

УДК 535.341.08

**Р.И. Соломичев**ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра электронной техники  
E-mail: [RomaSolomichev@mail.ru](mailto:RomaSolomichev@mail.ru)**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ОПТОЭЛЕКТРОННЫМ  
КОМПОНЕНТАМ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ИЗМЕРИТЕЛЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ**

*Составлен алгоритм вычисления параметров уравнения Ми, на основе которых установлена зависимость показателя ослабления зондирующего излучения от концентрации пыли в атмосфере угольной шахты, длины базы оптического канала, спектра излучения и дисперсного состава пыли. Составлена математическая модель канала измерения концентрации пыли, которая учитывает пространственные характеристики излучения светодиода и приема фотодиода. Выбраны оптоэлектронные компоненты измерителя согласно поставленным требованиям к их параметрам и характеристикам, что позволит реализовать макетный образец измерителя и проверить адекватность теоретических расчетов.*

**Ключевые слова:** поток излучения, оптический канал, фотодиод, характеристика преобразования, угольная пыль, концентрация.

**Общая постановка проблемы**

Ежегодно, при постоянно повышающемся уровне механизации производственных процессов на угольных шахтах, непрерывно усложняются горно-геологические и горно-технические условия в связи с переходом горных работ на все более глубокие горизонты, растет абсолютная и относительная газообильность шахт, следовательно, и опасность возникновения взрывов пыли и газа. Это требует дальнейшей разработки и проведения комплекса различных технических и организационных мероприятий по профилактике взрывов пылегазовоздушных смесей рудничной атмосферы.

Современные нормативы безопасности устанавливают определенные требования по быстродействию и точности измерительной аппаратуры, но существующие аспирационные пробоотборники пыли не удовлетворяют современным требованиям контроля запыленности рудничной атмосферы, что повышает риск возникновения взрывов в шахтах. Проведенный анализ методов и средств измерений концентрации пыли позволил утверждать, что наиболее эффективными с точки зрения быстродействия являются пылемеры, основанные на измерении частичного оптического поглощения светового излучения, прошедшего через слой пыли.

Согласно результатам испытаний в лабораториях МакНИИ и ВостНИИ [1] для максимально взрывчатой угольной пыли (выход летучих  $V^{daf} \geq 35\%$ , зольность  $A^s < 5\%$ , содержание влаги  $\varphi \leq 1,5\%$ ) нижний концентрационный предел взрываемости равен  $\delta=10 \text{ г/м}^3$  [1]. Но если концентрация метана в выработке равна  $C_{CH_4}=1\%$ , то предел снижается в два раза, при 2% – в четыре раза. Следовательно, при наличии в выработке метана угольная пыль может взорваться при концентрации от 4 до 5  $\text{г/м}^3$  в процессе выполнения проходческого цикла, следовательно, диапазон измерений концентрации пыли  $C_{П}$  разрабатываемого измерителя должен составлять от 0 до 3  $\text{г/м}^3$ . Поэтому необходимо провести и исследовать математическую модель, что даст возможность установить функциональную зависимость изменения интенсивности ( $I_{изл}$ ) прошедшего светового излучения от изменения концентрации пыли  $C_{П}$ .

### Постановка цели и задач исследования

Целью данной работы является обоснование требований к макетному образцу измерителя концентрации пыли и выбор на их основе оптоэлектронных компонент для достижения максимального значения оптического преобразования.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- получить математическую модель оптического канала измерения концентрации пыли;
- на основе разработанной математической модели поставить требования к характеристикам и параметрам оптоэлектронных компонент измерителя;
- выбрать конкретные промышленные образцы оптоэлектронных компонент.

### Решение задач и результаты исследований

Из анализа методов и средств следует, что наиболее эффективным с точки зрения быстроты действия и точности является оптический метод контроля концентрации пыли. В отличие от методов предварительного осаждения, у которых процесс определения концентрации занимает от 5 до 30 минут, оптический метод поглощения способен производить замеры текущей концентрации пыли, которая витает в атмосфере угольной шахты за секунды.

