

УДК 543.421 : 543.6

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.78148

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЫЛИ, ИНВАРИАНТНЫЕ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

©А. В. Вовна, Д. Г. Корниенко, В. Ф. Примиский

Разработана модель процесса взаимодействия оптического излучения с полидисперсной пылевой средой. Модель позволила получить характеристику спектрального ослабления оптического излучения полидисперсным пылевым аэрозолям. Для коррекции результатов измерений предложено использовать двулучевой способ, позволяющий восстановить функцию распределения. Применение различных структурно-схемных решений: инвариантных, двухканальных, двухтактных, конструктивного исполнения элементов конструкции позволяет изменять технические, метрологические характеристики пылемеров в широком диапазоне измерений, снизить основную приведенную погрешность измерения с 5 % до 1 %

Ключевые слова: концентрация, пыль, дисперсность, функция распределения, измеритель, модель, точность, инвариантная схема

The model of the interaction between optical radiation with the polydisperse dust environment has been developed. The model helped to obtain the characteristic of spectral attenuation of optical radiation by polydisperse dust aerosol. For the measurement results correction it is proposed to use dual-beam method, which allows to recover the distribution function. The use of various structural and circuit design: invariant, two-channel, two-stroke, design elements usage allows to change the technical, metrological characteristics of dust meters over a wide measurement range, reducing the basic reduced error of measurement from 5 % to 1 %

Keywords: concentration, dust, dispersion, distribution function, meter, model accuracy, invariant schema

1. Введение

Повышение уровня экологической безопасности требует изучения возможных изменений концентрации пылегазовых компонентов в атмосфере рабочей зоны промышленных предприятий и определения мест повышенной концентрации ее опасных компонентов [1]. Это требует целенаправленной обработки имеющихся статистических данных, как в Украине, так и за рубежом, а также проведение экспериментальных исследований рабочими быстродействующими средствами измерения концентрации пылегазовых компонентов в атмосфере промышленных предприятий [2, 3].

Наличие агрессивной среды и большого количества дестабилизирующих факторов, влияющих на результаты измерений [4], отсутствие быстродействующих средств измерения параметров запыленности, не позволили до настоящего времени создать аналитические измерители, обеспечивающие непрерывное получение информации об изменении концентрации опасных составляющих в пылевоздушной смеси. Поэтому, экологический мониторинг и измерительный контроль запыленности в атмосфере промышленных предприятий является актуальной задачей.

Одной из важных характеристик измерителей концентрации пыли является стабильность коэффициента передачи первичного измерительного преобразователя (ПИП), который положен в основу работы пылемера. Нестабильность коэффициента преобразования ПИП, в результате тяжелых условий эксплуатации измерителей концентрации пыли (пылемеров): температуры до 600–700 °С, влажности до 90–100 %, вибрации, магнитных и электрических полей, старения электронных и загрязнения оптических элементов схемы пылемеров, приводит к увеличению погрешности измерений, потери чувствительности. В

большинстве исследований по стабилизации коэффициента преобразования ПИП пылемеров внимание уделяется конструктивно-технологическим методам. Вопрос структурно-схемного решения стабилизации коэффициента преобразования ПИП исследованы локально и избирательно.

2. Анализ литературных данных

Из проведенного анализа работ [5, 6] установлено, что для измерения концентрации пыли в диапазоне от 0 до 2000 мг/м³, при дисперсности частиц от 1 до 10 мкм, наибольшее быстродействие (не более 10 с) имеют оптический и пьезоэлектрический методы. Пьезоэлектрический метод позволяет выполнять непрерывные измерения концентрации пыли. Основными недостатками этого метода: аппаратно-программная сложность, нелинейность характеристик преобразования (от 100 мг/м³), влияние изменения влажности, температуры, давления и скорости воздуха на показатели точности измерителя.

Оптические методы имеют достаточно простую аппаратно-программную реализацию и обладают следующими преимуществами [7, 8]:

- быстродействие измерителя (от 10 до 100 мс);
- высокая разрешающая способность измерений (± 1 мг/м³);
- возможность определения ее дисперсного состава (от 0,1 до 150 мкм).

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее перспективным методом является оптико-абсорбционный, из-за перечисленных преимуществ. Одним из них – минимальное количество дестабилизирующих факторов, при погрешности измерений не более ± 10 мг/м³. Однако данный метод имеет ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются высокая чувстви-

тельность оптоэлектронных компонент измерителя к изменению температуры, влияние дисперсного состава пыли на значение измеряемой концентрации и запыленность оптических элементов. Перечисленные недостатки могут быть потенциально устранены путем разработки методов учета и компенсации изменения данных факторов. При этом возникает потенциальная возможность получения дополнительной информации о дисперсном составе пыли в режиме реального времени. Поэтому, оптико-абсорбционный метод контроля положен в основу разработки измерителя концентрации пыли в дымовых газах промышленных предприятий.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение точности и быстродействия измерительного контроля концентрации пыли с учетом ее дисперсности в дымовых газах промышленных предприятий.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработать модель оптического измерительного канала концентрации пыли в дымовых газах промышленных предприятий;

- провести исследования разработанной математической модели и сформировать требования к аппаратной части измерителя концентрации пыли;

- провести исследования по стабилизации коэффициента преобразования ПИП пылемеров за счет использования инвариантных структурных схем построения пылемеров.

4. Материалы и методы исследования

При создании математической модели оптического измерительного канала концентрации пыли, разработана модель спектрального показателя ослабления для полидисперсной пылевой среды ($K(\lambda, C_p, D_{п})$). Концентрация пыли является не единственным фактором, влияющим на поглощающие свойства дисперсных систем [9], так как абсорбция излучения зависит от формы, состояния поверхности частиц. Существует зависимость показателя поглощения $K(\lambda, C_p, D_{п})$ от длины волны λ и дисперсности частиц $D_{п}$.

Для определения коэффициента ослабления (Qосл) использована оптическая теорема квантовой механики, названная Ван де Хюльст [10] теоремой ослабления. Она описывается таким выражением:

$$Q_{осл}(m(\lambda), \alpha_\lambda) = \frac{2}{\alpha_\lambda^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (1)$$

где $\alpha_\lambda = k(\lambda) \cdot r$ – усредненный параметр дифракции в относительных единицах; r , мкм – радиус сферической частицы; λ , мкм – длина волны оптического излучения; $k(\lambda) = 2\pi / \lambda$ – волновое число в свободном пространстве; $m(\lambda) = \nu - i \cdot \chi(\lambda)$ – комплексный показатель преломления; ν – показатель преломления излучения в воздухе, $\nu = 1,0003$; $i = \sqrt{-1}$; n –

