

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-5-17

УДК 622.81

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

COMPUTER SIMULATION OF OPTICAL-ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF GASES AND COAL DUST GAS CONCENTRATION FOR CONTROL OF EMERGENCY AND CREDITS 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: Проведено компьютерное моделирование характеристик оптико-электронных датчиков (ОЭД) концентрации CH_4 , CO_2 , CO и угольной пыли, входящих в состав многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах. Сформулированы аналитические зависимости для моделирования ОЭД концентрации газов и пыли, и на их основе разработана компьютерная модель. Проведена проверка адекватности компьютерной модели на экспериментальных данных. Относительная погрешность моделирования ОЭД CO_2 не превышает 5 %, CO – 7 %, C_2H_4 – 4 %, ОЭД концентрации угольной пыли не превышает 7 %. Выполнено компьютерное моделирование спектрального коэффициента пропускания газов и пылевоздушной смеси и по его результатам проанализировано влияние перекрестной чувствительности для ОЭД газов и угольной пыли с целью уточнения спектральных диапазонов контроля. Контроль концентрации метана выполняется в спектральном диапазоне – 3,2-3,7 мкм, диоксида углерода – 4,2-4,4 мкм, оксида углерода диапазон – 4,5-4,7 мкм. Выбрана элементная база (источник и приемник излучения) для ОЭД концентрации газов и пыли. Проведено исследование влияния посторонних газов на показания ОЭД, контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность). Проведено исследование по учету влияния на показания ОЭД концентрации пыли и газов, являющихся посторонними.

Ключевые слова: моделирование, контроль, метан, оксид углерода, диоксид углерода, угольная пыль, передаточная функция, порог обнаружения.

Abstract: Computer simulation of electro-optical sensors for the concentration of methane, carbon monoxide, dioxide and coal dust was carried out. These sensors are part of multi-criteria electro-optical device for

monitoring emergency and preemergency situations in coal mines. The main analytical dependencies for the simulation of electro-optical sensors have been determined. Computer model has been developed on the basis of this dependencies. The verification of the computer model adequacy is based on experimental data. The relative error in modeling the CO₂ sensor does not exceed 5%, CO – 7%, C₂H₄ – 4%, coal dust sensor – 7%. Simulation of the spectral transfer coefficient of gases and dust-air mixture was carried out. The effect of cross-sensitivity for gas EOS and coal dust EOS for clarifying of control spectral ranges was analyzed based on simulation results. Methane concentration is controlled in the spectral range of 3.2 – 3.7 μm, carbon dioxide – in spectral range of 4.2 – 4.4 μm, carbon monoxide – in spectral range of 4.5 – 4.7 μm. The hardware (source and receiver of radiation) is selected for opto-electronic sensors of the concentration of gases and dust. Investigation of the foreign gases effect on the readings of the EOS, which controls the concentration of an individual gas (cross sensitivity) was carried out. Effect of extraneous gases on the EOS readings of the concentration of dust and gases has been determined.

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

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре МСИА Бийского технологического института разрабатывается многокритериальный оптико-электронный прибор контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах (МКОЭП). МКОЭП выполняет комплексный контроль факторов, связанных с предаварийными и аварийными ситуациями.

МКОЭП включает оптико-электронные датчики (ОЭД): концентрации газов; концентрации угольной пыли; оптического излучения тления и пламенного горения.

В МКОЭП сигналы с ОЭД посредством сети передачи данных поступают на блок обработки данных. Блок обработки данных прибора анализирует информацию, сигнализирует о наличии предаварийных или аварийных ситуаций и выдает управляющие сигналы для приведения охраняемого объекта к нормальному режиму функционирования [1, 2].

Алгоритм обработки данных с ОЭД должен учитывать связь критериев, обуславливающих наличие предаварийных (концентрации взрывоопасных газов и пыли) и аварийных ситуаций (тление, пламенное горение). Предлагается учитывать взаимное влияние следующих критериев:

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

На начальном этапе работ выполнена постановка задачи моделирования МКОЭП. При выполнении постановки задачи моделирования установлено, что моделируются ОЭД концентрации основных газов (метан, оксид углерода и диоксид углерода) и ОЭД концентрации угольной пыли [2].

В результате были сформулированы подходы к моделированию МКОЭП и определены исход-

ные данные для моделирования [1, 2].

Исходные данные для проведения моделирования ОЭД концентрации газов и пыли представлены в табл. 1 [2].

Моделирование МКОЭП заключается в получении зависимостей выходных сигналов ОЭД от входной физической величины – контролируемого параметра.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
ОЭД концентрации основных газов	
Концентрация CH ₄ , об. %	0-2.5
Концентрация CO ₂ , об. %	0-2
Концентрация CO, об. %	0-0.01
Спектральные коэффициенты поглощения k(λ) для CH ₄ , CO ₂ , CO	Берутся из информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [7].
Диапазон длин волн излучения λ, мкм	3,2 – 3,4 для CH ₄ ; 4,2 – 4,3 для CO ₂ и 4,4 – 4,8 для CO.
ОЭД концентрации угольной пыли	
Концентрация угольной пыли, г/м ³	0 – 7
– Диапазон длин волн излучения λ, мкм	– 0,6 – 1,1

Моделирование предполагается проводить в два этапа:

- 1) Моделирование ОЭД концентрации газов и пыли, входящих в состав прибора.
- 2) Моделирование ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения.

