

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-18-26

УДК 622.81

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА ОБНАРУЖЕНИЯ
ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ТЛЕНИЯ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОМ ПРИБОРЕ КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ
И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

**MODELING OF OPTICAL-ELECTRONIC SENSOR FOR DETECTION OF FLAME
AND SMOLDERING OF MULTICRITERIA OPTICAL-ELECTRONIC DEVICE
FOR CONTROL OF EMERGENCY AND PRE-EMERGENCY SITUATIONS IN
COAL MINES**

Лисаков Сергей Анатольевич,
инженер, e-mail: foxlsa@mail.ru
Sergey A. Lisakov
Engineer

Сидоренко Антон Игоревич,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: sai@bti.secna.ru
Anton I. Sidorenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Сыпин Евгений Викторович,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: sev@bti.secna.ru
Evgeny V. Sipin
Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Бийский технологический институт, 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27
Biysk Institute of Technology, 659305, Altai Region, Biysk, st. Trofimova, 27

Аннотация: В результате выполнения работ проведено моделирование оптико-электронного датчика (ОЭД) оптического излучения пламенного горения и тления, входящего в состав многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах. Для моделирования ОЭД сформулированы основные аналитические зависимости и разработана компьютерная модель. Выполнена проверка адекватности компьютерного моделирования. Проведено моделирование потока излучения, поступающего на входной зрачок ОЭД при тлении угольной пыли и пламенном горении метановоздушной смеси с учетом влияния промежуточной среды. По результатам моделирования установлено, что для контроля излучения пламени используются спектральные диапазоны – от 2,45 до 3,2 мкм и от 4,3 до 4,6 мкм, а для контроля излучения тления спектральный диапазон – от 3,5 до 4,2 мкм. Выбрана элементная база для ОЭД с учетом данных о спектральном коэффициенте пропускания промежуточной среды.

Ключевые слова: оптико-электронный датчик, многокритериальный оптико-электронный прибор, контроль, тление, пламенное горение, моделирование, угольная шахта.

Abstract: As result of the work, simulation of optoelectronic sensor (OES) of optical radiation of flame and smoldering was performed. OES is part of a multi-criteria optoelectronic control device for emergency and pre-emergency situations in coal mines. Analytical dependencies were formulated for the computer simulation of EOS was developed. A check of the adequacy of the computer simulation was performed. Simulation of the radiation flux arriving at the entrance pupil of the EOS during the smoldering of coal dust and the flame burning of methane-air mixture was carried out taking into account the influence of the intermediate medium. The spectral ranges from 2.45 to 3.2 μm and from 4.3 to 4.6 μm are used to control the radiation of the flame. The spectral range from 3.5 to 4.2 μm is used to control the of smoldering radiation. The elemental base for the EOS has been selected taking into account the data on the spectral transmittance of the intermediate medium.

Key words: simulation, control, methane, carbon monoxide, carbon dioxide, coal dust, transfer function, detection threshold.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является создание и совершенствование средств достоверного контроля предаварийных и аварийных ситуаций в угольных шахтах по различным факторам [1, 2].

В Бийском технологическом институте разрабатывается многокритериальный оптико-электронный прибор для контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах (МКОЭП) включающий оптико-электронные датчики концентрации газов и угольной пыли и оптико-электронный датчик (ОЭД) оптического излучения тления и пламенного горения.

МКОЭП путем обработки данных с ОЭД должен учитывать связь критериев, обуславливающих наличие предаварийных (концентрации взрывоопасных газов и пыли) и аварийных ситуаций (тление, пламенное горение). Предлагается рассматривать следующие возможные связи [2]:

- влияние посторонних газов на показания ОЭД контроля концентрации отдельного газа (перекрестная чувствительность);
- влияние концентрации взвешенной угольной пыли на допустимую концентрацию метана;
- влияние промежуточной среды в виде атмосферы угольной шахты на выбор спектральных диапазонов контроля ОЭД и возможность обнаружения тления и пламенного горения.

На начальном этапе работ выполнена постановка задачи моделирования МКОЭП, по результатам которой сформулированы исходные данные и подходы, используемые при моделировании [2].

На данном этапе целью работы является моделирование ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения, входящего в состав МКОЭП.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Температура горения метановоздушной смеси, °С	1933
Интегральная степень черноты огненного шара при горении метановоздушной смеси	0,015 – 0,21
Спектральный диапазон излучения пламенного горения $\Delta\lambda$, мкм	1 – 5
Температура тления угольной пыли, °С	350 – 550
Интегральная степень черноты поверхности очага тления угольной пыли	0,7 – 0,85
Спектральный диапазон излучения тления угольной пыли $\Delta\lambda$, мкм	от 1 до 4,2

Исходные данные для моделирования ОЭД

оптического излучения тления и пламенного горения представлены в табл. 1 [2].