Для применения данного метода измерения были определены характеристики и параметры среды измерения, от которых зависит спектр светового поглощения. Из работ [1, 2] следует, что при скорости воздушных потоков в выработке угольной шахты от 2 до 8 м/с, на удалении от первичного источника пылеобразования до 20 метров успевают осесть фракции пыли размером свыше 10 мкм, в то же время в воздухе продолжает витать, не оседая, пылевая аэрозоль с размером частиц от 0,1 до 10 мкм. Согласно результатам исследований МакНИИ наиболее высокими взрывчатыми свойствами обладает пыль с размерами частиц от 10 до 60 мкм, но максимум взрывчатости приходится к мелкодисперсным частицам пыли, размер которых составляет от 1 до 3 мкм [2]. Соответственно, чтобы снизить риск вероятности возникновения взрывоопасной ситуации в выработке, необходимо устанавливать разрабатываемый анализатор с каналом измерения пылевых концентраций на удалении от очага пылеобразования более 20 метров и производить измерения концентрации полидисперсной фракции пыли с размером частиц от 1 до 3 мкм.

Выбранный оптический метод основан на явлении поглощения света, при прохождении его через пылегазовую среду. Согласно закону Бугера-Ламберта-Бера оптическая плотность  $\tau_\lambda$  пылегазовой среды толщиной  $l$  прямо пропорциональна  $K(\lambda, C_{II})$  – спектральному показателю ослабления, который характеризует ослабление единичным объемом среды зондирующего излучения и содержащий независимо рассеивающие частицы пыли с концентрацией  $C_{II}$ :

$$\tau_\lambda = \ln T_\lambda = \ln \frac{I_{изл0}(\lambda)}{I_{изл}(\lambda)} = K(\lambda, C_{II}) \cdot l, \quad (1)$$

где  $T_\lambda$  – спектральный коэффициент пропускания;  $I_{изл0}(\lambda)$  – начальная интенсивность излучения источника излучения (ИИ), Вт/м<sup>2</sup>,  $I_{изл}(\lambda)$  – интенсивность излучения, прошедшая сквозь пылегазовый слой, Вт/м<sup>2</sup>,  $\lambda$  – длина волны излучения, м.

Условием применимости данного закона к выбранному методу является предположение, что пыль состоит из абсолютно черных сферических частиц одинакового диаметра и коэффициент поглощения не зависит от концентрации пыли. Однако при больших концентрациях наблюдается зависимость коэффициента поглощения от концентрации пыли, так как в этом случае частицы начинают взаимодействовать друг с другом. При исследовании данной зависимости коэффициента поглощения от концентрации пыли в атмосфере и длины волны оптического излучения необходимо решить задачу рассеяния света однородной сферической частицей, на которую в определенном направлении падает плоская волна и в [3] приведены

аналитические результаты на основании теории Ми, которые наиболее точно описывают данную зависимость.

Значения основных функций рассеяния полностью определяются точностью вычисления коэффициентов в уравнении Ми  $a_n$  и  $b_n$ . Данные коэффициенты зависят только от величин  $m(\lambda)$ , – комплексного коэффициента преломления, равного  $m(\lambda) = n - j \cdot \chi(\lambda)$  и  $\alpha = \pi \cdot D / \lambda$  – размера частиц в относительных единицах, где  $n$  – показатель преломления, для воздуха  $n=1,0003$ ;  $\chi(\lambda)$  – показатель поглощения, для угольной пыли  $\chi(\lambda)$  изменяется в пределах от 0,007 до 2,3 в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$ .

Для сред с содержанием полидисперсных фракций пыли, показатель ослабления с дифференциальной функцией распределения частиц по размерам  $f(D)$  равен:

$$K(\lambda, C_{II}) = \frac{3 \cdot C_{II}}{2 \cdot \rho_k} \cdot \left( \int_0^\infty Q(\alpha, m(\lambda)) \cdot D^2 f(D) dD \right) \div \left( \int_0^\infty D^3 f(D) dD \right), \quad (2)$$

где  $Q(\alpha, m(\lambda))$  – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения;  $C_{II}$  – массовая концентрация пыли (суммарная масса частиц в единице объема), г/м<sup>3</sup>,  $\rho_k$  – плотность угольной пыли,  $\rho_k = 1,2 \cdot 10^6$  г/м<sup>3</sup>.