На данном этапе целью работы является моделирование ОЭД концентрации газов и пыли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные аналитические зависимости для моделирования ОЭД концентрации

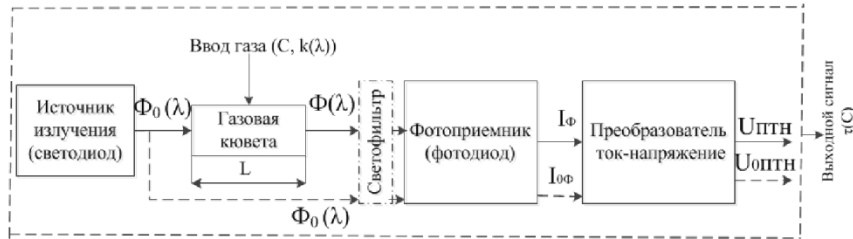


Рис. 1. Структурная схема оптического датчика концентрации газа

газов и пыли и на их основе разработать компьютерную модель;

– выполнить проверку адекватности компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе;

– провести моделирование спектрального коэффициента пропускания газов и пылевоздушной смеси (газодисперсная система угольная пыль–воздух) и проанализировать влияние перекрестной чувствительности для ОЭД газов и угольной пыли с целью уточнения спектральных диапазонов контроля;

– выбрать элементную базу (источник и приемник излучения) для ОЭД концентрации газов и пыли;

– провести исследование влияния других (посторонних) газов на показания ОЭД, контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность);

– провести исследование по учету влияния на показания ОЭД концентрации угольной пыли посторонних газов.

Аналитические зависимости для моделирования оптического датчиков концентрации газов и пыли.

А. Математическая модель ОЭД измерения концентрации основных газов

При моделировании оптического датчиков измерения концентрации газов для каждого ОЭД входной величиной является концентрация газа, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания оптического излучения кюветы с газом (передаточная функция датчика) [8].

Структурная схема ОЭД концентрации газа приведена на рис. 1.

В ОЭД концентрации газа используется источник (светодиод) и приемник излучения (фотодиод) со спектральными характеристиками в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, газовая кювета, преобразователь ток-напряжение на базе операционного усилителя (ОУ).

Источник и приемник располагаются на одной оптической оси, а выходной зрачок светодиода направлен на входной зрачок фотодиода – схема расположения «face-to face» («лицом к лицу») [6]. Фотодиод включен в фотогальваническом режиме.

Дополнительно датчик может содержать светофильтр для снижения перекрестной чувстви-

тельности к посторонним газам.

Моделирование ОЭД концентрации газов выполняется с учетом аналитических зависимостей, представленных в работах [3-6].

Подход к моделированию ОЭД измерения концентрации газа заключается в расчете спектрального коэффициента пропускания с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера на основе данных о спектральном коэффициенте поглощения газовой смеси [3]:

$$\tau(\lambda) = \Phi(\lambda) / \Phi_0(\lambda) = e^{-k(\lambda)LC}, \quad (1)$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения, Вт; $\Phi(\lambda)$ – спектральный поток излучения (Вт), прошедшего через газ с концентрацией C (в объемной доле), спектральным коэффициентом поглощения газовой смеси $k(\lambda)$ (м^{-1}) при длине пути поглощения L (м).

Передаточная функция ОЭД концентрации газа определяется формулой [3]:

$$\tau(C) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) \cdot e^{-k(\lambda)LC} \cdot \prod_{i=1}^N e^{-k_i(\lambda)LC_i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где $S_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприемника (фотодиода), А/Вт; $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения источника (светодиода), Вт; $\tau_{c\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания светофильтра; $k(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения исследуемого газа, м^{-1} ; L – длина поглощающего слоя газа, м; C – концентрация исследуемого газа, объемная доля; $k_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения i -го постороннего газа, м^{-1} ; C_i – концентрация i -го постороннего газа, объемная доля.

На основе передаточной функции ОЭД концентрации газа оценивается чувствительность, абсолютная и относительная погрешность измерений концентрации газа и порог обнаружения.

Наклон передаточной характеристики определяет чувствительность ОЭД $S(C) = d\tau/dC$. Значение чувствительности определяется как $dC = d\tau/S(C)$ (об. доля). При заданном отношении сигнал-шум ОЭД μ минимальное регистрируемое изменение $d\tau$ равно $1/\mu$, при этом абсолютная погрешность измерений и порог обнаружения (LOD – limit of detection) рассчитываются по формулам [3]:

$$\Delta C = \frac{1}{\mu \cdot S(C)}, \quad (3)$$

$$LOD = \frac{1}{\mu \cdot S(C \rightarrow 0)}. \quad (4)$$

Значение относительной погрешности полу-

ченного результата определяется как $-\delta = \Delta C/C$.