Особенностью при моделировании является учет спектрального коэффициента пропускания промежуточной среды при выборе спектральных диапазонов контроля ОЭД.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать основные аналитические зависимости для моделирования ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения и разработать компьютерную модель на основе этих зависимостей;
- выполнить проверку адекватности компьютерного моделирования на экспериментальных данных, приведенных в литературе;
- провести моделирование потока излучения, поступающего на входной зрачок ОЭД при тлении угольной пыли и пламенном горении с учетом влияния промежуточной среды;
- выбрать элементную базу для ОЭД с учетом результатов моделирования потока излучения, поступающего на входной зрачок ОЭД при тлении угольной пыли и пламенном горении.

Математическая модель ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения

При моделировании ОЭД пламени и тления входной величиной является поток излучения от очага пламенного горения метановоздушной смеси или тления угольной пыли, а выходной величиной – сигнал на выходе предварительного усилителя сигнала с фотоприемника.

При расчете используются подходы, представленные в работе [3], при этом для расчета оптического излучения пламени принимается допущение о том, что горение стехиометрической метановоздушной смеси представляет собой огненный шар.

Спектральный поток излучения на входном зрачке ОЭД (Вт) определяется излучением пламени, спектральным коэффициентом пропускания атмосферы и взаимным расположением ОЭД и огненного шара [3]:

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{\pi d_{\text{вх}}^2}{4} \cdot F_{\text{сф}} \cdot M_{\text{есф}}(\lambda) \tau_c(\lambda), \quad (1)$$

где $M_{\text{есф}}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость Вт/м²; $F_{\text{сф}}$ – угловой коэффициент, определяющий поток излучения со сферической поверхности огненного шара на входном зрачке с диаметром $d_{\text{вх}}$ (м); $\tau_c(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания промежуточной среды.

Спектральная энергетическая светимость $M_{\text{есф}}(\lambda)$ (Вт/м²) с поверхности огненного шара, определяется формулой [4]:

$$M_{\text{есф}}(\lambda) = M_{\text{еб}}(\lambda) \left[1 + \frac{2}{Dk(\lambda)} e^{-Dk(\lambda)} - \frac{2}{(Dk(\lambda))^2} (1 - e^{-Dk(\lambda)}) \right],$$

где λ – длина волны излучения, м; $M_{eb}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость абсолютно черного тела; D – диаметр огненного шара, м; $k(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения продуктов горения, m^{-1} .

Коэффициент $k(\lambda)$ вычисляется методом полинейного счета с использованием информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [5].

Угловой коэффициент $F_{сф}$ определяется для элементарной площадки dA (входной зрачок) и излучающей сферы радиусом r согласно формуле (2) [6]:

$$F_{сф} = \frac{\cos \alpha}{L^2}, \quad (2)$$

где $L=r$ – безразмерный параметр; α – угол между нормалью \vec{n} к площадке dA и прямой, соединяющей центр площадки dA с центром сферы; L – расстояние от площадки dA до центра сферы [6].

Моделирование оптического излучения от очага тления выполняется при условии, что тление отложившейся угольной пыли происходит на площадке квадратной формы [7].

Спектральная энергетическая светимость $M_{етл}(\lambda)$ (Вт/м²) с поверхности очага тления, определяется формулой:

$$M_{етл}(\lambda) = \varepsilon_{тл}(\lambda) M_{eb}(\lambda),$$

где $\varepsilon_{тл}(\lambda)$ – спектральная степень черноты поверхности очага тления угольной пыли.

Спектральный поток излучения от очага тления на входном зрачке ОЭД рассчитывается в соответствии с формулой (1) для $M_{етл}(\lambda)$, при угловом коэффициенте $F_{пл}$ для элементарной площадки dA_1 (входной зрачок) и поверхности конечных размеров A_2 (очаг тления) (Рис. 1) [10]:

$$F_{пл} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi l^2} dA_2,$$

где s – расстояние между элементарной площадкой dA_1 и элементом поверхности dA_2 ; β_1 и β_2 – углы между линией l и нормальми к dA_1 и dA_2 соответственно.