положительные целые числа, $\chi(\lambda)$ – показатель поглощения излучения частицами пыли, который характеризует затухание волны на поглощающих центрах неоднородной среды; данный показатель изменяется в зависимости от длины волны оптического излучения и определяется соотношением [11, 12]:

$$\chi(\lambda) = -0,77060 + 2,04696 \cdot 10^6 \cdot \lambda. \quad (2)$$

Коэффициенты Ми a_n и b_n в (1), установленные Ван де Хюльстом, рассчитываются в соответствии с рекуррентными выражениями, удобными для программирования [11]:

$$a_n(m(\lambda), \alpha_\lambda) = \frac{\left(\frac{A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda))}{m(\lambda)} + \frac{n}{\alpha_\lambda} \right) \cdot \text{Re}(\xi_n(\alpha_\lambda)) - \text{Re}(\xi_{n-1}(\alpha_\lambda))}{\left(\frac{A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda))}{m(\lambda)} + \frac{n}{\alpha_\lambda} \right) \cdot \xi_n(\alpha_\lambda) - \xi_{n-1}(\alpha_\lambda)}; \quad (3)$$

$$b_n(m(\lambda), \alpha_\lambda) = \frac{\left(m(\lambda) \cdot A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\alpha_\lambda} \right) \cdot \text{Re}(\xi_n(\alpha_\lambda)) - \text{Re}(\xi_{n-1}(\alpha_\lambda))}{\left(m(\lambda) \cdot A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\alpha_\lambda} \right) \cdot \xi_n(\alpha_\lambda) - \xi_{n-1}(\alpha_\lambda)}, \quad (4)$$

где $\xi_n(\alpha_\lambda)$, $A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda))$ – функции Рикати-Бесселя вещественного аргумента, которые выражаются через комплексные круговые функции Бесселя первого рода порядка $(n+1/2)$ и определяются с помощью следующих рекуррентных соотношений [13]:

$$\xi_n(\alpha_\lambda) = \frac{2n-1}{\alpha_\lambda} \cdot \xi_{n-1}(\alpha_\lambda) - \xi_{n-2}(\alpha_\lambda); \quad (5)$$

$$A_n(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)) = -\frac{n}{\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)} + \left[\frac{n}{\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)} - A_{n-1}(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Начальные условия для выражений (5) и (6) записываются в виде:

$$\xi_0(\alpha_\lambda) = \sin(\alpha_\lambda) + j \cdot \cos(\alpha_\lambda); \quad (7)$$

$$\xi_{-1}(\alpha_\lambda) = \cos(\alpha_\lambda) - j \cdot \sin(\alpha_\lambda); \quad (8)$$

$$A_0(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)) = \text{ctg}(\alpha_\lambda \cdot m(\lambda)). \quad (9)$$

С учетом (1) и диапазона дисперсности частиц от D_{min} до D_{max} мкм, выражения для описания спектрального показателя ослабления зондирующего излучения полидисперсным пылевым аэрозолем с дифференциальной функцией распределения частиц по размерам $f(D)$, определяется соотношением [9]:

$$K(\lambda, C_{II}, D_{II}) = \frac{3 \cdot C_{II} \cdot \int_{D_{min}}^{D_{max}} Q_{осл}(m(\lambda), \alpha_\lambda) \cdot D_{II}^2 f(D_{II}) dD_{II}}{2 \cdot \rho_k \cdot \int_{D_{min}}^{D_{max}} D_{II}^3 f(D_{II}) dD_{II}}, \quad (10)$$

где ρ_k – плотность материала частиц, для угольной пыли $\rho_k = 1,2 \cdot 10^6$ г/м³.

При исследовании полидисперсных пылевых сред, применение оптического метода ограничено снизу условием для усредненного параметра дифракции

$$\alpha_{32} = (\pi \cdot D_{32}) / \lambda_{min} < 30 \quad [9];$$

таким же образом устанавливается ограничение сверху:

$$\lambda_{max} < 0,1 \cdot \pi \cdot D_{32},$$

где D_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр частиц, определяемый выражением:

$$D_{32} = \left(\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 \cdot f(D) dD \right) \div \left(\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^2 \cdot f(D) dD \right), \quad (11)$$

где $f(D)$ – логнормальная функция распределения частиц по размеру с параметрами распределения a, b, β , которые устанавливаются на основе экспериментальных данных для определенных условий.

При исследовании полидисперсной среды угольной пыли, установлена функция распределения $f(D)$ плотности вероятности данных частиц по размеру. Для наиболее распространенной марки угля «Т», установлена [14] функция распределения взвешенных частиц угольной пыли по дисперсному составу, график которой приведен на рис. 1. При этом устанавливаются значения модального размера частиц $d_0=1,95$ мкм и полуширина распределения $\delta=1,353$ мкм, на основе которых определены следующие параметры логнормального распределения: $b=1,653$ и $\beta=3,79 \cdot 10^5$.

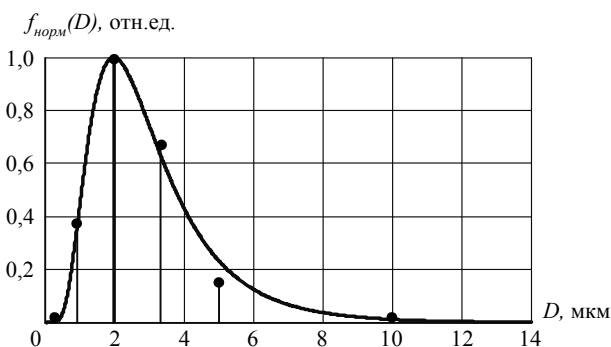


Рис. 1. Нормированные экспериментальные значения (●) и аппроксимированная функция распределения пыли по фракциям

Из анализа характеристики распределения взвешенных фракций угольной пыли в воздухе рудничной атмосферы для очистных забоев пологих

пластов (рис. 1), можно сделать вывод, что преобладают частицы с дисперсностью от $D_{min}=1$ до $D_{max}=6$ мкм, которые обладают повышенной взрывообразующей способностью. Нормирующий множитель a , в функции распределения частиц, с учетом данных пределов и параметров распределения, определяется следующим выражением:

$$a = \frac{1}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{1}{D} \cdot \exp(-b \cdot \ln(\beta \cdot D)^2) dD} = 0,812. \quad (12)$$

При интегрировании выражения (11) в данных пределах, установлено, что средний объемно-поверхностный диаметр взвешенных частиц угольной пыли марки «Т» очистного забоя, составляет $D_{32} = 3,78$ мкм. В таком случае, диапазон длин волн оптического излучения для измерителя концентрации пыли, с учетом ограничений снизу и сверху, составит соответственно: $\lambda_{min} > (\pi \cdot D_{32}) / 30$, $\lambda_{min} > 0,40$ мкм и $\lambda_{max} < 0,1 \cdot \pi \cdot D_{32}$, $\lambda_{max} < 1,19$ мкм.