Для расчета передаточной функции и погрешности измерения ОЭД необходимы данные о спектральном потоке от источника излучения, спектральной чувствительности фотоприемника, спектральном коэффициенте поглощения исследуемого газа, а также необходимо рассчитать отношение сигнал-шум.

Данные о спектральном потоке источника излучения и спектральной чувствительности фотоприемника берутся из технической документации на используемую элементную базу. Спектральный поток излучения от светодиода $\Phi_{e0}(\lambda)$ необходимо получить на основе данных из документации об интегральном потоке излучения светодиода и спектральном потоке излучения в относительных единицах.

Спектральный коэффициент поглощения $k(\lambda)$ рассчитывается методом полинейного счета (line-by-line method) с помощью информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [7].

При выполнении моделирования датчиков концентрации основных газов объемный состав газовой смеси задается с учетом замещения выделяющимися газами кислорода и азота в нормальном атмосферном воздухе. Например, уменьшение концентрации кислорода в шахтной атмосфере в результате выделения метана определяется по формуле [2]:

$$C_{O_2} = 0.21(1 - C_{CH_4}), \quad (5)$$

а азота по формуле:

$$C_{N_2} = 0.79(1 - C_{CH_4}). \quad (6)$$

Отношение сигнал-шум на выходе ПТН ОЭД концентрации газа рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{U_{ПТН}}{U_{ш}}, \quad (7)$$

где $U_{ПТН}$ – полезный сигнал на выходе ПТН при воздействии на вход фотодиода излучения от источника (при отсутствии поглощающей среды), В; $U_{ш}$ – среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН, определяемое шумом фотодиода и шумом ПТН, В.

Сигнал на выходе ПТН может быть рассчитан на основе формулы:

$$U_{ПТН} = K_{ПТН} \cdot I_{\Phi}, \quad (8)$$

где I_T – темновой ток фотодиода, А; I_{Φ} – фототок, обусловленный внешним излучением, А; $K_{ПТН}$ – коэффициент преобразования ПТН, В/А.

Фототок, генерируемый фотодиодами ОЭД, рассчитывается по формуле:

$$I_{\Phi} = k_{эос} \cdot k_L \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где $\lambda_1 \dots \lambda_2$ – спектральный диапазон, в котором происходит прием излучения фотодиодом; $S_I(\lambda)$ – спектральная токовая чувствительность фотоприемника, А/Вт; $\Phi_{e0}(\lambda)$ – спектральный поток излучения от светодиода, Вт; $k_{эос}=0.1$ – коэффициент эффективности оптической системы из работы [8]; k_L – коэффициент определяющий зависимость фототока от расстояния l между светодиодом и фотодиодом (от 0 до 1).

Коэффициент k_L получают на основе данных, приведенных в технической документации для оптопар (светодиод-фотодиод). Например, на рис. 2 приведена зависимость фототока от расстояния между светодиодом Led34 и фотодиодом Pd34 выпускаемых фирмой ООО «ИюффеЛЕД» при схеме расположения «face-to face» при различном токе питания взята из работы [6].

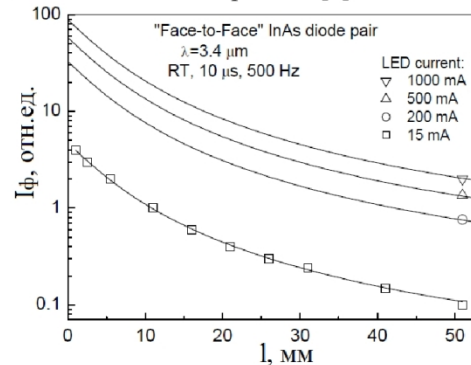


Рис. 2. Зависимость фототока от расстояния между светодиодом Led34 и фотодиодом Pd34

На рис показан k_L приведенный к диапазону от 0 до 1.

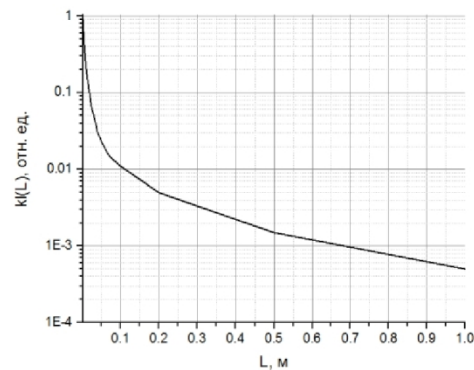


Рис. 3. Коэффициент k_L

Среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН $U_{ш}$ описывается выражением [9]:

$$U_{ш} = \sqrt{\left\{ (U_y^*)^2 \left[\left(1 + \frac{R_{oc}}{R} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C_{экв}^2 R_{oc}^2 \right] + R_{oc}^2 (I_{оп}^*)^2 + 4kTR_{oc} \right\} \cdot \Delta f}, \quad (10)$$