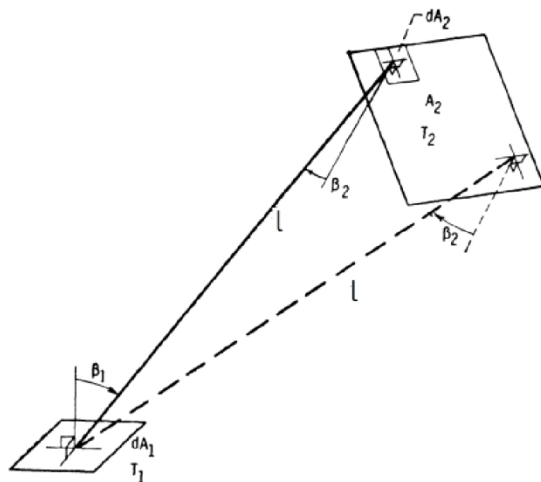


Рис. 1. Определение углового коэффициента $F_{пл}$ для элементарной площадки dA_1 и поверхности конечных размеров A_2

Расчет $\tau_c(\lambda)$ в формуле (1) выполняется для промежуточной среды в виде смеси газов присутствующих в атмосфере угольной шахты [2].

Коэффициент пропускания пылевоздушной смеси, слабо зависит от длины волны в исследуемом диапазоне и существенно не влияет на выбор элементной базы исходя из спектральных характеристик чувствительности фотоприемников [11]. Следовательно, влияние промежуточной среды в виде пылевоздушной смеси не рассматривается.

Спектральный коэффициент пропускания газовой смеси $\tau_c(\lambda)$, вычисляется для заданного состава атмосферы в соответствии с формулой [12]:

$$\tau_c(\lambda) = \prod_{i=1}^N e^{-k_i(\lambda) L C_i}$$

где $k_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения i -го газа в смеси, m^{-1} ; C_i – концентрация i -го газа, объемная доля; L – длина поглощающего слоя газа, м; N – число газов в смеси.

Расчет коэффициентов поглощения $k_i(\lambda)$ выполняется методом полинейного счета с использованием информационной системы, представленной в работе [5].

Выбор элементной базы (фотодиоды) для ОЭД выполняется путем определения из возможных вариантов фотодиода с максимальным значением отношения сигнал-шум.

Выходной сигнал определяется на выходе предварительного усилителя сигнала с фотоприемника при воздействии на него излучения пламени (тления). Предварительный усилитель представляет преобразователь ток-напряжение (ПТН) построенный на базе операционного усилителя (ОУ).

Расчет отношения сигнал-шум выполняется по формуле [13]:

$$\mu = \frac{U_{ПТН}}{U_{ш}},$$

где $U_{ПТН}$ – полезный сигнал, В; $U_{ш}$ – среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН, рассчитываемое на основе данных о шуме фотодиода и шуме ПТН, В.

Выходной сигнал ПТН вычисляется по формуле [13]:

$$U_{ПТН} = K_{ПТН} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_f(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) d\lambda,$$

где $K_{ПТН}$ – коэффициент преобразования ПТН, В/А; $\lambda_1 \dots \lambda_2$ – спектральный диапазон чувствительности фотодиода; $S_f(\lambda)$ – спектральная токовая чувствительность фотодиода, А/Вт; $\Phi_e(\lambda)$ – спектральный поток излучения на входном зрачке ОЭД, Вт.

Среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН $U_{ш}$ описывается выражением [14]:

$$U_{ш} = \sqrt{\left\{ (U_y^*)^2 \left[\left(1 + \frac{R_{oc}}{R} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 R_{oc}^2 \right] + R_{oc}^2 (I_{ом}^*)^2 + 4kTR_{oc} \right\} \cdot \Delta f},$$

где $(U_y^*)^2$ – спектральная плотность шума по

напряжению ОУ, В²/Гц; R – эквивалентное сопротивление, определяемое входным сопротивлением ОУ и дифференциальным сопротивлением фотодиода, Ом; R_{об} – сопротивление обратной связи, Ом; C – эквивалентная емкость, определяемая входной емкостью ОУ и емкостью фотодиода, Ф; (I_{ош}^{*})² – общая спектральная плотность шума тока (источник общего шумового тока I_{ош} учитывает шум тока ОУ и тепловой шум эквивалентного сопротивления R), А²/Гц; k – постоянная Больцмана, 1,38064852·10⁻²³, Дж·К⁻¹, T – температура фотодиода, К, Δf – ширина полосы частот схемы, Гц.

Проверка адекватности компьютерной модели

Проверка адекватности компьютерного моделирования интегральной энергетической светимости огненного шара выполнялась ранее в работе [3] путем сопоставления с экспериментальными данными из работ Браун [15], Харди [16], Фей [17]. Расчетные и экспериментальные значения интегральной энергетической светимости огненных шаров составляют от 20 до 210 кВт/м² для диаметров от 0,1 до 5 м и хорошо согласуются с экспериментальными данными [3].

Корректность расчета оптического излучения от очага тления подтверждается согласованностью данных о степени черноты использованных при расчете с данными других авторов [18, 19].

