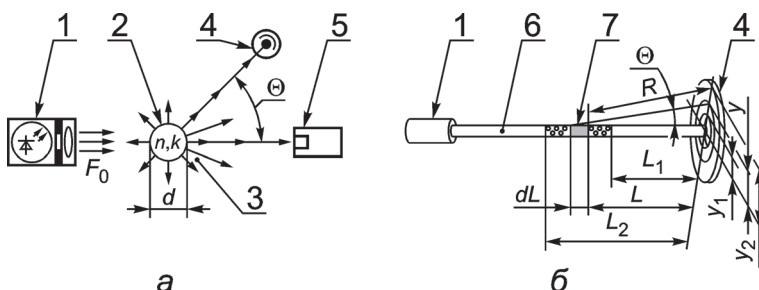


Рис. 1. Структурные схемы измерения массовой концентрации пыли в воздухе (а) и считывающей части пылемера (б):

1 — источник излучения с оптической системой; 2 — частица пыли; 3 — рассеянное оптическое излучение; 4 — светочувствительный элемент; 5 — поглотитель первичного излучения; 6 — световой луч; 7 — измерительный объем

С практической точки зрения можно разделить измеряемые частицы на две группы, так называемые, размерные фракции (составляющие) — респираторную и нереспираторную. Данное разделение вытекает из сепарации частиц пыли при человеческом дыхании. Респираторная составляющая попадает в дыхательные пути.

Цель статьи — показать возможность подавления чувствительности пылемера к нереспираторной фракции частиц пыли при обработке сигнала прибора на основе оптического метода измерения массовой концентрации пыли. Данный метод предполагает замену механических частей (циклона) пылемера на электронные, позволяющие улучшить сепарацию пыли.

Оптический метод измерения массовой концентрации пыли в воздухе основан на принципе рассеивания света в частицах пыли. Его можно применить для непрерывного измерения массовой концентрации пыли в воздухе, в частности, частиц малого размера. Световое излучение, рассеивается на частицах пыли и фиксируется светочувствительным датчиком (рис. 1). Массовая концентрация пыли в воздухе является функцией отношения интенсивностей излучения источника и рассеянного частицами пыли. В качестве источника излучения можно использовать LED и лазерные диоды. Измерительный диапазон данного метода 0,1—200 мг/м³ [10].

Оптические методы измерения основаны на использовании оптических свойств частиц пыли. Для получения информации о массовой концентрации пыли в воздухе использованы экспериментальные сведения о спектральной, угловой и пространственной структурах светового поля в запыленной среде.

Процесс рассеяния светового излучения отличается на частицах пыли различных геометрических форм, степени гомогенности, пространственной и временной стабильности оптических свойств и т. п. Для аналитического решения необходимо предположить, что частицы пыли имеют шарообразную форму и образуют полидисперс-

ную систему, которая характеризуется пространственной функцией распределения по размерам; они гомогенны и изотропны, имеют одинаковые коэффициент преломления и плотность; их оптические свойства неизменны во времени и пространстве. С учетом этих условий аналитическое решение задачи рассеяния светового излучения на частицах пыли оказывается очень сложным. Для точного описания рассеяния плоской электромагнитной волны на изотопных гомогенных сферических частицах можно использовать теорию Лоренца—Мая [11—16]. В данной статье эта теория применена для создания модели рассеяния светового излучения. В соответствии с рис. 1 поток излучения, принимаемый светочувствительным датчиком, можно выразить как

$$F = \frac{F_0}{2\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{L_1}^{L_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S_{11}}{L^2} \cos^2 \left[\arctg \left(\frac{y}{L} \right) \right] \lambda^2 yn(r) dr dy dL d\lambda, \quad (1)$$

где F_0 — поток излучения источника; $S_{11} = S_{11}(y, L, r, m, \lambda)$ — элемент матрицы рассеяния света; y — радиальное расстояние от центра датчика; L — активная длина светового луча в скоплении частиц пыли; r — радиус частицы; m — коэффициент преломления; λ — длина волны излучения; $n(r)dr$ — количество частиц, имеющих радиус в интервале $(r, r + dr)$.