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_{oc} – сопротивление обратной связи, Ом; $C_{экв}$ – эквивалентная емкость, определяемая входной емкостью ОУ и емкостью фотодиода, Ф; $(I_{оп}^*)^2$ – общая спектральная плотность шума тока (источник общего шумового тока $I_{оп}$ учитывает шум тока ОУ и тепловой шум эквивалентного сопротивления R), А²/Гц; k – постоянная

Больцмана, $1,38064852 \cdot 10^{-23}$, Дж·К⁻¹, Т – температура фотоиода, К, Δf – ширина полосы частот схемы, Гц.

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [10], для моделирования выбран усилитель AD797 на биполярных транзисторах фирмы Analog Device с параметрами $U_y^*=0,9$ нВ/√Гц, $I_y^*=2$ пА/√Гц, $R_{вх}=100$ МОм. Входная емкость ОУ равна 5 пФ. Значение сопротивления $R_{ос}$ определяет коэффициент $K_{ПН}$, который при выполнении моделирования принимается равным $K_{ПН}=10^6$.

Б. Моделирование ОЭД концентрации угольной пыли

При моделировании ОЭД концентрации угольной пыли входной величиной является концентрация угольной пыли, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания (передаточная функция датчика).

Структурная схема опико-электронного датчика концентрации угольной пыли аналогична схеме датчика концентрации газа (рис. 1), однако в кювету поступает пылевоздушная смесь.

Расчет коэффициента пропускания выполняется с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера на основе данных о спектральном безразмерном коэффициенте ослабления $k_{П}(\lambda)$ излучения газодисперсной системы угольная пыль-воздух и средней удельной поверхности пыли F , м²/г [11]:

$$\tau(C) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{эф}(\lambda) \cdot e^{-k_{П}(\lambda)FLC} \cdot \prod_{i=1}^N e^{-k_i(\lambda)LC_i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{эф}(\lambda) d\lambda}, \quad (11)$$

где $S_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприемника (фотоиода), А/Вт; $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения источника (светодиода), Вт; $\tau_{эф}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания светофильтра; L – длина поглощающего слоя пыли, м; C – концентрация угольной пыли, г/м³; $k_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения i -го постороннего газа, м⁻¹; C_i – концентрация i -го постороннего газа, объемная доля.

Безразмерный коэффициент поглощения определен на основе ранее полученных на базе теории Ми данных о спектральной поглощательной способности a газодисперсной системы угольная пыль-воздух из работы [11]:

$$k_n(\lambda) = \frac{-\ln(1-a)}{FLC}, \quad (12)$$

Значение $k_{П}(\lambda)$ находится в пределах от 0,56 до 0,61 в диапазоне длин волн от 0,7 до 5 мкм (рис. 4) [11]. Значение средней удельной поверхности пыли составляет $F=0,34$ м²/г.

Чувствительность ОЭД, абсолютная и относительная погрешность измерений концентрации угольной пыли и порог обнаружения оцениваются аналогично ОЭД концентрации газа.

Расчет отношения сигнал-шум выполняется

согласно формулам (7 – 10).

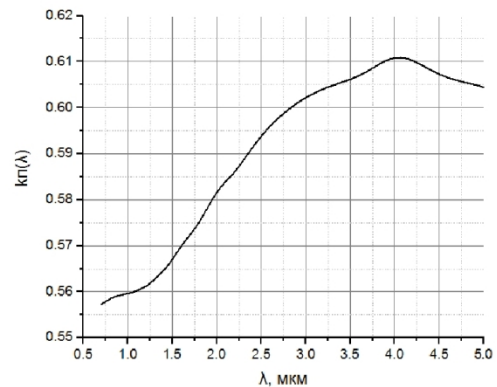


Рис. 4. Спектральный безразмерный коэффициент ослабления $k_{П}(\lambda)$ излучения газодисперсной системы «угольная пыль-воздух»

Проверка адекватности компьютерной модели

А. Проверка адекватности компьютерного моделирования ОЭД измерения концентрации газов

Проверка адекватности выполняется путем сравнения данных моделирования передаточной функции датчиков с экспериментальными данными, приведенными в работах Сотниковой [4, 5] для ОЭД CO₂, CO, C₂H₄.

Для проверки адекватности компьютерной модели вместо данных для метана могут быть использованы доступные экспериментальные данные для этилена C₂H₄ [4, 5], поскольку этилен имеет характерный для углеводородов спектральный коэффициент поглощения подобный метану и экспериментальные данные приводятся в выбранном для контроля диапазоне длин волн излучения от 3,2 до 3,4 мкм.

Экспериментальные данные для CO₂ получены с помощью ОЭД на базе светодиода типа LED42Sc и фотодиода типа PD42Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях CO₂ в N₂ для концентраций диоксида углерода от 0,01 до 50 об. % при длине газовой кюветы 4 см. Рабочая температура датчика составляла 30 °С. Поток излучения светодиода составляет 50 мВт при токе 200мА (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [4, 5].