Моделирование потока излучения на входном зрачке ОЭД обнаружения пламенного горения и тления

Спектральный поток излучения пламени на входном зрачке ОЭД рассчитывался на основе исходных данных о коэффициенте поглощения продуктов горения k(λ) и параметрах D, d_{вх}.

Расчет k(λ) выполняется для реакции продуктов горения стехиометрической метановоздушной смеси с объемными долями в воздухе равными для CO₂ – 9,5% и для H₂O – 19 % в диапазоне длин волн от 1 до 5 мкм. Спектральный коэффициент поглощения k(λ) рассчитывается при температуре

продуктов горения метана T=1933 °С и атмосферном давлении 101 кПа [3].

Значение диаметра огненного шара принято равным 0,25 м, что соответствует начальной стадии развития горения. Огненный шар данного размера возникает через 45 мс после зажигания при видимой скорости распространения пламени (2,82 м/с) [3].

Расстояние l от очага пламени принималось равным 25 м, угол α = 90°.

Спектральный поток излучения тления на входном зрачке ОЭД определяется на основе данных о спектральной степени черноты очага тления ε_{тл}(λ).

Экспериментальные данные о спектральной степени черноты при тлении и горении отложившейся угольной пыли для температур от 200 до 1000 °С взяты из работы [9] и представлены на Рис.2.

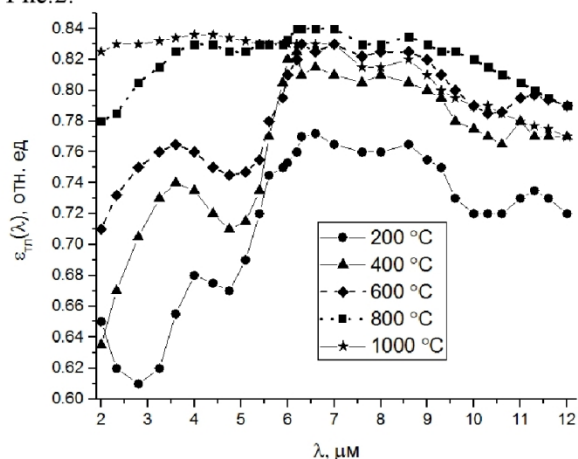
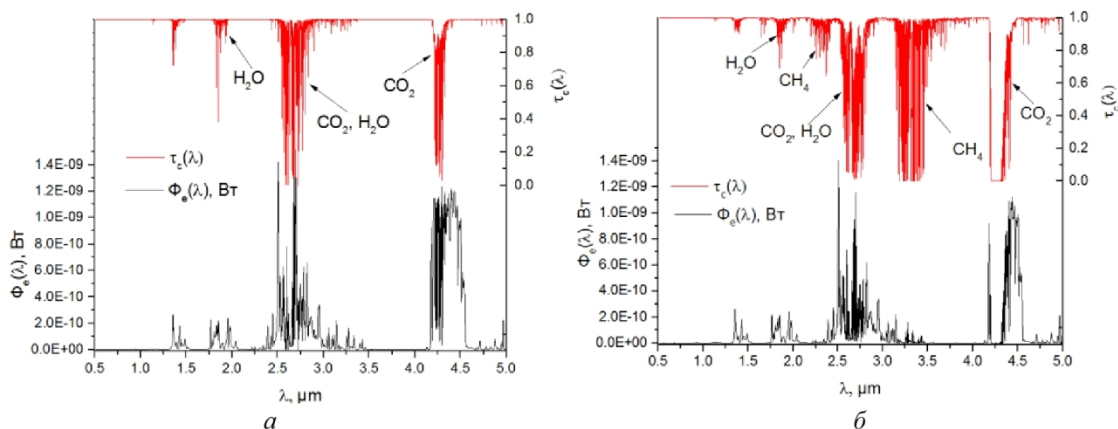


Рис. 2. Экспериментальная спектральная степень черноты тления отложившейся угольной пыли