Для измерения респираторной фракции массовой концентрации пыли в среде необходимо подавить нереспираторную фракцию, т. е. исключить частицы пыли размером больше 10 мкм. Свойства индикатрисы интенсивности рассеянного светового излучения можно использовать, если измерение осуществляется при постоянном угле Θ между датчиком и источником излучения и при постоянной длине волны излучения. Увеличение угла Θ приводит к тому, что регистрируемый поток светового излучения соответствует, в основном, частицам малого размера.

Моделирование работы датчика массовой концентрации пыли. Теоретические положения были проверены при следующих параметрах устройства (см. рис. 1): $L_1 = 50$ мм, $L_2 = 150$ мм; $y_1 = 6$ мм, $y_2 = 7$ мм; $F_0 = 1$ мВт; $\lambda = 459 \dots 1004$ нм; частицы шарообразной формы из углерода; коэффициент преломления $m = 1,8 - 0,6i$, постоянный в пределах всего светового спектра [10].

Моделирование проводили для одной частицы диаметром d . При этом использовали модифицированное уравнение (1):

$$F(d) = \frac{F_0}{2\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{L_1}^{L_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S_{11}}{L^2} \cos^2 \left[\arctg \left(\frac{y}{L} \right) \right] \lambda^2 y dy dL d\lambda.$$

На рис. 2, а изображена зависимость потока излучения на примере частицы пыли для различных длин волн светового излучения, испускаемого источником света [10]. Согласно данной зависимости на поток излучения рассеянного света можно повлиять выбором подходящей длины волны так, чтобы пылемер был чувствителен к конкретному диапазону радиусов частиц пыли. Иными словами, выбором подходящей длины волны можно настроить пылемер так, чтобы он имел более высокую чувствительность именно к респираторной фракции.

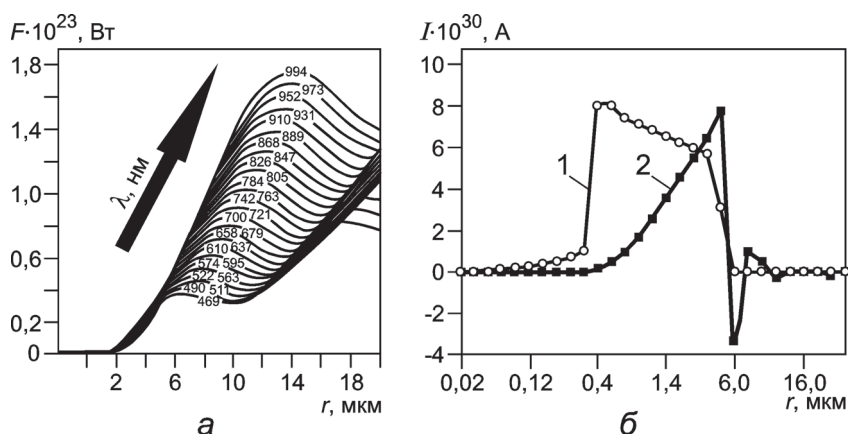


Рис. 2. Зависимость потока излучения рассеянного светового излучения на примере одной частицы пыли для диапазона длин волн λ (а) и выходной сигнал датчика пылемера (б) для двух серий измерений (1, 2)

Функция преобразования пылемера (см. рис. 2, б) была установлена расчетом. Из рисунка следует, что датчик имеет повышенную чувствительность именно к малым частицам, которые являются респираторной фракцией пыли в воздухе. Эти результаты являются отличными предпосылками для правильного функционирования датчика. Реальная ситуация, однако, может оказаться сложнее.

Структурная схема пылемера приведена на рис. 3. Датчик б чувствителен только к световому излучению, рассеянному от частиц пыли. Датчик расположен под углом $\Theta = 70^\circ$ к направлению первичного светового излучения $\lambda = 950$ нм, которое генерирует инфракрасный LED-диод. Первичное световое излучение модулировано частотой 1 кГц.