Для датчика CO экспериментальные данные получены при использовании светодиода типа LED47Sc и фотодиода типа PD47Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях для концентраций оксида углерода от 0,01 до 100 об. %. Длина газовой кюветы составляла 2,7 см. Рабочая температура датчика – 30 °С. Поток излучения светодиода равен 8 мВт при токе 200мА (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [4, 5].

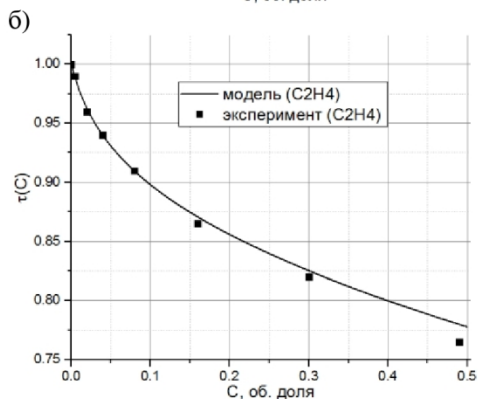
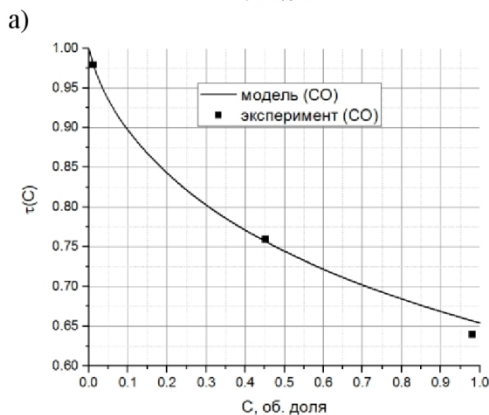
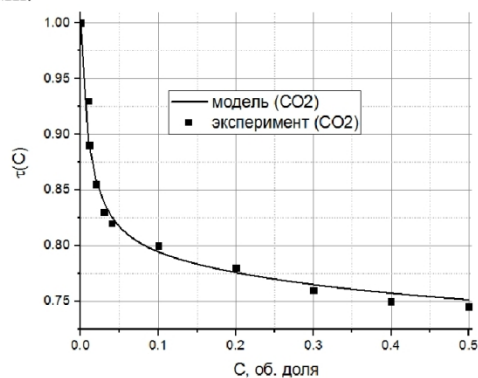
Для датчика C₂H₄ использовались светодиод типа LED34Sc и фотодиод типа PD34Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях для концентраций C₂H₄ от 0,01 до 50 об. %. Длина га-

зовой кюветы равна 4.5 см. Рабочая температура датчика – 37 °С. Поток излучения светодиода составляет 200 μ W при токе 200 mA (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [4, 5].

В результате проверки адекватности проведения сравнение передаточных функций, полученных на базе моделирования и экспериментальным путем (рис. 5).

Данные о передаточных функциях датчиков CO_2 , CO, C_2H_4 , полученные при экспериментальном исследовании, и результаты моделирования хорошо согласуются друг с другом. Относительная погрешность моделирования датчика CO_2 не превышает 5 %, CO – 5 %, C_2H_4 – 4 %.

Проведено сравнение расчетных значений отношения сигнал-шум с экспериментальными данными.



в)
 Рис. 5. Передаточные функции, полученные на базе моделирования и экспериментов для датчиков CO_2 (а), CO (б), C_2H_4 (в).

При расчете учитывалось, что экспериментальные данные для датчика CO_2 получены при усреднении сигнала на его выходе в течении 100 мс, при этом значение полосы частот Δf при расчете устанавливалось 10 Гц. Для датчика CO усреднение проводилось в течение 1 с – значение полосы частот $\Delta f=1$ Гц. Для датчика C_2H_4 значение полосы частот принималось равным $\Delta f = 20$ кГц.

Расчетное значение отношения сигнал-шум μ для датчика CO_2 составляет 2626, CO – 900, C_2H_4 – 2979. Расчетные значения соответствуют экспериментальным данным приведенным в работах [4, 5] которые находятся в диапазоне от 10^3 до 10^4 и зависят от времени усреднения сигнала. В рассматриваемых экспериментах для датчиков C_2H_4 и CO_2 измеренное значение μ составляет 3000, для датчика CO – 2000 [5].

Таким образом, исходя из хорошего соответствия результатов моделирования передаточных функций и отношения сигнал шум экспериментальным данным подтверждается адекватность компьютерной модели.

Б. Проверка адекватности компьютерного моделирования ОЭД измерения концентрации угольной пыли

Проверка адекватности моделирования ОЭД концентрации угольной пыли выполняется для данных моделирования и собственных экспериментальных данных об ослаблении излучения газодисперсной системой угольная пыль-воздух из работы [13].

