

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Разработана математическая модель измерительного канала концентрации пыли на основе оптического метода. Получена и исследована характеристика преобразования интенсивности светового потока излучения, прошедшего через открытый измерительный канал, изменение которого пропорционально изменению концентрации пыли в атмосфере угольной шахты. Поставлены требования к макетному образцу измерителя концентрации пыли.

Математическая модель, оптический канал, дисперсность, пыль, поток излучения, характеристика преобразования

R.I. Solomichev

THE MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT FOR DUST CONCENTRATION MEASURING IN COAL MINES

The mathematical model basis on the optical method of the dust concentration measuring channel was developed. The conversion characteristic of the light intensity radiation that passing through the open channel measurement, the change is proportional to the change in the dust concentration in the coal mine atmosphere obtained and investigated. Set requirements for dust concentration model sample.

Mathematical model, the optical channel, dispersion, dust, radiation flux transformation characteristic

Общая постановка проблемы. Ежегодная интенсификация производственных процессов по выемке угля приводит к увеличению образования тонкодисперсной пыли в атмосфере угольных шахт. Несвоевременное принятие мер по обеспыливанию, малая достоверность результатов измерений концентрации витающей угольной пыли в совокупности способствуют повышению вероятности возникновения возгораний и взрывам пылеметановоздушных смесей.

Существующие аспирационные пробоотборники пыли не удовлетворяют современным требованиям контроля запыленности рудничной атмосферы по быстрдействию и точности результатов измерения. Наиболее эффективными являются пылемеры, основанные на измерении частичного оптического поглощения светового излучения, прошедшего через слой пыли. Проведение математического моделирования дает возможность установить функциональную зависимость изменения интенсивности ($I_{в\lambda}$) прошедшего светового излучения от изменения концентрации пыли $C_{п}$.

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 г/м^3 в процессе выполнения проходческого цикла, следовательно диапазон измерений концентрации пыли $C_{п}$ разрабатываемого измерителя должен составлять от 0 до 3 г/м^3 .

Постановка цели и задач исследования. Целью данной работы является получение характеристики преобразования и постановка требований к параметрам макетного образца оптического измерителя концентрации пыли в диапазоне от 0 до 3 г/м^3 . Для этого необходимо решить следующие задачи: разработать и исследовать математическую модель, на ее основе получить характеристику преобразования концентрации угольной пыли в пропорциональное изменение потока излучения, поставить требования к оптическим компонентам макетного образца, что позволит проверить адекватность полученной математической модели пылемера.

Решение задач и результаты исследования. На основании современных требований к стационарным измерителям концентрации угольной пыли в рудничной атмосфере, проведен анализ существующих пылемеров, который показал, что наиболее эффективным с точки зрения быстрдействия и точности является оптический метод контроля концентрации пыли. Для применения данного метода измерения необходимо установить характеристики и параметры среды измерения, от которых зависит спектр поглощения светового излучения.

Известно, что частицы угольной пыли рудничной атмосферы являются полидисперсной системой, этот фактор влияет на характер изменения светового излучения, а так же на взрывчатые свойства пыли. По 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 [1]. Для полидисперсных сферических частиц диаметром D количественные характеристики светопоглощения полностью определяются двумя параметрами – комплексным показателем преломления материала частицы $m = n - i\chi$ (n – показатель преломления, для воздуха $n = 1,0003$; χ – показатель поглощения, для угольной пыли $\chi = 0,007$) и безразмерным усредненным параметром дифракции – параметром Ми (аналогично параметру дифракции α для монодисперсной среды), который характеризует рассеяние света с длиной волны λ в зависимости от размера частиц:

$$\alpha_{32} = \frac{\pi \cdot D_{32}}{\lambda}, \quad (1)$$

где D_{32} – средний объемно-поверхностный диаметр частиц, определяемый выражением [2]:

$$D_{32} = \left(\int_0^{\infty} D^3 \cdot f(D) dD \right) / \left(\int_0^{\infty} D^2 \cdot f(D) dD \right), \quad (2)$$

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 , β – параметры функции распределения.