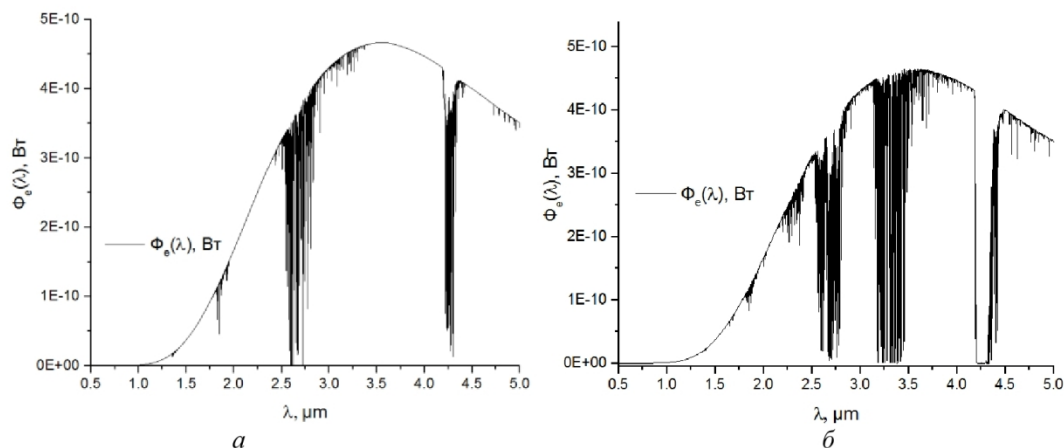
Температура тления угольной пыли при расчете устанавливается равной 550 °С [8]. Площадь очага тления принята равной 0,1 м². Расстояние l от очага тления равно 25 м. Угол β₁ = β₂ = 0.



а – нормальный атмосферный воздух;

б – шахтный воздух с наличием CH₄ – 2,5 %, CO₂ – 2% и для CO – 0,01 %

Рис. 3. Спектральный поток на входном зрачке ОЭД от очага пламенного горения



*а – нормальный атмосферный воздух;
 б – шахтный воздух с наличием CH_4 – 2,5 %, CO_2 – 2% и CO – 0,01 %*
 Рис. 4. Спектральный поток на входном зрачке ОЭД от очага тления для разных составов атмосферы

Диаметр входного зрачка при расчете потока излучения от очагов пламенного горения и тления принят равным 1 мм, исходя из характерного диаметра чувствительной площадки для инфракрасных фотодиодов.

Расчет $\tau_c(\lambda)$ выполняется с учетом оценки влияния газов шахтной атмосферы CH_4 , CO_2 , CO на коэффициент пропускания среды для двух составов атмосферы:

1) состав характерный для нормального атмосферного воздуха – воздух средних широт на высоте $H=0$ м летнего сезона на основе модели атмосферы ИОА СО АН СССР, представленный в системе [5]. Смесь имеет следующий состав (объемные доли %): N_2 – 77,7; O_2 – 20,7; H_2O – 1,56; CO_2 – 0,03; CH_4 – $1,48 \cdot 10^{-4}$; CO – $4,7 \cdot 10^{-5}$; N_2O – $2,8 \cdot 10^{-5}$; SO_2 – $8 \cdot 10^{-6}$; O_3 – $2 \cdot 10^{-6}$; NH_3 – $1 \cdot 10^{-6}$.

2) шахтный воздух с составом, полученным с учетом замещения части кислорода и азота в нормальном атмосферном воздухе выделяющимися газами CH_4 , CO_2 , CO с объемными долями в воздухе равными CH_4 – 2,5 %, CO_2 – 2% и для CO – 0,01 % [2].

Результаты расчета спектрального потока на входном зрачке ОЭД от очага пламенного горения с учетом коэффициента пропускания для разных составов атмосферы приведены на рис. 3.

Влияние промежуточной среды в виде нормального атмосферного воздуха на поток излучения на входной зрачке ОЭД определяется, главным образом, поглощением излучения углекислого газа в спектральных полосах 2.65 и 4.2 – 4.3 мкм и паров воды в полосах 2.6 – 2.85 и 1.86 – 1.94 мкм (рис. 3 а). Для шахтного воздуха пропускание среды определяется с учетом дополнительного поглощения излучения метаном – полосы поглощения 1.65, 2.30, 3.2 – 3.45 мкм) и CO (2.24, 4.4 – 4.8 мкм) (рис. 3 б).

Выбор спектральных диапазонов контроля излучения пламени выполняется исходя из спек-

трального потока излучения на входном зрачке ОЭД, полученного для промежуточной среды в виде шахтной атмосферы, наиболее сильно поглощающей поток излучения пламени. Контроль излучения пламени может выполняться в двух спектральных диапазонах – от 2,45 до 3,2 мкм и от 4,3 до 4,6 мкм.

Результаты расчета спектрального потока на входном зрачке ОЭД от очага тления для разных составов атмосферы приведены на рис. 4.

Контроль излучения тления пропускания выполняется в спектральном диапазоне – от 3,5 до 4,2 мкм, где излучение тления несущественно поглощается промежуточной средой.

Выбор элементной базы для ОЭД обнаружения пламенного горения и тления

По результатам выбора спектральных диапазонов контроля излучения пламени определена совокупность фотоприемников для контроля излучения пламени и тления. Из совокупности фотоприемников выбираются наиболее подходящие, т.е. фотоприемники, обеспечивающие наибольшее отношение сигнал-шум.