При проведении экспериментального исследования коэффициента пропускания оптического излучения в газодисперсной системе использовалась угольная пыль с дисперсным составом близким к угольным шахтам [13].

Концентрация частиц угольной пыли изменялась в диапазоне 1 – 10 г/м³. Толщина поглощающего слоя равна 0,3 м. Диапазон длин волн излучения составлял от 1 до 4 мкм [13]. В качестве источника излучения использовалась модель абсолютно-черного тела АЧТ-45/100/1000. В качестве фотодиодов в спектральном диапазоне от 0,7 до 5 мкм использовались: кремниевый фотодиод S1337, для приема излучения в диапазоне 0,7-1,1 мкм; инфракрасный фотодиод PD24-10 [15] для приема излучения в диапазоне 1,1-2,4 мкм; инфракрасный фотодиод PD42-SR [14] для приема излучения в диапазоне 2,4-4,5 мкм. Для выделения монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 1 до 5 мкм использовался монохроматор МДР-206 [13].

Компьютерное моделирование проводилось с учетом вышеприведенных условий эксперимента. При моделировании данные о безразмерном коэффициенте получены из работы [11] (рис. 3), длина волны излучения принималась равной 1 мкм. Значение средней удельной поверхности пыли составляло $F=0,22$ м²/г и определялось дис-

персным составом пыли, используемой в эксперименте.

Коэффициенты пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при моделировании и экспериментальном исследовании [13], представлены на рис. 6.

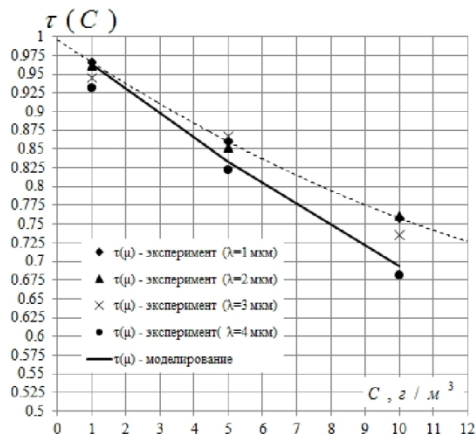


Рис. 6. Коэффициенты пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при моделировании и экспериментальном исследовании [13]

Относительная погрешность моделирования датчика концентрации угольной пыли не превышает 7 %.

Данные о коэффициенте пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при экспериментальном исследовании, и результаты моделирования хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает адекватность компьютерной модели.

моделирование спектральных коэффициентов пропускания газов и пылевоздушной смеси

Исходные данные для проведения моделирования спектральных коэффициентов пропускания представлены в таблице 1. Моделирование выполнялось на базе формулы (1).

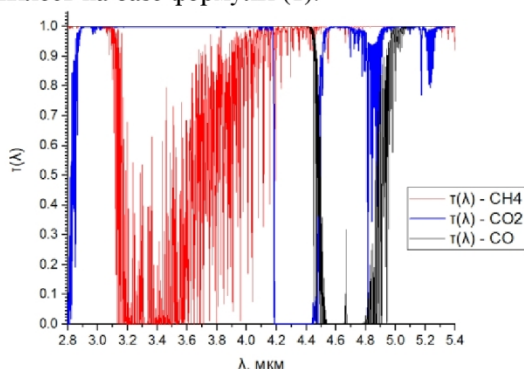


Рис. 7. Спектральные коэффициенты пропускания чистых газов (метана, оксида и диоксида углерода) при длине поглощающего пути 1 м

Результаты моделирования спектральных ко-

эффициентов пропускания чистых газов (метана, оксида и диоксида углерода) приведены на рис. 7. Длина поглощающего пути при моделировании составляет 1 м.

Проведен анализ спектральных коэффициентов на предмет влияния посторонних газов на показания ОЭД контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность).

Исходя из анализа спектральных коэффициентов пропускания газов (рис. 7) видно, что при контроле ОЭД концентрации метана в спектральном диапазоне от 3,2 до 3,7 мкм влияние посторонних газов в виде оксида и диоксида углерода является незначительным. При контроле ОЭД концентрации диоксида углерода необходимо учитывать влияние на его показания посторонних газов метана и оксида углерода и с учётом перекрестной чувствительности выбирать диапазон контроля от 4,2 до 4,4 мкм. Для ОЭД концентрации оксида углерода существенное влияние оказывает наличие постороннего диоксида углерода, а влияние метана является незначительным. Концентрацию оксида углерода с учетом перекрестной чувствительности необходимо контролировать в диапазоне от 4,5 до 4,7 мкм.

Результаты моделирования спектрального коэффициента пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух при длине поглощающего пути 1 м в спектральном диапазоне от 0,6 до 1,5 мкм приведены рис. 8. На рис. 8 также приведен спектральный коэффициент пропускания газов – CH_4 , CO_2 , CO .