Фактор эффективности ослабления излучения, определяется в соответствии с теорией Ми по формуле [3]:

$$Q(\alpha, m(\lambda)) = \frac{2}{\alpha^2} \cdot \sum_{n=1}^\infty (2n + 1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (3)$$

где коэффициенты Ми  $a_n$  и  $b_n$  рассчитываются в соответствии с рекуррентными выражениями, удобными для вычислений [3]:

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

$$b_n(\alpha, m(\lambda)) = \frac{\left( m(\lambda) \cdot A_n(\alpha \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\alpha} \right) \cdot \operatorname{Re}(\xi_n(\alpha)) - \operatorname{Re}(\xi_{n-1}(\alpha))}{\left( m(\lambda) \cdot A_n(\alpha \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\alpha} \right) \cdot \xi_n(\alpha) - \xi_{n-1}(\alpha)}, \quad (5)$$

где  $\xi_n(\alpha)$ ,  $A_n(\alpha \cdot m(\lambda))$  – функции Рикатти-Бесселя вещественного аргумента, выражаются через комплексные круговые функции и определяются при помощи следующих рекуррентных соотношений:

$$\xi_n(\alpha) = \frac{2n - 1}{\alpha} \cdot \xi_{n-1}(\alpha) - \xi_{n-2}(\alpha); \quad (6)$$

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

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

$$A_n(\alpha \cdot m(\lambda)) = -\frac{n}{\alpha \cdot m(\lambda)} + \left[ \frac{n}{\alpha \cdot m(\lambda)} - A_{n-1}(\alpha \cdot m(\lambda)) \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$A_0(\alpha \cdot m(\lambda)) = \cot g(\alpha \cdot m(\lambda)). \quad (10)$$

При исследовании полидисперсных сред применение данного оптического метода ограничено снизу условием для усредненного параметра дифракции  $\alpha_{32} = (\pi \cdot D_{32}) / \lambda_{\min} < 30$ ;

таким же образом устанавливается ограничение сверху [4]:  $\lambda_{\max} < 0,1 \cdot \pi \cdot D_{32}$ , где  $D_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр частиц, определяемый выражением [2]:

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

где  $f(D) = (a/D) \cdot \exp(-b \cdot \ln(\beta \cdot D)^2)$  – функция распределения частиц по размеру в выработке угольной шахты;  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  – параметры функции распределения, определены на основе экспериментальных данных [2] и равны:  $a=0,785$  мкм,  $b=1,653$ ,  $\beta=0,379$  мкм<sup>-1</sup>.

Анализируя характеристики взрывчатости угольной пыли и функцию распределения частиц по размерам, были установлены предельные размеры измеряемых фракций пыли: от  $D_{\min} = 1$  до  $D_{\max} = 5$  мкм. Производя интегрирование выражения (11), определяем, что средний объемно-поверхностный диаметр частиц  $D_{32} = 3,36$  мкм. В таком случае диапазон длин волн оптического излучения, который необходимо использовать при измерении концентраций пыли в наших условиях с учетом ограничений снизу (сверху), составит:  $\lambda_{\min} > (\pi \cdot D_{32}) / 30$ ,  $\lambda_{\min} > 0,351$  мкм;  $\lambda_{\max} < 0,1 \cdot \pi \cdot D_{32}$ ,  $\lambda_{\max} < 1,055$  мкм.

Для определения фактора эффективности ослабления оптического излучения по формуле (3) был составлен алгоритм программы расчета коэффициентов Ми  $a_n$  и  $b_n$  согласно рекуррентным выражениям (4) – (10). Количество шагов итераций  $N$  в составленной программе определяется расчетной точностью вычислений, и данные коэффициенты считаются найденными, при выполнении следующего условия [4]:

$$\left( \sum_{n=1}^N (2n+1) \cdot \operatorname{Re}(a_n + b_n) \right) \cdot 10^{-8} > (2N+1) \cdot \operatorname{Re}(a_{N+1} + b_{N+1}). \quad (12)$$