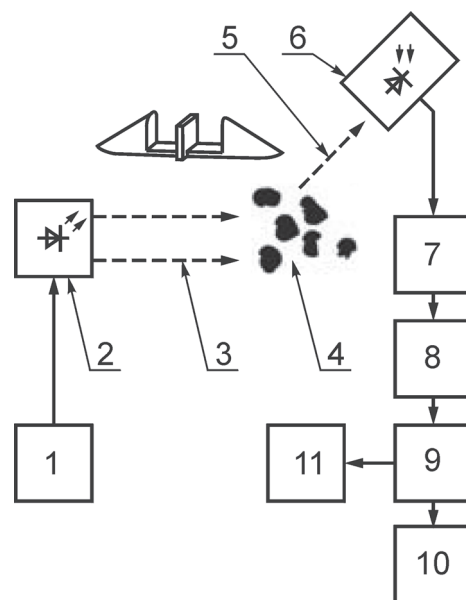


Рис. 3. Структурная схема пылемера, основанного на принципе рассеивания света:

1 — генератор; 2 — источник модулированного светового излучения; 3 — падающее световое излучение; 4 — частицы пыли; 5 — рассеянное световое излучение; 6 — датчик светового излучения; 7 — усилитель сигнала; 8 — фильтр и схема трансформации сигналов; 9 — блок аналогового выхода; 10 — блок обработки измерительных данных; 11 — дисплей

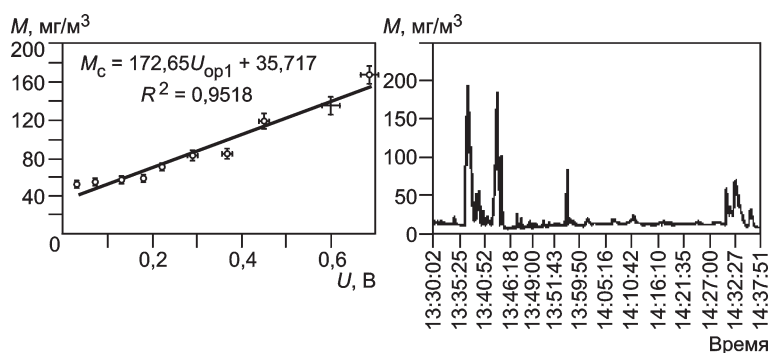


Рис. 4. Результаты калибровки пылемера OP1 (а) и on-line измеренные данные (б) массовой концентрации респираторной фракции пыли после его калибровки

В качестве светочувствительного датчика использовали инфракрасный фотодиод с надлежащей оптикой. Он работает в импульсном режиме для снижения влияния нагрева. Выходной электрический ток датчика преобразуется в напряжение, которое отображается на семисегментном LED-дисплее и обрабатывается компьютером.

Все оптические пылемеры, основанные на принципе рассеяния света на частицах пыли, должны быть калиброваны при помощи гравиметрического метода в комбинации с циклоном непосредственно на месте измерения рядом с источником пыли. Пылемер OP1 калибровали в промышленных условиях.

Функция преобразования (рис. 4, а) получена путем регрессивного анализа данных. Она использована в программе обработки измеренных данных в измерительной цепочке оптического пылемера. Калиброванный таким образом пылемер был подготовлен для on-line измерения респираторной фракции массовой концентрации пыли (см. рис. 4, б).

Заключение. Необходимость развития рассматриваемых приборов, вероятно, не нуждается в дискуссии, особенно если это касается охраны окружающей среды и здоровья человека. Не последнюю роль здесь играют и экономические соображения, связанные с эмиссионными квотами крупных производителей при чрезмерной концентрации пыли. Именно это является стимулирующим фактором при исследовательской деятельности в данной области.

В статье описан оптический метод измерения массовой концентрации респираторной фракции пыли в воздухе. По сравнению с механическим методом селекции частиц пыли циклоном, функционирование которого в большой мере зависит от скорости движения воздуха с частицами пыли, предложенный оптический метод с электронной настройкой чувствительности к респираторной фракции пригоден для непрерывного измерения массовой концентрации пыли. Видимо, единственный его недостаток связан с калибровкой при помощи референсного гравиметрического метода.