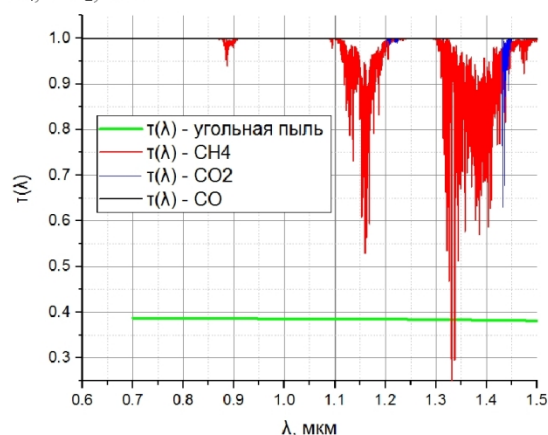


Рис. 8. Спектральный коэффициент пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух при длине поглощающего пути 1 м

Проанализировано влияние на показания ОЭД концентрации пыли – пропускания газов, являющихся посторонними. Для этого рассчитаны спектральные коэффициенты пропускания чистого метана, оксида и диоксида углерода в спектральном диапазоне от 0,6 до 1,5 мкм при длине поглощающего слоя 1 м рис. 8. Существенное влияние на показания ОЭД оказывает наличие постороннего метана, наличие посторонних оксида и диокси-

да углерода является несущественным.

Контроль концентрации пыли с учетом перекрестной чувствительности необходимо осуществлять в диапазоне от 0,6 до 1,1 мкм.

Выбор элементной базы для оптоэлектронных датчиков концентрации газов и пыли.

А. Выбор элементной базы ОЭД измерения концентрации основных газов

Для проведения расчетов при выборе элементной базы были определены исходные данные.

С учетом данных о спектральном коэффициенте пропускания и перекрестной чувствительности ОЭД определена совокупность пар инфракрасных светодиодов и фотодиодов, из которой будут выбраны наиболее подходящие для построения ОЭД концентрации метана, оксида углерода и диоксида углерода (таблица 2). Элементная база представлена российскими производителями ООО «ИюфелеД» [14], ООО «АИБИ» [15], ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» [16].

При расчете диапазоны концентраций газов берутся из таблицы 1. Параметры и характеристики светодиодов и фотодиодов (табл. 2) берутся из технической документации. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 5 см и определялось с учетом того, что, как правило, расстояние находится в пределах от 1 до 10 см [4-6].

Поток излучения светодиодов для ОЭД CO_2 и CH_4 рассчитывается для их работы в квазинепрерывном режиме при токе 200 мА. Рабочая температура ОЭД принимается 20 °С. С учетом рекомендаций [4-6] полоса частот при расчете отношения сигнал-шум для датчика CO_2 устанавливалась 10 Гц, для датчика CH_4 полоса частот – 20 кГц.

Отличительной особенностью ОЭД CO является более низкое по сравнению с ОЭД CO_2 и CH_4 значение верхнего предела измерений концентраций 0,01 % (меньше в 200 раз), а порог обнаружения не должен превышать 0,0017 % [2]. Для обеспечения измерения малых концентраций CO и порога обнаружения при расчете было предложено использовать исходные значения потока излучения светодиода для его работы в импульсном режиме при токе 1 А, а полосу частот задавать 0,1 Гц (при усреднении сигнала в течении 10 с) с учетом рекомендаций, представленных в работе [5]. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 2 см.

В результате выполнения исследования проведено моделирование передаточных функций для ОЭД метана (рис. 9 а), оксида углерода (рис. 9 б), диоксида углерода (рис. 9 в) для предложенных пар светодиод-фотодиод.

Полученные данные о передаточных функциях позволили сравнить чувствительность ОЭД построенные на различной элементной базе по наклону передаточной характеристики. Наибольшая чувствительность для ОЭД метана достигается

для оптопары LED34-PD34, для ОЭД оксида углерода – LED47- PD47NB, для ОЭД диоксида углерода – LED43-PR- PD48-03-NS-PR.

В результате моделирования получены данные об отношении сигнал-шум для исследуемых оптопар, которые позволили рассчитать порог обнаружения и абсолютную погрешность ОЭД.

В табл. 2 представлены результаты расчета параметров μ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод.