Для оценки адекватности проведенных теоретических расчетов разработана и предложена структура макетного образца канала измерения концентрации пыли. Функциональная схема канала измерения приведена на рисунке 1. В основу разрабатываемого устройства, которое состоит из оптоэлектронного и аналогового блоков, положен принцип частичного оптического поглощения зондирующего излучения. Входной световой поток с интенсивностью оптического излучения  $I_{\text{изл}0\lambda}$ , формируемый источником излучения (ИИ) – светоизлучающим диодом (СИД), поступает в открытый оптический канал (ОК). Интенсивность потока ослабляется вследствие его поглощения и рассеяния частицами пыли в ОК с длиной трассы  $l$  и концентрацией  $C_{\text{П}}$ , после чего он попадает на приемник светового излучения (ПИ) – фотодиод (ФД). Интенсивность выходного излучения  $I_{\text{изл}\lambda}(C_{\text{П}}, l)$  преобразуется в электрический ток  $I_{\text{ФД}\lambda}(C_{\text{П}}, l)$  фотодиодом, после чего в аналоговом блоке сигнал преобразуется из тока в напряжение, частично усиливается предварительным усилителем (ПУ) и приводится к унифицированному сигналу с диапазоном изменения от 0 до 5 В нормирующим преобразователем (НП) для дальнейшей обработки в микропроцессорной системе.

Современная промышленность предоставляет широкий выбор образцов электронных компонент, а именно свето- и фотодиодов с различными характеристиками спектра, мощности, чувствительности, углов излучения и приема светового излучения. Исходя из расчетного диапазона длин волн излучения  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$ , необходимо производить измерения в видимом и частично инфракрасном спектрах излучения. В этой связи для построения математической модели ОК и выбора оптоэлектронных компонент требуется выполнить пересчет световых параметров СИД в энергетические согласно приведенной схеме ОК на рисунке 1, где  $\Theta$  – половинный угол интенсивности излучения СИД;  $\sigma$  – половинный угол чувствительности ФД;  $l_1+l_2=l$  – длина трассы ОК;  $2R$  – диаметр пятна рассеяния потока светового излучения СИД с учетом угла обзора ФД.

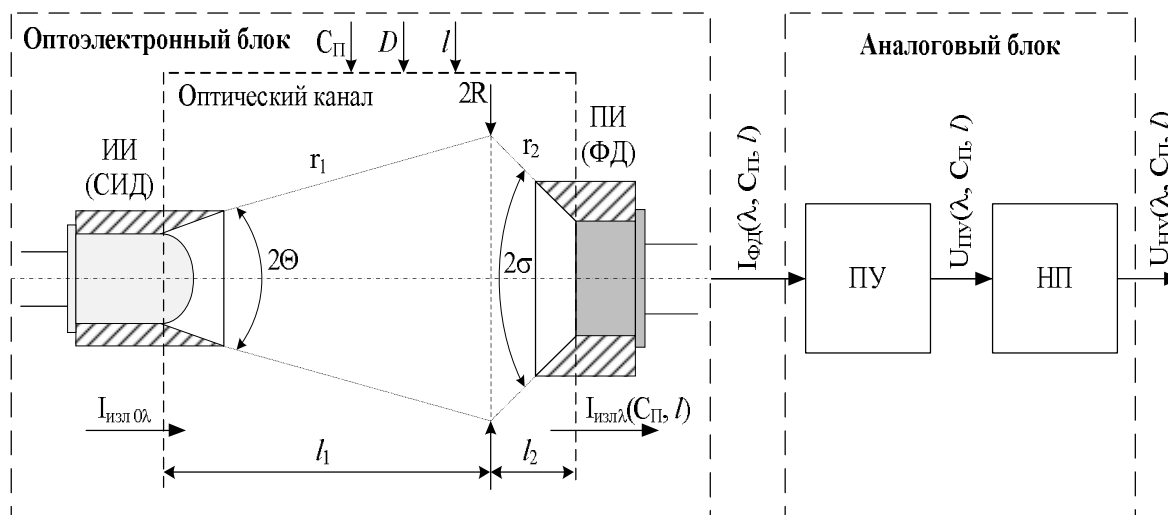


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительного канала концентрации пыли

Световой поток СИД определяется соотношением:

$$\Phi_{\nu 0 \text{ СИД } \lambda} = \Omega(\Theta, \sigma) \cdot I_{\text{изл}0 \lambda}, \quad (13)$$

где  $\Omega(\Theta, \sigma)$  – телесный угол излучения СИД, срад, который равен:

$$\Omega(\Theta, \sigma) = \frac{\pi \cdot R^2}{r_1^2} = \frac{\pi \cdot (\text{tg } \Theta \cdot l_1)^2}{l_1^2 + (\text{tg } \Theta \cdot l_1)^2}. \quad (14)$$