На основе экспериментальных данных [3] была построена функция распределения $f(D)$ частиц пыли в очистном забое со следующими параметрами: $a = 0,785$ мкм, $b = 1,653$, $\beta = 0,379 \text{ мкм}^{-1}$, при этом диапазон размеров частиц на уровне 0,8 нормированной функции $f(D)$ составил от 1,36 до 2,8 мкм, а средний диаметр частиц $D_{32} = 5,62$ мкм.

Применение данного оптического метода ограничено снизу условием $\alpha_{32} < 30$. Согласно ему определяется длина волны излучения с учетом размеров частиц пыли. При уменьшении длины волны зондирующего излучения нижний предел по размеру частиц можно снизить в соответствии с соотношением [2]:

$$D_{\min} = \frac{30 \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \approx 4,8 \cdot \lambda. \quad (3)$$

Например, применяя световые излучатели видимого спектра с длиной волны от 0,38 мкм, можно различать частицы пыли размером от $D_{\min} = 4,8 \cdot 0,38 = 1,824$ мкм. Выполнение данного условия дает возможность производить измерение концентраций тонкодисперсных фракций пыли, используя источники излучения (ИИ) видимого спектра.

Функциональная схема измерителя концентрации пыли, основанного на оптическом методе измерения, приведена на рисунке 1, состоит из оптоэлектронного и аналогового блоков. Для выбора оптоэлектронных компонент измерителя необходимо провести анализ изменения интенсивности потока излучения ИИ на выходе оптического канала (ОК) при вариации его длины l и концентрации пыли $C_{\text{П}}$.

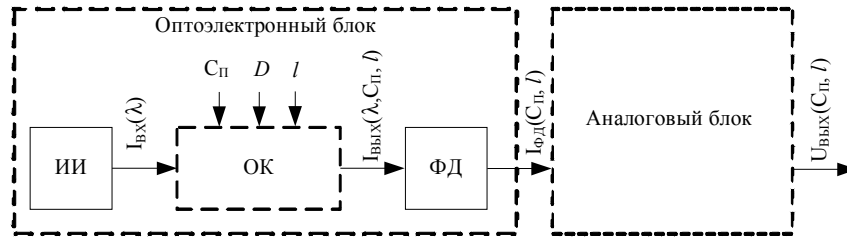


Рис. 1 – Функциональная схема оптического измерителя концентрации пыли

Входной поток с интенсивностью оптического излучения $I_{\text{ВХ}}(\lambda)$, формируемый ИИ, поступает в открытый ОК, интенсивность его ослабляется частицами пыли, после чего он попадает на приемник светового излучения – фотодиод (ФД). Интенсивность светового излучения $I_{\text{ВЫХ}}(\lambda, C_{\text{П}}, l)$ преобразуется в электрический ток $I_{\text{ФД}}(C_{\text{П}}, l)$ фотодиодом, после чего преобразуемый сигнал напряжения $U_{\text{ВЫХ}}(C_{\text{П}}, l)$ и преобразовывается аналоговым блоком к необходимому формату для дальнейшей обработки в микропроцессорной системе.

В первом приближении, для получения номинальной характеристики преобразования в математической модели измерителя не будем учитывать ряд дестабилизирующих факторов: изменение атмосферного давления, влажности и температуры. В разработанной математической модели учтено изменение диапазона измеряемых концентраций, дисперсность частиц пыли, длины волн излучения и длину базы ОК. В основу математической модели положена количественная характеристика ослабления излучения, которой является спектральный коэффициент пропускания $T(\lambda, C_{\text{П}}, l)$, равный отношению интенсивности излучения, прошедшей сквозь слой пыли $I_{\text{ВЫХ}}(\lambda, C_{\text{П}}, l)$, к поступающему на него интенсивности оптического излучения $I_{\text{ВХ}}(\lambda)$ и определяется законом Бугера [2]:

$$T(\lambda, C_{\text{П}}, l) = I_{\text{ВЫХ}}(\lambda, C_{\text{П}}, l) / I_{\text{ВХ}}(\lambda) = \exp(-K(\lambda, C_{\text{П}}) \cdot l), \quad (4)$$