На основе проведенных исследований установлено значение $Q_{осл}$ (1) от длины волны λ зондирующего излучения. При этом составлен алгоритм программы расчета коэффициентов уравнения Ми a_n и b_n , на основе рекуррентных выражений (3)–(9). Количество шагов итераций N в составленной программе определяется расчетной точностью вычислений, и данные коэффициенты считаются найденными, при выполнении условия [11]:

$$\left(\sum_{n=1}^N (2n+1) \cdot \text{Re}(a_n + b_n) \right) \cdot 10^{-8} > (2N+1) \cdot \text{Re}(a_{N+1} + b_{N+1}). \quad (13)$$

Для получения характеристик преобразования оптического измерителя концентрации пыли, выбраны его оптоэлектронные компоненты. В качестве светоизлучающих диодов (СИД) предложено использовать ультра яркие светодиоды фирмы CREE C503B-BAN (длина волны излучения $\lambda=0,47$ мкм), C503B-GAN ($\lambda=0,527$ мкм) и C503B-RAN ($\lambda=0,624$ мкм) [15]. Данные СИД имеют максимальную силу света от 23500 мкд (C503-BCN и C503-RAN) до 46100 мкд (C503-GCN) при питании постоянным током амплитудой 100 мА. В качестве фотодиодов (ФД) предложено использовать ФД фирмы Vishay Semiconductors – BPW21R [16], которые имеют максимальный коэффициент пространственного и волнового согласования с выбранными СИД. ФД типа BPW21R обладает высокой интегральной чувствительностью (не менее 0,82 А/Вт) к спектру излучения с длинами волн от $\lambda_1=0,347$ до $\lambda_2=0,813$ мкм при высоких показателях быстродействия (время нарастания импульса 3,1 мкс, время спада 3,0 мкс).

4. Результаты исследования

Рассчитаны параметры и поставлены требования к оптическим линзам системы коллиматора, получена зависимость коэффициента ввода зондиру-

щего излучения в объектив фотоприемника от длины базы ОК, который составляет не менее 85 % при длине базы $l=135$ мм, что позволило обеспечить максимальную чувствительность измерения концентрации пыли.

Разработанная модель измерительного канала концентрации пыли в диапазоне ее измерений от 0 до 2000 мг/м^3 , учитывает изменение доминирующего дестабилизирующего фактора – дисперсности угольной пыли, что позволило оценить дополнительные погрешности измерений концентрации пыли от изменения данного фактора. Зависимости $Q_{осл}$ оптического излучения (1) при $\alpha_\lambda = \pi \cdot D / \lambda$ в диапазоне изменения длины волны от $\lambda_{\min} = 0,40$ мкм до $\lambda_{\max} = 1,19$ мкм представлены на рис. 2.

Анализ полученной зависимости (рис. 2) показал, что при длине волны $0,624$ мкм (С503В-РАН) значение фактора эффективного ослабления $Q_{осл}$ (1), при диаметре частиц пыли 3 мкм, составляет $1,512$, с уменьшением D до 1 мкм $Q_{осл}$ возрастает до $2,165$, что приводит к возрастанию дополнительной относительной погрешности измерений концентрации пыли при изменения D пыли в диапазоне от 1 до 3 мкм и составляет – $43,2$ %.

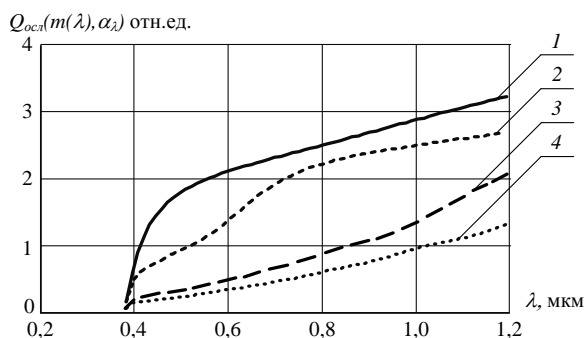


Рис. 2. Зависимость фактора эффективности ослабления $Q_{осл}$ от изменения длины волны λ в диапазоне от $0,40$ до $1,19$ мкм: 1 – зависимость $Q_{осл}$ монодисперсной фракции угольной пыли, с диаметром частиц $D=1$ мкм; 2 – $D=3$ мкм; 3 – $D=5$ мкм; 4 – $D=6$ мкм

При этом абсолютное значение дополнительной погрешности измерений концентрации угольной пыли составит – 1300 мг/м^3 в диапазоне измерений от 0 до 2000 мг/м^3 при изменении дисперсного состава угольной пыли от 1 до 3 мкм. Полученный результат в 26 раз превышает величину основной абсолютной погрешности измерений концентрации пыли ($\pm 10 \text{ мг/м}^3$) в указанном диапазоне ее измерений для существующих измерителей.

С увеличением дисперсности частиц пыли от 3 до 6 мкм, $Q_{осл}$ убывает до $0,371$, что составляет $75,5$ % дополнительной относительной погрешности ее измерений. Данное значение соответствует величине дополнительной абсолютной погрешности из-

мерений концентрации пыли 2300 мг/м^3 , что в 46 раз превышает величину основной погрешности измерений ее концентрации. Аналогичные исследования проведены для выбранных длин волн оптического излучения, полученные результаты коррелированы между собой.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что измерительный контроль концентрации пыли в диапазоне изменения ее диаметра от 1 до 6 мкм, возможен только при учете и компенсации данного фактора. При этом необходимо контролировать изменение параметров функции распределения частиц по дисперсности, что позволит повысить точность измерений концентрации пыли. Для коррекции результатов измерений концентрации пыли путем динамической оценки параметров функции распределения ее частиц по размерам, предложено использовать двулучевой способ измерений концентрации и дисперсности пыли [17, 18]. Данный способ позволяет оперативно восстановить функцию распределения на основе измеренной экспериментальной информации при сравнении отношений спектральных коэффициентов пропускания двух и более оптических излучений с разными длинами волн. При проведении экспериментальных исследований доказано, что предложенный способ позволяет уменьшить величину дополнительной погрешности от изменения дисперсности пыли до значения основной погрешности измерений ее концентрации ($\pm 10 \text{ мг/м}^3$), что вполне удовлетворяет поставленным техническим требованиям к измерителям концентрации пыли в дымовых газах промышленных предприятий.

4. 1. Инвариантные схемы пылемеров повышенной точности. Одноканальная структурная схема переносного оптического пылемера с двойным ходом луча

На рис. 3, 4 представлены оптический пылемер типа ВОГ-2 украинского производителя «Украналит», как наиболее типичный по структурной схеме построения [19]. По аналогичному принципу строятся пылемеры российского производителя: ИКВЧ «Аналитприбор» (Смоленск), Gravimat SHC 500, фирма ZIK (ФРГ) [20, 21].

Принцип действия измерителя ВОГ-2 состоит в измерении изменения значения оптического сигнала, прошедшего от излучателя до фотоприемника при отсутствии и наличии пыли. Блок оптический включает в себя излучатель, фотоприемник, модулятор излучателя, формирователь сигналов, усилитель, преобразователь $+5\text{В} \rightarrow \pm 5\text{В}$, цифровой термометр, измеряющий температуру внутри блока оптического, измеритель температуры в газоходу, датчик которой находится в конце зонда. В конце зонда установлено сферическое зеркало. Зонд содержит в себе заслонки, перекрывающие поток газа через прибор. Прибор работает следующим образом (рис. 4).