В качестве фотоприемников, применяемых в оптико-электронном датчике пламенного горения и тления, применяются инфракрасные фотодиоды, включенные в фотогальваническом режиме [7].

В табл. 2 приведены данные об отечественных фотодиодах контроля излучения пламени и тления. Фотодиоды PD24-20, PD36-10, PD48, ФЭ722, ФЭ723, ФЭ724, можно использовать для излучения пламени и тления в характерных полосах излучения.

Параметры фотодиодов, используемые при расчете отношения сигнал-шум, берутся из документации на фотодиоды.

Преобразователь ток-напряжение (ПТН) для фотодиодов среднего ИК диапазона строится на базе малошумящего ОУ, например, AD797 фирмы Analog Device в соответствии с рекомендациями

Таблица 2. Параметры фотодиодов

Фотодиод	Спектральный диапазон чувствительности, мкм	Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	Производитель
PD24-20	0,9–2,5	2,1	ООО «АИБИ» [20]
PD36-10	1,0–3,8	3,4	ООО «АИБИ»
PD48	2,5–4,9	4	ООО «АИБИ»
ФЭ722	1–3,5	2,6	ОАО «НИИ «ГИРИКОНД»» [21]
ФЭ723	1–4,2	3,2	ОАО «НИИ «ГИРИКОНД»»
ФЭ724	1–4,7	3,7	ОАО «НИИ «ГИРИКОНД»»

[22]. Параметры ОУ используемые при расчете шума равны $U_y^* = 0,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, $I_y^* = 2 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$. Входное сопротивление ОУ $R_{вх}$ составляет 100 МОм, входная емкость – 5 пФ.

Значение ширины полосы частот схемы Δf при расчете шума составляет 1 МГц, исходя из требований к быстродействию приборов.

Результаты выбора элементной базы контроля излучения пламени и тления для промежуточной среды различными составами атмосферы представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты выбора элементной базы для ОЭД

Фотодиод	$\mu_{вых}$
Контроль пламенного горения	
Нормальный атмосферный воздух	
PD24-20	13
PD36-10	60
ФЭ722	69
ФЭ723	59
ФЭ724	57
PD48	20
Шахтная атмосфера	
PD24-20	12
PD36-10	55
ФЭ722	60
ФЭ723	50
ФЭ724	35
PD48	10
Контроль излучения тления	
Нормальный атмосферный воздух	
PD36-10	90
ФЭ722	148
ФЭ723	197
ФЭ724	148
PD48	23
Шахтная атмосфера	
PD36-10	85
ФЭ722	136
ФЭ723	178
ФЭ724	132
PD48	19

Наличие промежуточной среды в виде шахтной атмосферы приводит к снижению значений отношения сигнал-шум при контроле излучения

пламени и тления приблизительно на 10% по сравнению с нормальным атмосферным воздухом для исследуемых фотодиодов. Значения отношения сигнал-шум полученные для очага тления превышают значения, полученные для пламенного горения.

В результате выбора элементной базы установлено, что при контроле излучения пламенного горения могут быть использованы фотодиоды ФЭ722 и PD36-10. Для контроля излучения тления может быть использован фотодиод ФЭ723.

Заключение

В результате выполнения работ проведено моделирование ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения, входящего в состав многокритериальном оптико-электронном приборе контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах.

Моделирование оптического излучения пламени выполнялось при допущении о том, что горение стехиометрической метановоздушной смеси представляет огненный шар. Оптическое излучение от очага тления моделировалось с учетом того, что горение отложившейся угольной пыли происходит на площадке квадратной формы. Расчет коэффициента выполняется для промежуточной среды с двумя составами характерными для нормального атмосферного воздуха и шахтного воздуха.

Выбор спектральных диапазонов контроля излучения пламени выполнен по результатам спектрального потока излучения на входном зрачке ОЭД, полученного для промежуточной среды в виде шахтной атмосферы, наиболее сильно поглощающей поток излучения пламени. Контроль излучения пламени может выполняться в двух спектральных диапазонах – от 2,45 до 3,2 мкм и от 4,3 до 4,6 мкм. Контроль излучения тления пропускается выполняется в спектральном диапазоне – от 3,5 до 4,2 мкм, где излучение тления несущественно поглощается промежуточной средой.

В результате выбора элементной базы, исходя из наибольшего отношения сигнал-шум установлено, что при контроле излучения пламенного горения могут быть использованы фотодиоды ФЭ722 и PD36-10. Для контроля излучения тления может быть использован фотодиод ФЭ723.