где λ , мкм – длина волны излучения; $C_{\text{П}}$, г/м³ – объемная концентрация пыли в измерительном канале; l , м – толщина анализируемого слоя вещества, равная длине измерительного канала; $K(\lambda, C_{\text{П}})$ – спектральный показатель ослабления для полидисперсной среды, характеризующий ослабление света объемом среды, содержащим независимо рассеивающие частицы и определяется формулой [2]:

$$K(\lambda, C_{\text{П}}) = \frac{3 \cdot C_{\text{П}}}{2 \cdot \rho_k} \cdot \left(\int_0^{\infty} Q(\lambda, D) \cdot D^2 f(D) dD \right) \div \left(\int_0^{\infty} D^3 f(D) dD \right) \quad (5)$$

где ρ_k – плотность материала частиц, $\rho_k = 1,2 \cdot 10^6$ г/м³, $Q(\lambda, D)$ – фактор эффективности ослабления, являющийся безразмерной величиной.

Зависимость $Q(\lambda, D)$ от длины волны видимого спектра при размере частиц, равному среднему объемно-поверхностному диаметру полидисперсных частиц $D = D_{32}$ приведена на рисунке 2. Из зависимости следует, что влияние длины волны является существенным. Руководствуясь условием (3), а так же взрывчатыми свойствами пыли на основе функции распределения частиц пыли по размерам в очистном забое, необходимо выбрать длину волны излучения из диапазона от $\lambda_1 = 1,824 / 4,8 = 0,38$ мкм ($Q_1(\lambda_2, D_{32}) = 2,21 \cdot 10^7$) до $\lambda_2 = 2,8 / 4,8 = 0,583$ мкм ($Q_2(\lambda_2, D_{32}) = 4 \cdot 10^6$). Дальнейшее повышение длины волны нецелесообразно, по нескольким причинам: во-первых, измеряемая концентрация пыли будет соответствовать менее взрывоопасным по размеру фракциям и во-вторых, значения $Q(\lambda, D)$ асимптотически стремятся к $2 \cdot 10^6$ и не изменяются при этом интенсивность излучения, прошедшая через оптический канал, которая также останется неизменной $I_{\text{ВЫХ}}(\lambda, C_{\text{П}}, l) = I_{\text{ВХ}}(\lambda)$.

Зависимости спектрального показателя ослабления (5) от концентрации пыли при длинах волн 1) $\lambda = 0,38$ мкм, 2) $\lambda = 0,47$ мкм, 3) $\lambda = 0,583$ мкм приведены на рисунке 3.