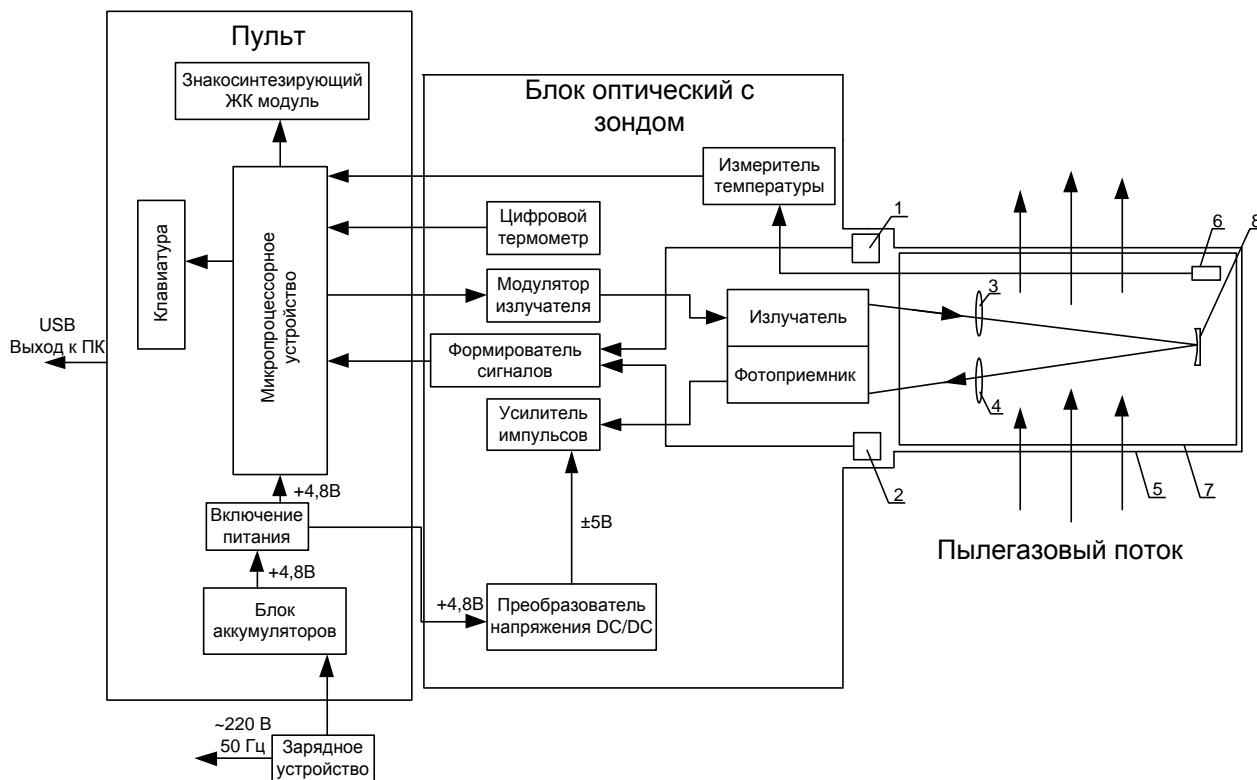


Рис. 3. Функциональная схема измерителя ВОГ-2: 1, 2 – датчики положения трубы – заслонки; 3 – линза-коллиматор; 4 – линза-объектив; 5 – зонд; 6 – датчик температуры; 7 – заслонка вращающаяся; 8 – отражатель



Рис. 4. Пылемер ВОГ-2

Микропроцессорное устройство формирует импульсы частотой 1 кГц, которые через модулятор подаются на светодиод, излучающий в узкой полосе поток на длине волны около 0,63 нм. Излучения от светодиода собирается линзой 3 и направляется на сферическое зеркало 8, отраженный сигнал от которого собирается второй линзой коллиматором 4 на фотоприемники. Сигнал с фотоприемника через усилитель подается на аналоговый вход микропроцессорного устройства. Сигналы с выходов датчиков положения заслонки (открыта или закрыта) через формирователь сигналов подаются на цифровые входы микропроцессора.

При включении пылемера, помещенного в газозоход, причем так, чтобы прорезы в зонде совпадали с направлением исследуемого потока газа, а заслонка зонда – закрытая, после непродолжительного прогрева, в память микропроцессора записывается значение I_0 . Это значение I_0 используется при дальнейших измерениях как значение сигнала при отсутствии пыли в измерительном канале. После открытия заслонки и установления показаний прибора с фотоприемника считывается значение сигнала I_v .

Далее рассчитывается значение оптической плотности анализируемого газового потока по формуле:

$$D_U = \lg \frac{I_0}{I_U}. \quad (9)$$

Концентрации пыли по формуле:

$$C = \alpha \cdot \beta(T) \cdot C_M \cdot \frac{D_U}{D_M}, \quad (10)$$

где α – эмпирический коэффициент, зависящий от свойств пыли, проходящих через пылемер частиц пыли; $\beta(T)$ – эмпирический коэффициент, определяемый условиями измерения, C_M – индекс, соответствующий калибровке пылемера «массовым» методом, а D_M и C_M – соответственно значения оптической плотности калиброванного потока газа и концентрации пыли в этом потоке; D_U – оптическая плотность исследуемого пылевого потока газа.

За счет введения коэффициентов α , β показания пылемера остаются стабильными в течение длительного времени.

Оптические пылемеры позволяют быстро провести измерений значительных концентраций пыли до 2000 мг/м³. Основной проблемой оптических методов является методическая погрешность связана с тем, что фактически измеряется не массовая концентрация пыли в мг/м³, а плотность пылегазового потока, которая является функцией концентрации и ее надо определять для каждого вида пыли отдельно и соответственно проводить калибровку по гравиметрическому методу. Чаще всего оптические пылемеры используются в теплоэнергетике, металлургии.

4. 2. Оптические инвариантные пылемеры повышенной точности

Для стабилизации коэффициента передачи ПВП оптического пылемера разработаны две структурные схемы инвариантных оптических измерителей пыли [22–25]. На рис. 5 приведена функциональна схема двухканального пылемера.

Оптический пылемер по рис. 5 работает следующим образом. Измерительная камера 1 размещается в дымовой трубе, перпендикулярно движению дымовых газов с концентрацией пыли X_1 . Измерительная камера 1 выполнена в виде металлического цилиндра, который имеет продольные отверстия, симметрично расположенные друг напротив равно. Именно через эти отверстия и проходит беспрепятственно дымовой газ промышленного предприятий с концентрацией пыли X_1 . В торцах измерительной камеры расположен источник излучения 2 световой поток от которого в видимой части спектра, с

помощью линзы 3 превращается в параллельный поток света, который поглощается пылью с концентрацией X_1 в дымовой трубе. Ослабленный световой поток пропорционален концентрации X_1 поступает на первый фотоприемник 5. На выходе первого фотоприемника 5 формируется сигнал: $Y_1 = K X_1$, где K – коэффициент преобразования оптического пылемера.