Переход из единиц светового потока ( $\Phi_{\nu 0 \text{ СИД } \lambda}$ , лм) в единицы энергетического потока излучения СИД ( $\Phi_{\text{э}0 \text{ СИД } \lambda}$ , Вт) определяется выражением:

$$\Phi_{\text{э}0 \text{ СИД } \lambda} = \Phi_{\nu 0 \text{ СИД } \lambda} / 683. \quad (15)$$

Поток излучения СИД, проходя через ОК, попадает на чувствительную поверхность фотодиода, который имеет определенную характеристику спектральной чувствительности  $s_{\text{ФД}}(\lambda)$ , что отличается от спектра СИД. Поэтому, для определения потока излучения  $\Phi_{0 \text{ ФД } \lambda}(l)$ , который преобразуется фотодиодом в электрический ток, при отсутствии пыли в ОК ( $C_{\text{П}} = 0$ ), необходимо ввести поправочные коэффициенты:  $K_{\text{ВВ}}(l)$  – коэффициент ввода оптического излучения в окно ПИ и  $s_{\text{синт}}$  – интегральная чувствительность ФД к сигналу СИД. Коэффициент ввода связан с пространственными характеристиками излучения СИД и приема ФД.

Интегральная чувствительность ФД к сигналу СИД определяется выражением [5]:

$$s_{\text{синт}} = s_{\text{инт}} \cdot \frac{\int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} s_{\text{СИДнорм}}(\lambda) \cdot s_{\text{ФД}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} s_{\text{СИДнорм}}(\lambda) d\lambda}, \quad (16)$$

где  $s_{\text{СИДнорм}}(\lambda)$  – нормированная спектральная плотность потока зондирующего излучения;  $s_{\text{ФД}}(\lambda)$  – нормированная спектральная чувствительность ФД;  $s_{\text{инт}}(\lambda)$  – интегральная чувствительность фотоприемника, А/Вт;  $(\lambda_{\text{мин}} \div \lambda_{\text{макс}})$ , мкм – диапазон спектральной чувствительности ФД.

Коэффициент ввода оптического излучения в окно ПИ определяется геометрическими параметрами ИИ и ПИ, а так же длиной базы ОК:

$$K_{BB}(l) = \frac{S_{\text{окна ФД}}}{S_{\text{пятна СИД}}(l) + S_{\text{излуч СИД}}} \cdot \frac{S_{\text{излуч СИД}}}{S_{\text{окна ФД}}}, \quad (17)$$

где  $S_{\text{окна ФД}}$  – площадь окна фотодиода;  $S_{\text{пятна СИД}}(l)$  – площадь пятна расхождения луча на расстоянии  $l$  от СИД;  $S_{\text{излуч СИД}}$  – площадь излучающей поверхности СИД.

Тогда, используя соотношения (15) и (17), поток излучения, измеряемый фотодиодом, который прошел через ОК с расстоянием  $l$  будет равен:

$$\Phi_{\text{ФД}\lambda}(l) = K_{BB}(l) \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\text{СИД}}(I_{\text{изл}0\lambda}) \cdot s_{\text{ФД}}(\lambda) d\lambda, \quad (18)$$

где  $k_2$  – коэффициент использования излучения оптической системой (принимается за эталон зрение человека-оператора),  $S_{\text{СИД}}(I_{\text{изл}0})$  – абсолютное значение спектральной плотности мощности излучения СИД, определяемое выражением:

$$S_{\text{СИД}}(I_{\text{изл}0}) = \frac{\Phi_{\text{СИД}\lambda} \cdot 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\lambda \cdot \sqrt{\pi}}, \quad (19)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра оптического излучения СИД.

Принимая во внимание ослабление зондирующего излучения пылевой средой в ОК, которое описывается законом Бугера (1), измеряемый фотодиодом поток определяется формулой:

$$\Phi_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) = \Phi_{\text{ФД}\lambda}(l) \cdot T_{\lambda}(\lambda, l, C_{\text{П}}). \quad (20)$$

Таким образом, расчетные соотношения (1)-(20) позволили установить зависимость выходного тока фотодиода, в зависимости от длины волны излучения, длины базы ОК и концентрации пыли:

$$I_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) = \Phi_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) \cdot S_{\text{сум}}. \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что ток фотодиода будет определяться его интегральной чувствительностью, коэффициентом ввода излучения в окно ПИ и интенсивностью свечения СИД. В свою очередь коэффициент ввода будет наибольшим с установленной длиной базы ОК при наименьшей площади пятна расхождения, которая определяется диаграммой направленности излучения СИД (углом расхождения  $\Theta$ ), а так же размером окна фотодиода.