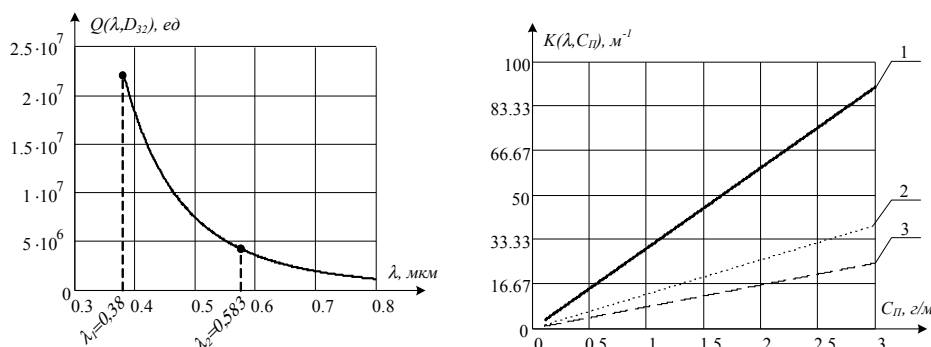


Рис. 2 – Зависимость фактора эффективности ослабления от длины волны

Рис. 3 – Зависимость спектрального показателя ослабления от концентрации пыли

Зависимости спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $l=const=10$ см приведены на рисунке 4. На длине волны $\lambda=0,38$ мкм (зависимость 1) ослабление излучения максимальное при изменении концентрации пыли от 0 до $1,5$ г/м³, в два раза меньше требуемого диапазона концентраций, характеристика нелинейная, что приводит к изменению чувствительности $S_C=\Delta T(\lambda, C_{п}, l)/\Delta C_{п}$ на поддиапазонах концентрации пыли в зависимости от степени аппроксимации. Для равномерности чувствительности предложено проводить измерения на нескольких линеаризованных поддиапазонах измерения концентрации пыли: первый – от 0 до $C_{п1}=0,63$ г/м³ при $\lambda=0,47$ мкм (зависимость 2); второй – от 0,63 до $C_{п2}=1,54$ г/м³ при $\lambda=0,52$ мкм (зависимость 3); третий – от 1,54 до 3 г/м³ при $\lambda=0,583$ мкм (зависимость 4), что полностью охватывает требуемый диапазон концентраций от 0 до 3 г/м³. При этом чувствительность измерения первого поддиапазона составит $S_{C1}=0,817$ 1/(г/м³), второго – $S_{C2}=0,345$ 1/(г/м³), третьего $S_{C3}=0,162$ 1/(г/м³).

Зависимости спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $\lambda=0,47$ мкм приведены на рисунке 5 для различных длин базы ОК. Из характеристики преобразования видно, что длина базы ОК оказывает существенное влияние как на ослабление интенсивности входного потока излучения, так и на чувствительность измерения. При длине базы $l=15$ см (зависимость 3) чувствительность максимальная с большой нелинейностью, но диапазон измерения концентраций пыли снижается из-за большого ослабления излучения при данной λ . При длине базы $l=5$ см (зависимость 1) чувствительность минимальная, поэтому длину базы ОК рекомендуется выбирать не более $l=10$ см (зависимость 2).

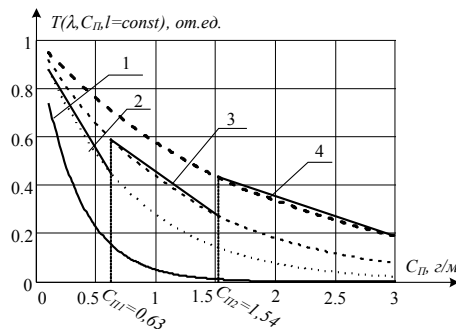


Рис. 4 – Зависимость спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $l=const$

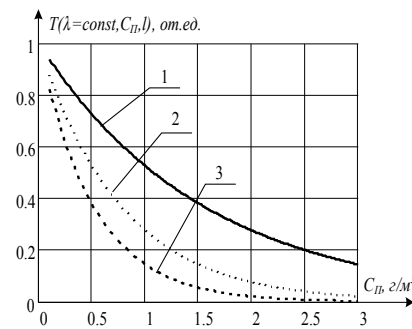


Рис. 5 – Зависимость спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $\lambda=const$

Выводы

1. Впервые разработана математическая модель измерителя концентрации пыли, реализующая оптический метод измерения, учитывающая параметры оптического канала измерителя (размер базы оптического канала, равный $l=10$ см и длины волн излучения). На основе данной модели получена характеристика преобразования измерителя концентрации пыли.

2. Проведенный анализ результатов моделирования позволяет поставить требования к параметрам оптических компонент макетного образца измерителя концентрации пыли: при среднем объемно-поверхностном диаметре полидисперсных частиц пыли $D_{32}=5,62$ мкм необходимо проводить измерения в трех поддиапазонах на разных длинах волн излучения (от 0 до $0,64$ г/м³ – $\lambda=0,47$ мкм; от $0,64$ до $1,54$ г/м³ – $\lambda=0,52$ мкм; от $1,54$ до 3 г/м³ – $\lambda=0,583$ мкм), что позволит получить суммарную погрешность измерения не более 10%.

Библиографический список

1. Шевцов Н.Р. Взрывозащита горных выработок (курс лекций): Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 280 с.
2. Архипов В.А., Шереметьева У.М. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность: Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2007. – 136 с.
3. 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.

Соломичев Роман Игоревич

Аспирант кафедры электронной техники. Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, Украина

Solomichev Roman Igorevich

Aspirant of the Electronic Technique Department. State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”

83001, Donetsk, Artyom street 58, Ukraine

E-mail: RomaSolomichev@mail.ru