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Центра исследований управления техническими экологическими и человеческими рисками при непрерывном развитии продукции и товаров в машиностроении» (IMTS:26220120060) при поддержке программы «Исследования и развитие», финансируемой Европейским фондом регионального развития.

Л и т е р а т у р а

1. **Mishchenko M. I., Hovenier J. W., Travis L. D.** Light scattering by nonspherical particles: Theory, measurements, and applications. San Diego: Acad. Press, 2000.

2. **Hong S.-K., Winter J.** Size dependence of optical properties and internal structure of plasma grown carbonaceous nanoparticles studied by in situ Rayleigh-Mie scattering ellipsometry // J. Appl. Phys. 2006. 100:064303.

3. **Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Барышев Е. Ю.** Восстановление информации с оптических датчиков пылевой компоненты собственной внешней атмосферы космического аппарата // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 32—40; **Semkin N. D., Voronov K. E., Baryshev E. Y.** Regeneration of information from optical sensors of the dust component of the natural outer atmosphere of a space vehicle // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 487—493.

4. **Кесова Л.А. и др.** Емкостный полимер // Измерительная техника. 1990. № 1. С. 55—57; **Kesova L. A. e. a.** Capacitative dust monitor // Measurement Techniques. 1990. V. 33. N 1. P. 89—92.

5. **Онищенко А. М., Ивашев А. В.** Повышение точности измерений концентрации газов и пыли в шахтной атмосфере // Измерительная техника. 1994. № 2. С. 64—68; **Onishchenko A. M., Ivashev A. V.** Improved accuracy in measuring gas and dust concentrations in mine atmospheres // Measurement Techniques. 1994. V. 37. N 2. P. 229—234.

6. **Иवासив И. Б.** Алгоритмы и процедуры градуировки пылемеров с ограниченным временем пробоотбора // Измерительная техника. 1996. № 1. С. 59—62; **Ivasiv I. B.** Algorithms and procedures for calibration of dust monitors with limited sampling time // Measurement Techniques. 1996. V. 39. N 1. P. 105—110.

7. **Карпов О. В. и др.** Наночастицы в атмосферном воздухе. Методы измерения // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 31—34; **Karpov O. V. e. a.** Nanoparticles in ambient air. Measurement methods // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 3. P. 269—274.

8. **Красовский П. А. и др.** Проблемы метрологического обеспечения измерений параметров наночастиц в технологических средах // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 8—15; **Krasovskii P. A. e. a.** Metrological support to parameter measurement for nanoparticles in technological media // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 449—458.

9. **Красовский П. А. и др.** Исследование метрологических характеристик комплекса аппаратуры для измерений параметров наночастиц в природных и технологических средах // Измерительная техника. 2010. № 1. С. 3—8; **Krasovskii P. A. e. a.** Metrological characteristics investigation of equipment complex for measurement of nanoparticles parameters in natural and technological environments // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 1. P. 2—9.

10. **Gmiterko A., Slosarčik S., Dovica M.** Algorithm of Nonrespirable Dust Fraction Suppression Using an Optical Transducer of Dust Mass Concentration // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1998. V. 47. N 5. P. 1228—1233.

11. **Barber P. V., Yeh C.** Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies // Appl. Opt. 1975. V. 14. P. 2864—2872.

12. **Bohren C., Huffman D. R.** Absorption and Scattering of Light by Small Particles. N.Y.: John Wiley & Sons. Inc., 1983.

13. **Van de Hulst H. C.** Light Scattering by Small Particles. N.Y.: John Wiley, 1957.

14. **Kerker M.** The Sattering of Light. N.Y.: Acad. Press, 1969.

15. **Mie G.** Beiträge zur optik trüber Median speziell kolloidaler Metallosungen // Ann. Physik. 1908. V. 25. P. 377—445.

16. **Gmiterko A., Kelemen M.** Mechatronics approach to nonrespirable dust fraction suppression in the dust mass concentration measurement 2005 // Eng. Mechanics. 2005. V. 12. N 3. P. 201—208.

Дата принятия 04.04.2013 г.