Анализируя характеристики выпускаемых промышленностью СИД, для проведения экспериментальных исследований, было предложено использовать ультраяркие светодиоды фирмы CREE C503-BAN ( $\lambda = 470$  нм), C503-GAN ( $\lambda = 527$  нм) и C503-RAN ( $\lambda = 624$  нм), имеющие половинный угол излучения  $\Theta = 15^\circ$  и силу света от 8600 до 46100 мкд, тогда как другие СИД имеют угол расхождения  $\Theta$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  и силу света не более 3000 мкд.

Из анализа характеристик современных фотодиодов, было предложено использовать диод фирмы Vishay Semiconductors – BPW21R, который наиболее соответствует поставленным требованиям по спектру чувствительности к зондирующему излучению ( $\lambda_{\min} > 0,351$  мкм до  $\lambda_{\max} < 1,055$  мкм). Данный фотодиод имеет высокую интегральную чувствительность ( $s_{\text{сум}}(\lambda) = 0,0131$  А/Вт) к спектру излучения с длинами волн от  $\lambda_1 = 0,347$  мкм до  $\lambda_2 = 0,813$  мкм при высоких показателях быстродействия (время нарастания импульса  $t_{\text{нар}} = 3,1$  мкс, время спада  $t_{\text{спад}} = 3,0$  мкс).

Имея необходимые конструктивные параметры выбранных оптоэлектронных компонент, получены зависимости коэффициентов ввода (в процентах) от длины базы ОК от 5 до 15 см при углах расхождения  $15^\circ$  (зависимости 1, система СИД C503 – ФД BPW21R),  $20^\circ$  и  $30^\circ$  (зависимости 2 и 3 соответственно, система СИД иного типа – ФД BPW21R) приведены

на рисунке 2. Так же были рассчитаны зависимости тока фотодиода по (21) от длины базы ОК при максимальной яркости излучения СИД и отсутствии пыли в ОК ( $C_{II} = 0$ ), которые приведены на рисунке 3.

Из зависимостей, приведенных на рисунке 2, следует, что наибольший коэффициент ввода достигается с применением узконаправленного излучения СИД (при  $\Theta = 15^\circ$  и  $l = 10$  см  $K_{BB}(l) = 5\%$ ), а при увеличении  $\Theta$  до  $30^\circ$  и  $l = 10$  см  $K_{BB}(l)$  снижается примерно в пять раз и составляет 1,1%.

На рисунке 3 обозначены зависимости: 1 – при  $\lambda_{СИД} = 470$  нм,  $\Delta\lambda_{СИД} = 44$  нм,  $I_{изл0} = 16,8$  кд; 2 –  $\lambda_{СИД} = 624$  нм,  $\Delta\lambda_{СИД} = 38$  нм,  $I_{изл0} = 16,8$  кд; 3 –  $\lambda_{СИД} = 527$  нм,  $\Delta\lambda_{СИД} = 40$  нм,  $I_{изл0} = 46,1$  кд. Вид данных зависимостей показывает характер изменения амплитудного значения тока ФД в зависимости от расстояния до излучателя при различных длинах волн.