Одновременно световой поток от источника излучения поступает на калибровочный оптический фильтр 4, с фиксированным предварительно определенным и метрологически подтвержденным уровнем затемнения X_0 . Конструктивно калибровочный оптический фильтр 4 имеет в поперечном сечении форму полукруг и установлен в центре измерительной камеры 3, перпендикулярно направлению светового потока от источника излучения 2. Напротив калибровочного оптического фильтра 2, в торце измерительной камеры 1, симметрично смонтировано второй фотоприемник 6. На выходе второго фотоприемника 6 формируется сигнал ослабления светового потока $Y_2 = K \cdot (X_0 + X_1)$, который проходит в измерительной камере 3 последовательно: источник излучения 1, дымовой газ с концентрацией пыли X_1 , оптический калибровочный фильтр 4 с фиксированным уровнем затемнения X_0 .

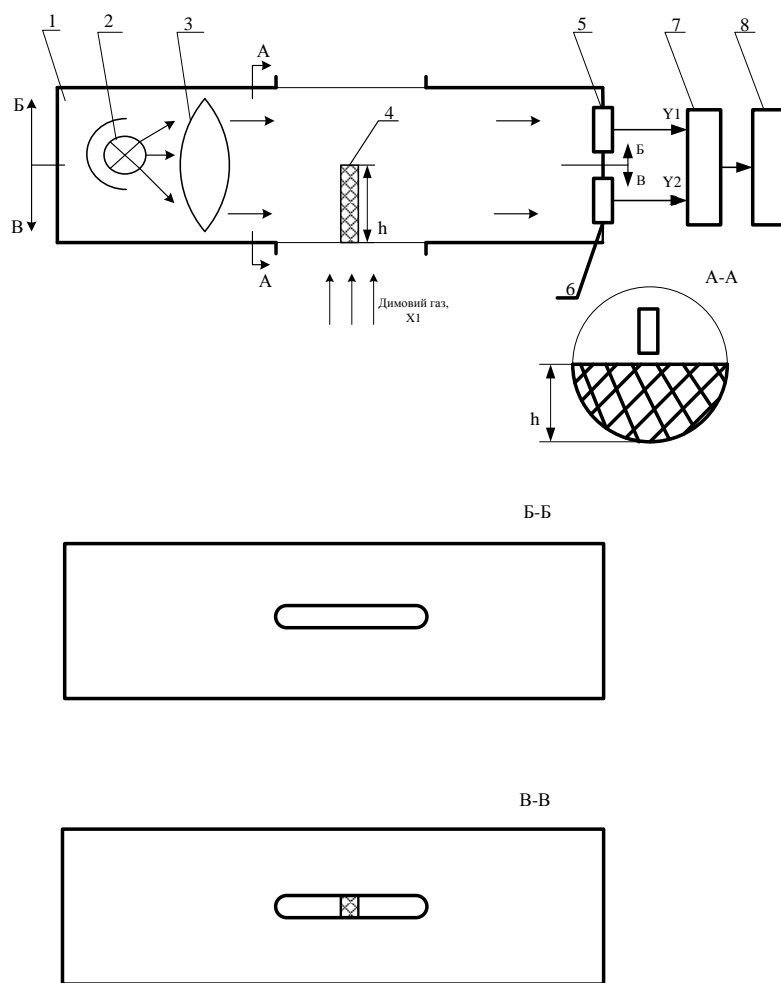


Рис. 5. Функциональная схема оптического двухканального пылемера: 1 – измерительная камера, 2 – источник излучения, 3 – фокусирующая линза, 4 – калибровочный оптический фильтр, 5 – первый фотоприемник, 6 – второй фотоприемник, 7 – вычислительное устройство, 8 – регистрирующий цифровой индикатор

Таким образом, в измерительной камере 1 оптического пылемера, одновременно формируется два разных ослабленных сигнала Y_1 и Y_2 , один из которых: Y_1 является функцией преобразования концентрации пыли X_1 , что измеряется, а второй: Y_2 , суммарной функцией преобразования концентрации пыли X_1 и оптического калибровочного фильтра 4, с фиксированным уровнем затемнения X_0 .

Сигналы Y_1 и Y_2 поступают вычислительному устройству 7, где решается система уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = KX_1; \\ Y_2 = K(X_0 + X_1) \end{cases} \quad (11)$$

относительно определения концентрации пыли X_1 :

$$X_1 = \frac{Y_1 X_0}{Y_2 - Y_1}. \quad (12)$$

Определенное значение X_1 выводится на цифровой индикатор 8.

При определении концентрации X_1 по формуле (12) отклонение коэффициента преобразования K оптического пылемера от номинального значения, в результате воздействия окружающей среды, токсичной пыли, паров луг и кислот в дымовом газе, старение источника излучения и фотоприемников, загрязнения оптических элементов схемы компенсируется. Предложенный способ обеспечивает инвариантность (независимость) измерения X_1 от дестабилизирующих факторов. При измерения пыли в дымовых, высокотоксичных и радиоактивных газов предложенным способом отклонения коэффициента преобразования K от номинального значения не приводят к погрешности измерения. При этом изменения коэффициента преобразования пылемера вследствие старения источника излучения других дестабилизирующих факторов: температура, давление, влага, радиоактивность, токсичность, компенсируются за счет использования калибровочного оптического фильтра и алгоритма обработки результат измерения повышается точность, уменьшается погрешность измерения.

сичной пыли, паров луг и кислот в дымовом газе, старение источника излучения и фотоприемников, загрязнения оптических элементов схемы компенсируется. Предложенный способ обеспечивает инвариантность (независимость) измерения X_1 от дестабилизирующих факторов. При измерения пыли в дымовых, высокотоксичных и радиоактивных газов предложенным способом отклонения коэффициента преобразования K от номинального значения не приводят к погрешности измерения. При этом изменения коэффициента преобразования пылемера вследствие старения источника излучения других дестабилизирующих факторов: температура, давление, влага, радиоактивность, токсичность, компенсируются за счет использования калибровочного оптического фильтра и алгоритма обработки результат измерения повышается точность, уменьшается погрешность измерения.

4. 3. Одноканальный двухтактный оптический пылемер.

Усовершенствованная схема одноканального, двухтактного оптического пылемера приведена на рис. 6 [26, 27].