Исследование выполнено при поддержке
гранта Президента РФ, № гранта МК-868.2017.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorenko A.I. Prospects for the development of multicriterion electro-optical system for alarm and pre-emergency situations control in a coal mine / A.I. Sidorenko, S.A. Lisakov, E.V. Sypin // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 349–352.
2. Лисаков С.А. Постановка задачи моделирования многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, И.С. Зорин, Е.В. Сыпин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 96–106.
3. Лисаков С.А. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Г.В. Леонов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 3. – С.32–41.
4. Баротермическое действие взрыва: ударная волна и термическое поражение / Д. О. Морозов, К. Л. Степанов // Горение и плазмохимия. – 2013. – том 11. – № 1. – С. 57-70.
5. Михайленко С.Н., Бабилов Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система "Спектроскопия атмосферных газов". Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 09. С. 765-776.
6. Блох А.Г. Теплообмен излучением: Справочник/А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
7. Горбунов Н.И. Оптоэлектронные приборы для обнаружения и регистрации электромагнитного излучения / Горбунов Н.И. [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – №1. С. 47–55.
8. Захаренко Д.М. Особенности развития теплофизических процессов самовозгорания и взрыва пыли бурых углей: диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.14. – Красноярск, 2001. – 137 с.: ил.
9. Bhattacharya S.P., Wall T.F. Development of emittance of coal particles during devolatilisation and burnoff. Fuel, 1999, v. 78, pp. 511–519.
10. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.
11. S.A. Lisakov, Computer Simulation of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», / Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 374 – 379.
12. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капранов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный // Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 6. – С. 112–118.
13. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для студентов вузов [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2011. – 568 с.
14. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с: ил.
15. Brown, L.E., Wesson, H.R., and Welker, J.R. (1974). Predict LNG fire radiation. Hydrocarbon Processing, pp. 141–143.
16. Hardee H.C., Lee D.O., Benedick W.B. Thermal hazards from LNG fireballs. Comb. Sci. and Techn., 1978, v. 17, pp. 189–197.
17. Fay J.A., Desgroseilliers G.J., Lewis D.H. Radiation from burning hydrocarbon clouds. Comb. Sci. and Techn., 1979, v. 20, pp. 141–151.
18. Solomon P.R., Carangelo R.M., Best P.E., Markham J.R., Hamblen D.G. The spectral emittance of pulverized coal and char. Symp Combust, 1988, 21, pp. 437–446.
19. Baxter L.L., Fletcher T.H., Ottesen D.K. Spectral emittance measurements of coal particles. Energy Fuels, 1988; 2, pp. 423–430.
20. Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК области спектра 0.7 - 5.0 мкм. Каталог ООО «АИБИ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ibsg.ru/catalogue_2015.pdf
21. ОАО «НИИ «Гириконт». Фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.giricond.ru/production/photoelectric/>
22. Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов A{3}B{5} среднего ИК-диапазона спектра [Текст] / Г. А. Гаврилов, Б. А. Матвеев, Г. Ю. Сотникова // Письма в "Журнал технической физики". - 2011. – Т. 37, вып. 18. – С. 50-57.

