

УДК 621.384.3

Р.И. Соломичев

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. В полученной модели не учтены дестабилизирующие факторы: изменение атмосферного давления, влажности и температуры. Проведенный анализ результатов моделирования позволяет поставить требования к параметрам оптических компонент макетного образца измерителя концентрации пыли: размер базы оптического канала должен быть равным не более $l=10$ см; 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 линеаризовать характеристику преобразования и получить суммарную погрешность измерения не более 10 %.

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 of the dust concentration in the coal mine atmosphere obtained and investigated. In the obtained model does not take into account the destabilizing factors: changes in atmospheric pressure, humidity and temperature. The simulation results analysis can put requirements for the model sample meter optical parameters of dust components: the fiber channel base size should be set to no more than $l=0,1$ m, with a volume-surface diameter mean of polydisperse dust $D_{32}=5,62$ μ m to take measurements in three subranges at different radiation wavelengths (from 0 to $0,64$ g/m³ – $\lambda=0,47$ μ m, from $0,64$ to $1,54$ g/m³ – $\lambda=0,52$ μ m, from $1,54$ to 3 g/m³ – $\lambda=0,583$ μ m), which will linearize the transformation characteristic and obtain the total measurement accuracy at least of 10%.

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 быстродействию 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 ($I_{ВЫХ}$) 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 $C_{\text{п}}$ 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 быстродействия 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 также 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 $m = n - i \cdot \chi$ (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]:

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

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: $a = 0,785 \text{ мкм}$, $b = 1,653$, $\beta = 0,379 \text{ мкм}^{-1}$, 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 $D_{32} = 5,62 \text{ мкм}$.

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 рис. 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 $C_{\text{П}}$.

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.

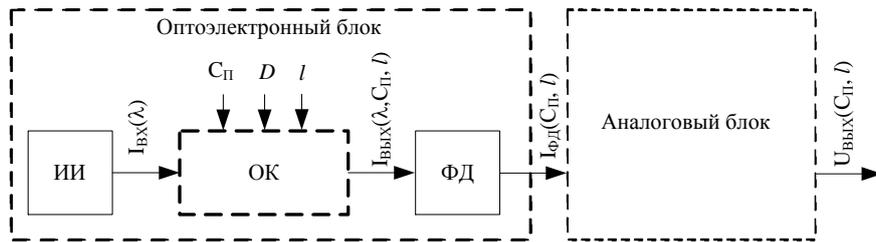


Рис. 1. Функциональная схема оптического измерителя концентрации пыли

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 волн 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]:

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

где ρ_k – плотность материала частиц, $\rho_k = 1,2 \cdot 10^6 \text{ г/м}^3$, $Q(\lambda, D)$ – 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 рис. 2. Из зависимости следует, что влияние длины волны является существенным. Руководствуясь условием (3), а также 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 ($Q_1(\lambda_3, D_{32})=2,21 \cdot 10^7$) до $\lambda_2=2,8/4,8=0,583$ мкм ($Q_2(\lambda_3, D_{32})=4 \cdot 10^6$). 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 $I_{ВЫХ}(\lambda, C_{II}, l) = I_{ВХ}(\lambda)$.

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 рис. 3.

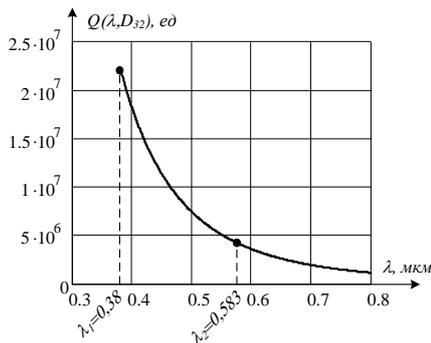


Рис. 2. Зависимость фактора эффективности ослабления от длины волны

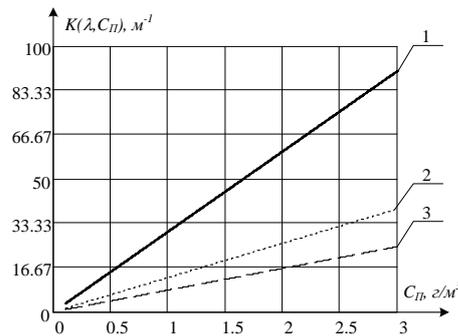


Рис. 3. Зависимость спектрального показателя ослабления от концентрации пыли

Зависимости спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $l=const=10$ см приведены на рис. 4. На длине волны $\lambda=0,38$ мкм (зависимость 1) ослабление излучения максимальное при изменении концентрации пыли от 0 до $1,5 \text{ г/м}^3$, в два раза меньше требуемого диапазона концентраций, характеристика нелинейная, что приводит к изменению чувствительности $S_C = \Delta T(\lambda, C_{II}, l) / \Delta C_{II}$ 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 $C_{II1}=0,63 \text{ г/м}^3$ при $\lambda=0,47$ мкм (зависимость 2); второй – от $0,63$ до $C_{II2}=1,54 \text{ г/м}^3$ при $\lambda=0,52$ мкм (зависимость 3); третий – от $1,54$ до 3 г/м^3 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).