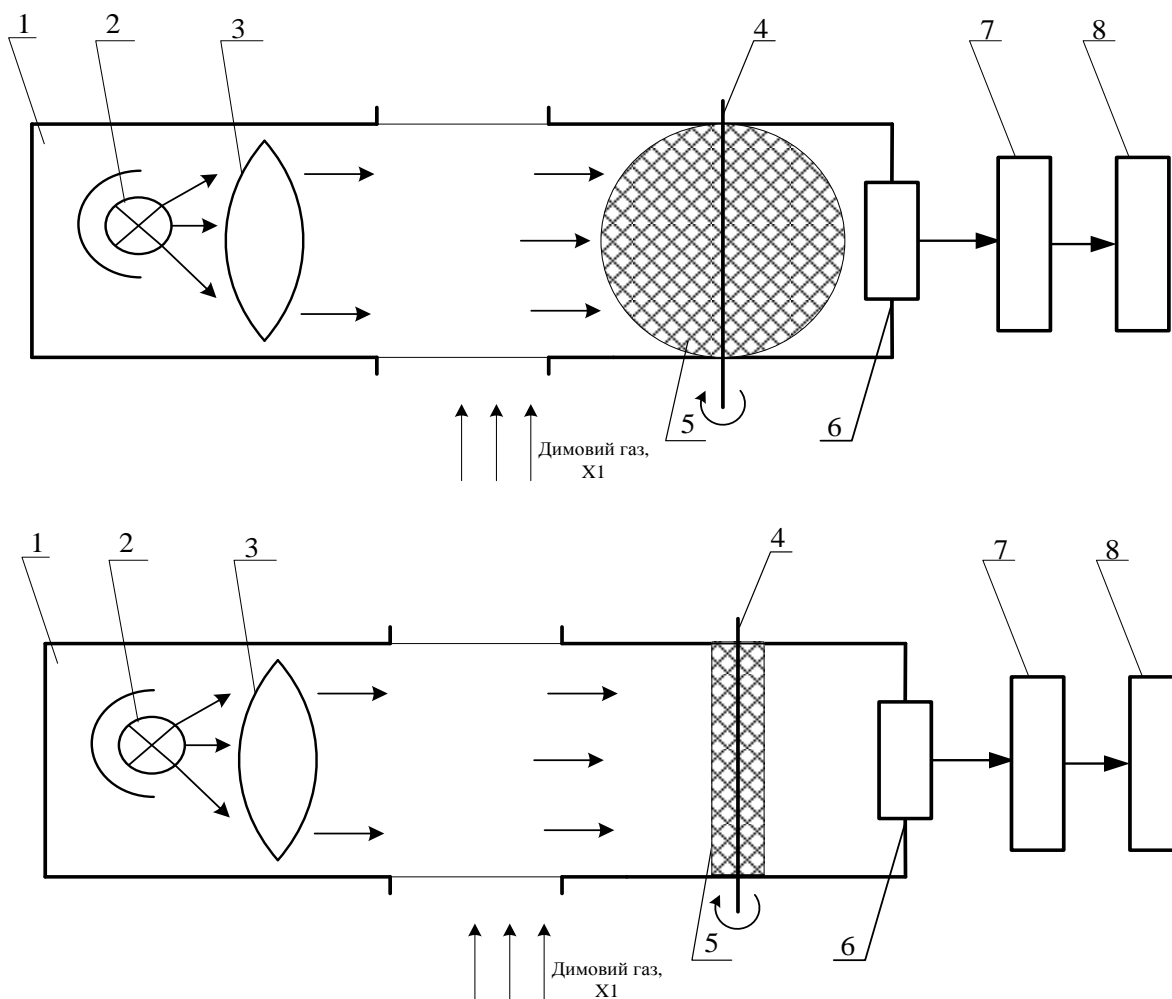


Рис. 6. Функциональная схема одноканального двухтактного оптического пылемера: 1 – измерительная камера, 2 – источник излучения, 3 – фокусирующая линза, 4 – поворотная ось, 5 – калибровочный фильтр, 6 – фотоприемник, 7 – вычислительное устройство, 8 – регистрирующий цифровой индикатор

Оптический измеритель пыли работает в два такта измерения следующим образом:

В первом такте измерения перед началом работы, с помощью поворотной оси 4, калибровочный фильтр 5 занимает положение параллельно световому потоку.

Измерительная камера 1 размещается в дымовой трубе, перпендикулярно движению дымовых газов с концентрацией пыли X_1 . Световой поток от источника излучения 2, в видимой части спектра, с помощью линзы 3 превращается в параллельный поток света, который поглощается пылью с концентрацией X_1 в дымовой трубе. Ослабленный световой поток пропорционален концентрации X_1 поступает на фотоприемник 6. На выходе фотоприемника 6 формируется сигнал: $Y_1 = K \cdot X_1$, где K – коэффициент преобразования оптического пылемера. Сигнал Y_1 поступает в вычислительное устройство 7.

Во втором такте измерения с помощью поворотной оси 4 калибровочный фильтр 5 занимает положение перпендикулярно направлению светового потока от источника излучения 2 (рис. 6). На выходе фотоприемника 6 формируется сигнал ослабленного светового потока: $Y_2 = K \cdot (X_0 + X_1)$, который проходит в измерительной камере 3 последовательно: источник излучения 1, дымовой газ с концентрацией пыли X_1 , оптический калибровочный фильтр 5 с фиксированным уровнем затемнения X_0 .

Таким образом в измерительной камере 1 оптического измерителя пыли, попеременно формируется два разных ослабленных сигнала Y_1 и Y_2 , один из которых является функцией преобразования концентрации пыли X_1 , что измеряется, а второй суммарной функцией преобразования концентрации пыли X_1 и оптического калибровочного фильтра 5 с фиксированным уровнем затемнения X_0 .

Сигналы Y_1 и Y_2 поступают вычислительному устройству 7, где решается система уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = K \cdot X_1; \\ Y_2 = K(X_0 + X_1) \end{cases} \quad (13)$$

относительно определения концентрации пыли X_1 :

$$X_1 = \frac{Y_1 X_0}{Y_2 - Y_1}. \quad (14)$$

Определенное значение X_1 выводится на цифровой индикатор 8.

При определении концентрации X_1 по формуле (14) отклонение коэффициента преобразования K оптического пылемера от номинального значения, в результате воздействия окружающей среды, токсичной пыли, паров луг и кислот в дымовом газе, старение источника излучения и фотоприемников, загрязнения оптических элементов схемы отсутствуют. Предложенный способ обеспечивает инвариантность (независимость) измерения X_1 от дестабилизирующих факторов. При измерениях пыли в дымовых, высокотоксичных и радиоактивных газов предложенным способом отклонения коэффициента преобразования K от номинального значения не приводят к погрешности измерения. При этом изменения коэф-

фициента преобразования пылемера вследствие старения источника излучения и других дестабилизирующих факторов: температура, давление, влага, радиоактивность, токсичность, компенсируются за счет использования калибровочного оптического фильтра и алгоритма обработки результат измерения повышается точность, уменьшается погрешность измерения.

При использовании оптических пылемеров применения инвариантных схем построения с применением физических эквивалентов (мини веса, оптического фильтра) измеряемой величины: массы, оптической плотности пылегазового потока, существенно уменьшает основные приведенные погрешности, реально достигнуты результаты менее 1 %, при уменьшении требований к технологически конструктивного исполнения прибора.