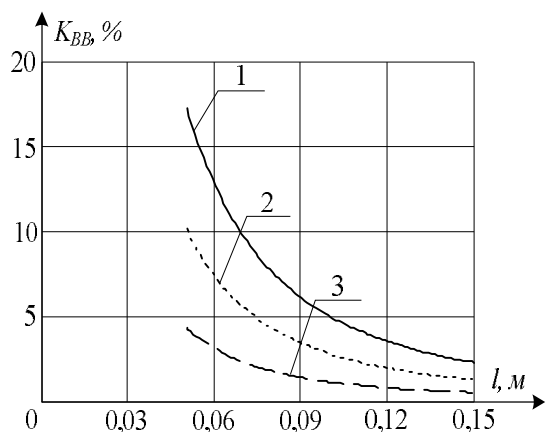


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ввода от длины базы ОК

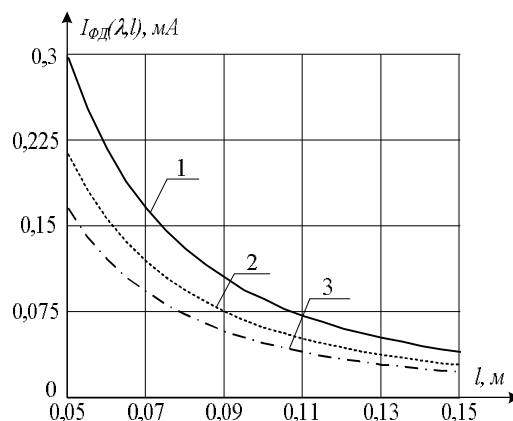


Рисунок 3 – Зависимость тока ФД от длины базы ОК

При добавлении в ОК угольной пыли происходит ослабление светового потока, характеризующееся показателем ослабления излучения (1). Итерационный алгоритм вычисления фактора эффективности ослабления (3) на основе коэффициентов Ми по рекуррентным соотношениям (4)-(10) дает возможность учесть ослабление светового потока. В этой связи, изменение выходного тока ФД по выражению (21) от концентрации пыли ( $C_{II} = 0..3$  г/м<sup>3</sup>) при длине базы ОК  $l = 0,1$  м и  $K_{BB} = 5\%$  будет иметь вид, как показано на рисунке 4.

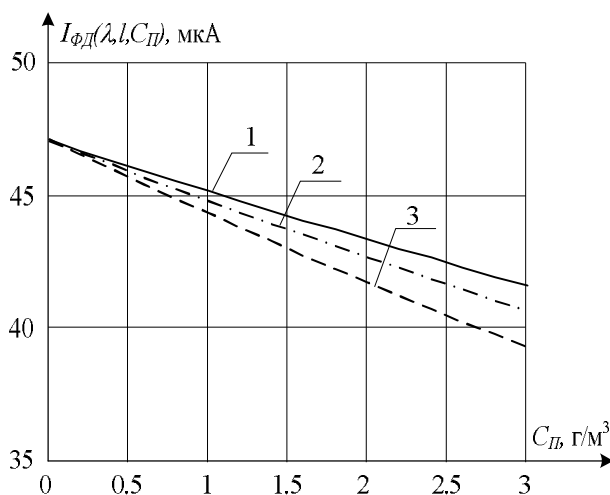


Рисунок 4 – Зависимость тока ФД от концентрации пыли

На рисунке 4 обозначено: 1 – зависимость тока ФД от концентрации пыли при  $\lambda_{СИД} = 470$  нм, 2 –  $\lambda_{СИД} = 527$  нм, 3 –  $\lambda_{СИД} = 624$  нм. В начальной точке ( $C_{II} = 0$ ) ток ФД нормируется к единому значению на различных длинах волн СИД за счет изменения его интенсивности излучения. При повышении концентрации пыли и за счет отношения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц к длине волны наклон характеристик изменяется от 13,0 мкА/(г/м<sup>3</sup>) (зависимость 3) до 13,9 мкА/(г/м<sup>3</sup>) (зависимость 1), что дает основание утверждать о возможности решении обратной задачи: установление дисперсного состава исследуемого объема пыли на основе измеренного ослабления светового излучения на различных длинах волн.

### Выводы

1. Предложен алгоритм вычисления параметров уравнения Ми, на основе которых установлены зависимости показателя ослабления зондирующего излучения от концентрации пыли в атмосфере угольной шахты. Показатель ослабления учитывает длину базы оптического канала измерения, спектр излучения и дисперсный состав пыли. Предложенный алгоритм на основе разработанной математической модели позволил поставить требования к характеристикам и параметрам оптоэлектронных компонент: установлен диапазон спектра длин волн зондирующего излучения, который должен составлять от 351 нм до 1055 нм.

2. Составлена математическая модель канала измерения концентрации пыли, которая учитывает пространственные характеристики (коэффициенты ввода) излучения светодиода, приема фотодиода и позволила получить зависимость преобразования интенсивности зондирующего излучения в выходной ток фотодиода (в диапазоне от 38 до 47 мкА) при изменении концентрации пыли в оптическом канале измерения от 0 до 3 г/м<sup>3</sup>.

3. На основе поставленных требований к параметрам оптоэлектронных компонент и математической модели измерителя концентрации пыли предложено использовать фотодиод BPW21R (диапазон спектральной чувствительности составляет от 347 до 813 нм) и ультра яркие светодиоды с минимальным углом расхождения излучения (15°) C503-BAN (длина волны 470 нм), C503-GAN (527 нм), C503-RAN (624 нм), что позволит реализовать макетный образец измерителя и проверить адекватность теоретических расчетов.