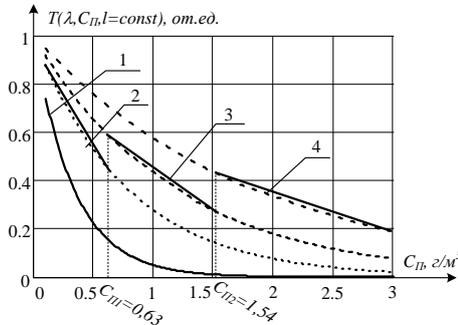


Рис. 4. Зависимость спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $l=const$

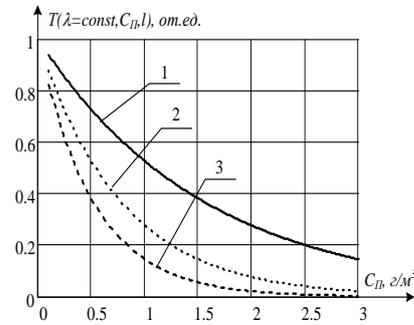


Рис. 5. Зависимость спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $\lambda=const$

Зависимости спектрального коэффициента пропускания от концентрации пыли при $\lambda=0,47$ мкм приведены на рис. 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).

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: Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2007. – 136 с.
3. Ващенко В.И., Носач А.К., Яворович В.В. Пыль угольных шахт // Вести Донецкого горного института. – 2011. – Вып. 11. – С. 35-44.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Соломичев Роман Игоревич – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»; e-mail: RomaSolomichev@mail.ru; 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, Украина; кафедра электронной техники; аспирант.

Solomichev Roman Igorevich – State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”; e-mail: RomaSolomichev@mail.ru; 58, Artyom street, Donetsk, 83001, Ukraine; the department of the electronic technique; postgraduate student.

УДК 004.896

Ю.В. Чернухин, Ю.С. Доленко, П.А. Бутов

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К РЕАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Рассматривается бионический подход к решению задачи локальной навигации нейросетевой системой управления интеллектуального мобильного робота. Описывается подход к обработке данных от датчика глубины ASUS Xtion, базирующийся на использовании математической модели ганглиозных on-/ off- клеток сетчатки, и позволяющий построить локальную карту проходимости. Полученная в результате локальная карта проходимости используется для построения безопасной и оптимальной траектории движения интеллектуального мобильного робота с помощью нейронной сети формально-логического типа. Данный подход к решению задачи локальной навигации проверен экспериментально на разработанной робототехнической платформе.

Нейронные сети; бионический подход; робототехника; искусственный интеллект; системы технического зрения.

Yu.V. Chernukhin, Yu.S. Dolenko, P.A. Butov

NEURAL NETWORK APPROACH TO PROBLEM SOLVING LOCAL NAVIGATION BY INTELLIGENT MOBILE ROBOTS IN THE CONDITIONS CLOSE TO THE REAL ENVIRONMENT

Bionic approach to the problem of local navigation by neural network control system of intelligent mobile robot is considered. An approach to the processing of data from the ASUS Xtion depth sensor and local map building, based on the use of mathematical models of on-/off- retinal ganglion cells is reviewed. The resulting local map is used to build a safe and optimal trajectory for intelligent mobile robot movement using a formal logic type neural network. This approach to the problem of local navigation verified experimentally on the developed robotic platform.

Neural networks; bionic approach in robotics; AI; computer vision systems.

В данной статье рассматривается решение задачи локальной навигации интеллектуальным мобильным роботом (ИМР) в условиях, приближенных к условиям реальной среды (полигон с объемными препятствиями, соизмеримыми с корпусом робота). Задача локальной навигации формулируется как построение и реализация траектории перемещения робота к цели в объезд объектов-препятствий. Цель при этом должна находиться в области видимости системы технического зрения (СТЗ) ИМР. Подразумевается, что ИМР не обладает картой полигона и должен сам строить локальную карту проходимости на основе полученных от сенсоров данных.

Локальная карта проходимости, формируемая СТЗ, представляется в виде двумерного пространства состояний решетчатого типа. Каждый из узлов решетки уникально определяет состояние участка среды функционирования робота: является ли участок целевым, непроходимым (препятствие) или проходимым. Каждо-