5. Выводы

Разработана модель процесса взаимодействия оптического излучения с полидисперсной пылевой средой, основанная на положениях теории относительно рассеяния и поглощения света отдельными частицами произвольного размера, которая позволила получить характеристику спектрального ослабления оптического излучения полидисперсным пылевым аэрозолем.

Результаты моделирования доказывают, что значение дополнительной погрешности измерений концентрации пыли от изменения дисперсности частиц от 1 до 6 мкм в 4 раза превышает величину основной погрешности (± 10 мг/м³) в диапазоне ее измерений от 0 до 2000 мг/м³.

Для коррекции результатов измерений предложено использовать двулучевой способ, позволяющий восстановить функцию распределения на основе измерительной информации об отношениях спектральных коэффициентов пропускания двух и более оптических излучений на разных длинах волн.

Техническая реализация предложенного способа позволила уменьшить величину дополнительной погрешности от изменения дисперсности пыли до значения основной (± 10 мг/м³), что удовлетворяет поставленным требованиям к измерителям концентрации пыли в рудничной атмосфере шахт.

Применение различных структурно-схемных решений: инвариантных, двухканальных, двухтактных, конструктивного исполнения элементов конструкции позволяет изменять технические, метрологические характеристики пылемеров в широком диапазоне. За счет этого открываются возможности высокоточного измерения как значительных концентраций пыли 0–2000 мг/м³: в дымовых газах промышленных предприятий так и проводить контроль фоновых концентраций пыли в атмосфере, на рабочих местах в закрытых помещениях, на границе санитарно-защитной зоны предприятий от 0,1 мг/м³. Применение инвариантных схем оптических пылемеров снизило основную приведенную погрешность измерения с 5 % до 1 %.

Литература

1. Eckhoff, R. K. Dust explosions in the process industries – identification, assessment and control of dust hazards

[Text] / R. K. Eckhoff. – 3-rd ed. – Gulf Professional Publishing, 2003. – 719 p.

2. Вовна, А. В. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт [Текст]: монография / А. В. Вовна, А. А. Зори, В. Д. Коренев, М. Г. Хламов. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с.

3. Вовна, О. В. Оптикоелектронні вимірювальні системи концентрації метану та пилу в рудничній атмосфері шахт [Текст]: монографія / О. В. Вовна. – Покровськ (Красноармійськ): ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. – 336 с.

4. Клименко, А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли [Текст] / А. П. Клименко. – М.: Химия, 1978. – 208 с.

5. Романченко, С. Б. Современные методы анализа формы и дисперсного состава угольной пыли [Текст] / С. Б. Романченко, И. Г. Ищук // Науч. сообщ. ННЦ-ГПИГД им. А. А. Скочинского. – М., 2007. – Вып. 333. – С. 270–286.

6. Ворошилов, Я. С. Стендовые испытания стационарного датчика контроля запыленности воздуха в горных выработках и производственных помещениях предприятий угольной промышленности [Текст] / Я. С. Ворошилов, А. А. Анисимов, В. Е. Седельников // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск «Аэрология». – 2007. – Т. 7. – С. 290–291.

7. Лисай, О. Н. Исследование состава пыли и поведения частиц пыли в воздушной среде [Текст] / О. Н. Лисай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1. – С. 191–194.

8. Романченко, С. Б. Оптические пылемеры с инфракрасными измерительными головками [Текст] / С. Б. Романченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск «Аэрология». – 2007. – Т. 7. – С. 265–272.

9. Архипов, В. А. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность [Текст]: учеб. пос. / В. А. Архипов, У. М. Шереметьева. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2007. – 136 с.

10. Van De Hulst, H. C. Light Scattering by Small Particles [Text] / H. C. van de Hulst. – N.Y.: J. Wiley, 1951. – 470 p.

11. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами [Текст] / Д. Дейрменджан. – М.: Мир, 1971. – 303 с.

12. Блох, А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов [Текст] / А. Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

13. Кафтанова, Ю. В. Рекуррентные отношения для решений дифференциальных уравнений второго порядка [Текст] / Ю. В. Кафтанова. – Харьков: ИЦ «Tiger», 1998. – 48 с.

14. Петрухин, П. М. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах [Текст] / П. М. Петрухин и др.; под ред. П. М. Петрухина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 271 с.

15. Продукция предприятия «CREE»: СИД высокой яркости [Электронный ресурс]. – MSC Technologies. – Режим доступа: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/HB/Data%20Sheets/C503V%20BAS%20BAN%20BCS%20BCN%20GAS%20GAN%20GCS%20GCN%201094.pdf>

16. Техническая документация на фотодиод серии BPW21R [Электронный ресурс]. – Vishay Semiconductors. – Режим доступа: <http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>

17. Соломічев, Р. І. Розробка двопробного вимірювача концентрації та дисперсності вугільного пилу з компенсацією температурного дрейфу [Текст] / Р. І. Соломічев, О. В. Вовна, А. А. Зорі // Вісн. Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 5 (116). – С. 36–41.

18. Соломічев, Р. І. Повышение точности оптико-абсорбционного измерителя концентрации угольной пыли

[Текст] / Р. И. Соломичев, А. В. Вовна, А. А. Зори // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2015. – Вип. 1 (28). – С. 171–180.

19. Максименко, Ю. Н. Переносной оптический пылемер ВОГ – 2 [Текст] / Ю. Н. Максименко, Е. Г. Мазан, А. К. Тимин // Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2010. – Вип. 40. – С. 81–86.

20. ФГУП «СПО «Аналитприбор» – производство газоанализаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analitpribor-smolensk.ru/>

21. SICK [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sick.com/de/en/search?text=product>

22. Автотестприлад [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aep.kiev.ua/index.php>

23. Патент України на корисну модель № 104604, G01N 15/00. Спосіб вимірювання концентрації радіоактивного пилу у викидах котлоагрегатів [Текст] / Корнієнко Д. Г. – № u201507367; заявл. 22.07.2015, опубл. 10.02.2016, бюл. № 3.

24. Патент України на корисну модель № 109425, G01N 15/02. Спосіб вимірювання концентрації пилу у димових: токсичних і радіоактивних газах промислових підприємств [Текст] / Приміський В. П., Порев В. А., Корнієнко Д. Г. – № u201601772; заявл. 25.02.2016, опубл. 25.08.2016, бюл. № 16.

25. Патент України на корисну модель № 108435, G01N 15/02. Оптичний пиломір [Текст] / Приміський В. П. – № u201601798; заявл. 11.07.2016, опубл. 11.07.2016, бюл. № 13.

26. Патент України на корисну модель № 109800 G01N 15/02. Спосіб вимірювання концентрації пилу у димових газах [Текст] / Приміський В. П., Порев В. А., Корнієнко Д. Г. – № u201601775; заявл. 25.02.2016; опубл. 12.09.2016, бюл. № 17.