### Список использованной литературы

1. Колесник В.Е. Моделирование процесса распространения и отложения пыли в горных выработках с учетом ее поступления от источников и в результате взметывания / В.Е. Колесник, С.Н. Ткаченко // Науковий вісник НГУ. – 2003. – № 2. – С. - 78-80.
2. Ващенко В.И. Пыль угольных шахт. / В.И. Ващенко, А.К. Носач, В.В. Яворович // Вести Донецкого горного института. - 2011. – Выпуск 11. – С. 35-44.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан. – М.: Мир, 1971. – 303 с.
4. Архипов В.А. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность: учебное пособие / В.А. Архипов, У.М. Шереметьева. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2007. – 136 с.
5. Ишанин Г.Г. Источники и приёмники излучения. Пособие по решению задач / Г.Г. Ишанин, Н.К. Мальцева, В.Л. Мусяков. – СПб.: СБГУ ИТМО, 2006. – 85 с.

Надійшла до редакції:  
01.4.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.



**Р.І. Соломічев**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Обґрунтування і розробка вимог до оптоелектронних компонент макетного зразка вимірювача концентрації пилу.** Складено алгоритм обчислення параметрів рівняння Мі, на основі яких встановлено залежність показника ослаблення зондуючого випромінювання від концентрації пилу в атмосфері вугільної шахти, довжини бази оптичного каналу, спектру випромінювання та дисперсного складу пилу. Складена математична модель каналу вимірювання концентрації пилу, що враховує просторові характеристики випромінювання світлодіода і прийому фотодіода. Обрані оптоелектронні компоненти вимірювача відповідно поставлених вимог до їх параметрів та характеристик, що дозволить реалізувати макетний зразок вимірювача і перевірити адекватність теоретичних розрахунків.

**Ключові слова:** потік випромінювання, оптичний канал, фотодіод, характеристика перетворення, вугільний пил, концентрація.

**R. Solomichev**

**Donetsk National Technical University**

**Requirements to Optoelectronic Components of Model Prototype for Dust Concentration Meter.** Existing dust aspirating sampling devices do not satisfy modern requirements for speed and accuracy of dust control in mine atmosphere, which increases the risk of explosions in mines. We validated a method for measuring the dust concentration, based on the light radiation partial optical absorption measurement. The analysis of experimental data from MakNII found that for the most explosive coal dust (volatile  $V^{daf} \geq 35\%$ , ash content  $A^s < 5\%$ , moisture content  $\varphi \leq 1,5\%$ ) lower explosion limit concentration is equal to  $\delta = 10 \text{ g/m}^3$ . If the concentration of methane  $C_{CH_4} = 1\%$  the limit decreases twice, but with 2% - the explosion limit decreases about four times. Mathematical modeling revealed the functional dependence of changes in the light intensity of transmitted radiation on the changes in dust concentration  $C_{II}$ . An algorithm for Mie parameter calculation was proposed, which helped to find the dependence of probe radiation on dust concentration in coal mine atmosphere. Attenuation coefficient takes into account the optical measurement path base length, the emission spectrum and dust composition. The proposed algorithm based on the mathematical model allowed formulating the requirements to optoelectronic components parameters: the wavelengths spectrum range of the probe radiation, which should be from 351 nm to 1055 nm. Dust measurement channel mathematical model was proposed, which takes into account spatial radiation characteristics (input coefficients) of a photodiode and allowed obtaining the dependence of the transformation probing radiation intensity into output current (in the range from 38 to 47 mA), when dust concentration in the optical measurement channel changes from 0 to 3 g/m<sup>3</sup>. On the basis of the requirements to optoelectronic components' parameters and dust concentration meter mathematical model we proposed to use a photodiode BPW21R (spectral sensitivity range is from 347 to 813 nm) and ultra-bright LEDs with minimum radiation divergence angle (15°) C503-BAN (wavelength 470 nm) C503-GAN (527 nm), C503-RAN (624 nm), which will implement the model sample of the meter and check the theoretical calculations adequacy.

**Keywords:** radiation flux, optical channel, photodiode, conversion characteristic, coal dust, concentration.