REFERENCES

1. Sidorenko A.I. Prospects for the development of multicriterion electro-optical system for alarm and pre-emergency situations control in a coal mine / A.I. Sidorenko, S.A. Lisakov, E.V. Sypin // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 349–352.
2. S.A. Lisakov, (2017). *Postanovka zadachi modelirovaniya mnogokriterial'nogo optiko-jelektronnoho pribora kontrolja avarijnyh i predavarijnyh situacij v ugol'nyh shahtah* [Statement of the problem of modeling a multicriteria electro-optical device for monitoring emergency and pre-emergency situations in coal mines] / S.A. Lisakov, A.I. Sidorenko, I.S. Zorin, E.V. Sypin // Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti, No 2, pp. 96 – 106.
3. Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. *Komp'yuternoe modelirovanie izlucheniya plameni pri gorenii metano-vozdushnyh smesey na nachal'noj stadii razvitiya* [Computer modeling of flame radiation at burning of methane-air mixtures at Initial stage of development], Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies, 2016, № 3, pp. 32–41.
4. Morozov D. O., Stepanov K.L. *Barotermicheskoe dejstvie vzryva: udarnaja volna i termicheskoe porazhenie, Gorenje i plazmohimija* [Barothermal effect of the explosion: shock wave and thermal damage, burning and plasma chemistry], 2013, Vol. 11, No 1, pp. 57–70.
5. S.N. Mihajlenko, (2005). *Informacionno-vychislitel'naja sistema "Spektroskopija atmosferynyh gazov". Struktura i osnovnye funkcii* [Informational-computational system "Spectroscopy of atmospheric gases". Structure and main functions] / Mihajlenko S.N., Babikov Ju.L., Golovko V.F. // Optika atmosfery i okeana. Vol. 18, No 09. pp. 765 – 776.
6. Blokh A.G. *Teploobmen izlucheniem: Spravochnik* [Radiation Heat Transfer: A Handbook] A. G. Blokh, Yu. A. Zhuravlev, L. N. Ryzhkov. - M.: Energoatomizdat, 1991. - 432 p.
7. Gorbunov N.I. *Optoelektronnye pribory dlya obnaruzheniya i registracii ehlektromagnitnogo izlucheniya* [Optoelectronic devices for the detection and detection of electromagnetic radiation] Gorbunov N.I. [et al.] // Fire and Explosion Safety. - 2008. - №1. Pp. 47–55.
8. Zakharenko D.M. *Osobennosti razvitiya teplofizicheskikh processov samovozgoraniya i vzryva pyli bu-ryh uglej* [Features of development of thermophysical processes of self-ignition and explosion of brown coal dust]: dissertation ... candidate of technical sciences: 01.04.14. - Krasnoyarsk, 2001, 137 pp., II.
9. Bhattacharya S.P., Wall T.F. Development of emittance of coal particles during devolatilisation and burnoff. *Fuel*, 1999, v. 78, pp. 511–519.
10. Siegel, R., J. Howell. *Teploobmen izlucheniem* [Radiation heat transfer], Moscow, Mir, 1975, 935 p.
11. S.A. Lisakov, Computer Simulation of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», / Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 374 – 379.
12. S.E. Aleksandrov, (2009). *Modelirovanie harakteristik opticheskikh gazovykh sensorov na osnove diodnykh optopar srednego IK-diapazona spektra* [Modeling of the characteristics of optical gas sensors based on diode optocouplers of the middle IR spectral range] / S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, A.A. Kapralov, B.A. Matveev, G.Ju. Sotnikova, M.A. Remennyj // Zhurnal tehnichekoj fiziki, 2009, Vol. 79, No. 6, pp. 112 – 118.
13. Yakushenkov, Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-ehlektronnykh priborov: uchebnik dlya studentov vuzov* [Theory and calculation of optical-electronic devices: a textbook for students of universities] Yu.G. Yakushenkov. - 6th ed., Pererab. and add. - M.: Logos, 2011. - 568 p.
14. Dzh. Gaujer, *Opticheskie sistemy svjazi: Per. s angl.* [Optical communication systems] // M.: Radio i svjaz', 1989. – 504 pp: il.
15. Brown, L.E., Wesson, H.R., and Welker, J.R. (1974). Predict LNG fire radiation. *Hydrocarbon Processing*, pp. 141–143.
16. Hardee H.C., Lee D.O., Benedick W.B. Thermal hazards from LNG fireballs. *Comb. Sci. and Techn.*, 1978, v. 17, pp. 189–197.
17. Fay J.A., Desgroseilliers G.J., Lewis D.H. Radiation from burning hydrocarbon clouds. *Comb. Sci. and Techn.*, 1979, v. 20, pp. 141–151.
18. Solomon P.R., Carangelo R.M., Best P.E., Markham J.R., Hamblen D.G. The spectral emittance of pulverized coal and char. *Symp Combust*, 1988, 21, pp. 437–446.
19. Baxter L.L., Fletcher T.H., Ottesen D.K. Spectral emittance measurements of coal particles. *Energy Fuels*, 1988; 2, pp. 423–430.
20. Catalog of "AIBI", *Optoelektronnye pribory dlja blizhnej i srednej IK oblasti spektra 0.7 – 5.0 mkm*. Katalog OOO «AIBI» [Optoelectronic devices for the near and middle IR spectral range 0.7 – 5.0 μm.] [Electronic resource]. – Access mode: http://www.ibsg.ru/catalogue_2015.pdf
21. JSC "Research Institute" Girikond ". Photoelectric and optoelectronic devices [Electronic resource]. -

Access Mode: <http://www.giricond.ru/production/photoelectric/>

22. G.A. Gavrilov, *Predel'naja chuvstvitel'nost' fotopriemnogo ustrojstva na osnove fotodiodov A{3} B{5} srednego IK-diapazona spektra* [The limiting sensitivity of the photodetector based on photodiodes A {3} B {5} of the middle IR spectral range] / G. A. Gavrilov, B. A. Matveev, G. Ju. Sotnikova // *Pis'ma v «Zhurnal tehnic-eskoj fiziki»*. – 2011. – T. 37, vyp. 18. – pp. 50-57.

Поступило в редакцию 11.07.2018

Received 11 July 2018