27. Патент України на корисну модель № 107345, G01N 21/53. Оптичний вимірювач пилу [Текст] / Приміський В. П. – № u201601799; заявл. 25.02.2016, опубл. 25.05.2016, бюл. № 10.

References

1. Eckhoff, R. K. (2003). Dust explosions in the process industries – identification, assessment and control of dust hazards. Gulf Professional Publishing, 719.

2. Vovna, A. V., Zori, A. A., Korenev, V. D., Hlammov, M. G. (2012). Metody i sredstva analiticheskogo izmerenija koncentracii gazovyh komponent i pyli v rudnichnoj atmosfere ugol'nyh shaht. Doneck: GVUZ «DonNTU», 260.

3. Vovna, O. V. (2016). Optoelektronni vymirjuval'ni systemy koncentracii metanu ta pylu v rudnychnij atmosferi shaht. Pokrovs'k (Krasnoarmijs'k): DVNZ «DonNTU», 336.

4. Klimentko, A. P. (1987). Metody i pribory dlja izmerenija koncentracii pyli. Moscow: Himija, 208.

5. Romanchenko, S. B., Ishhuk, I. G. (2007). Sovremennye metody analiza formy i dispersnogo sostava ugol'noj pyli. Nauch. soobshh. NNC-GP IGD im. A. A. Skochinskogo. Moscow, 333, 270–286.

6. Voroshilov, Ya. S., Anisimov, A. A., Sedel'nikov, V. E. (2007). Stendovye ispytaniya stacionarnogo datchika kontrolja zapylenosti vozduha v gornyh vyrabotkah i proizvodstvennyh pomeshhenijah predpriyatij ugol'noj promyshlennosti. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. Otdel'nyj vypusk «Ajerologija», 7, 290–291.

7. Lisaj, O. N. (2009). Issledovanie sostava pyli i povedenija chastic pyli v vozdushnoj srede. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten', 1, 191–194.

8. Romanchenko, S. B. (2007). Opticheskie pylemery s infrakrasnymi izmeritel'nymi golovkami. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. Otdel'nyj vypusk «Ajerologija», 7, 265–272.

9. Arhipov, V. A., Sheremet'eva, U. M. (2007). Ajerozol'nye sistemy i ih vlijanie na zhiznedejatel'nost'. Tomsk: Izd-vo TGPU, 136.
10. Van De Hulst, H. C. (1951). Light Scattering by Small Particles. N.Y.: J. Wiley, 470.
11. Dejrmendzhan, D. (1971). Rassejanie jelektromagnitnogo izlucheniya sfericheskimi polidispersnymi chasticami. Moscow: Mir, 303.
12. Bloh, A. G. (1984). Teploobmen v topkakh parovykh kotlov. Leningrad: Jenergoatomizdat, 240.
13. Kaftanova, Ju. V. (1998). Rekurrentnye otnosheniya dlja reshenij differencial'nyh uravnenij vtorogo porjadka. Khar'kov: IC «Tiger», 48.
14. Petruhin, P. M. et. al.; Petruhin, P. M. (Ed.) (1981). Bor'ba s ugol'noj i porodnoj pyl'ju v shahtah. Moscow: Nedra, 271.
15. Produkcija predpriyatija «CREE»: SID vysokoj jar-kosti. MSC Technologies. Available at: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/HB/Data%20Sheets/C503B%20BAS%20BAN%20BCS%20BCN%20GAS%20GAN%20GCS%20GCN%201094.pdf>
16. Tehniceskaja dokumentacija na fotodiod serii BPW21R. Vishay Semiconductors. Available at: <http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>
17. Solomichev, R. I., Vovna, O. V., Zori, A. A. (2014). Rozrobka dvopromenevogo vymirjuvacha koncentracii' ta dispersnosti vugil'nogo pyly z kompensacijeu temperaturnogo drejfu. Visn. Vinnyc'kogo politehnicnogo instytutu, 5 (116), 36–41.
18. Solomichev, R. I., Vovna, A. V., Zori, A. A. (2015). Povysenie tochnosti optiko-absorbcionnogo izmeritelja koncentracii' ugol'noj pyli. Nauk. pr. Donec'k. nac. tehn. un-tu. Ser. Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija, 1 (28), 171–180.
19. Maksimenko, Ju. N., Mazan, E. G., Timin, A. K. (2010). Perenosnoj opticheskij pylemer VOG – 2. Visnyk NTUU “KPI”. Serija PRYLADOBUDUVANNJa, 40, 81–86.
20. FGUP «SPO «Analitpribor» – proizvodstvo gazoanalizatorov. Available at: <http://www.analitpribor-smolensk.ru/>
21. SICK. Available at: <https://www.sick.com/de/en/search?text=product>
22. Avtoekoprilad. Available at: <http://www.aep.kiev.ua/index.php>
23. Kornijenko, D. G. (2016). Patent Ukrai'ny na korysnu model' № 104604, G01N 15/00. Sposib vymirjuvannja koncentracii' radioaktyvnogo pyly u vykydah kotloagregativ. № u201507367; declared: 22.07.2015, published: 10.02.2016, bul. № 3.
24. Prymis'kyj, V. P., Porjev, V. A., Kornijenko, D. G. (2016). Patent Ukrai'ny na korysnu model' № 109425, G01N 15/02. Sposib vymirjuvannja koncentracii' pyly u dymovyh: toksychnyh i radioaktyvnyh gazah promyslovyh pidprijemstv. № u201601772; declared: 25.02.2016, published: 25.08.2016, bul. № 16.
25. Prymis'kyj, V. P. (2016). Patent Ukrai'ny na korysnu model' № 108435, G01N 15/02. Optychnyj pylomir. № u201601798; declared: 11.07.2016, published: 11.07.2016, bul. № 13.
26. Prymis'kyj, V. P., Porjev, V. A., Kornijenko, D. G. (2016). Patent Ukrai'ny na korysnu model' № 109800 G01N 15/02. Sposib vymirjuvannja koncentracii' pyly u dymovyh gazah. № u201601775; declared: 25.02.2016; published: 12.09.2016, bul. № 17.
27. Prymis'kyj, V. P. (2016). Patent Ukrai'ny na korysnu model' № 107345, G01N 21/53. Optychnyj vymirjuvach pyly. № u201601799; declared: 25.02.2016, published: 25.05.2016, bul. № 10.

Дата надходження рукопису 03.08.2016

Вовна Олександр Володимирович, доктор технічних наук, доцент, професор, кафедра електронної техніки, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», вул. Артема, 58, м. Донецьк, Україна, 83001
E-mail: vovna_alex@ukr.net

Приміський Владислав Пилипович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ТОВ «Автокоприлад», вул. Межигірська, 82-А, м. Київ, Україна, 04080
E-mail: avtoeko@faust.net.ua

Корнієнко Дмитро Григорович, аспірант, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: dimoonas@bigmir.net