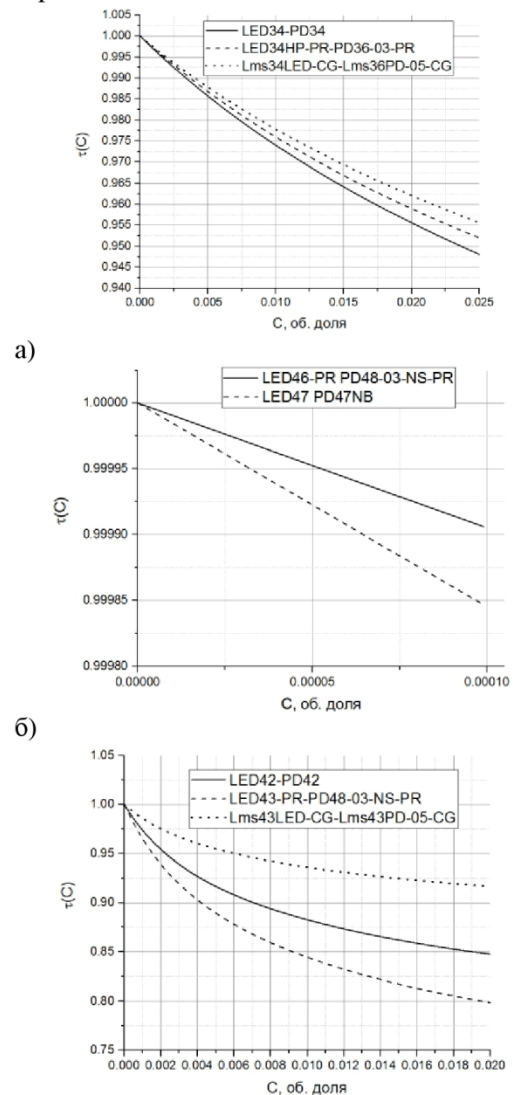


Рис. 9. Передаточные функции для ОЭД концентрации метана (а), оксида углерода (б), диоксида углерода (в)

Результаты оценки абсолютной погрешности измерения концентрации газа для предложенных пар светодиод-фотодиод приведены на рис. 10.

На основе данных о значениях абсолютной погрешности измерения были выбраны оптопары для ОЭД концентрации газа с наименьшей погрешностью.

ОЭД концентрации метана предлагается реализовать на базе оптопары LED34 – PD34 обеспе-

чивающей порог обнаружения 0.013 об. %.

Для ОЭД концентрации оксида углерода предлагается использовать оптопару LED46-PR – PD48-03-NS-PR, поскольку только она обеспечивает порог обнаружения 0.00083 об. % не превышающий требуемый – 0,0017 об. %. Данная оптопара обеспечивает низкий порог обнаружения за счет высокого значения потока излучения 55мкВт и низкого значения шума фотодиода 4,5 мкВ для полосы частот 0,1 Гц.

ОЭД диоксида углерода предлагается построить на базе оптопары LED43-PR – PD48-03-NS-PR, обеспечивающей порог обнаружения 0,0013 об. %.

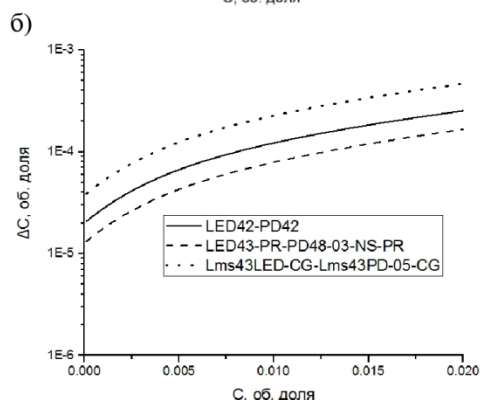
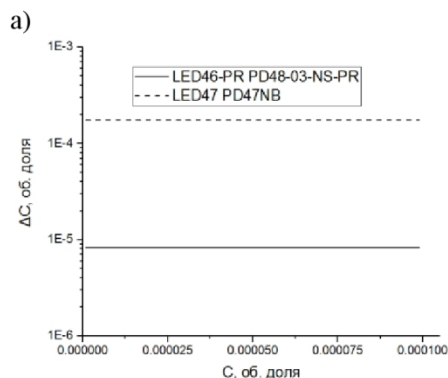
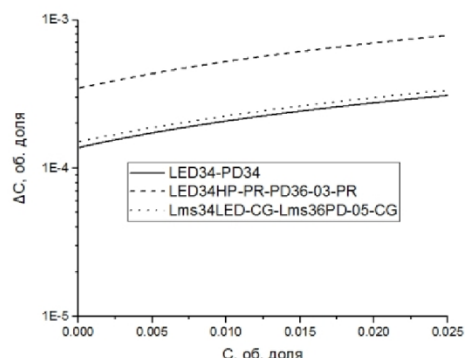


Рис. 10. Абсолютные погрешности измерений концентрации для ОЭД метана (а), оксида углерода (б), диоксида углерода (в)

Б. Выбор элементной базы ОЭД измерения концентрации угольной пыли

На основе данных о коэффициенте пропуска-

ния газодисперсной системы угольная пыль-воздух и диапазона длин волн излучения 0,6 – 1,1 мкм определена совокупность светодиодов и фотодиодов для ОЭД концентрации угольной пыли, представленная зарубежными и отечественными производителями из которой будут выбраны наиболее подходящие элементы (табл. 4).

Таблица 2. Результаты расчета параметров μ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод

Контролируемый газ	Пара фотодиод	светодиод-	μ	LOD, об. доля
Метан	LED34	PD34	2538	0,00013
	LED34HP-PR	PD36-03-PR	967	0,00034
	Lms34LED-D-CG	Lms36PD-05-CG	2433	0,00015
Оксид углерода	LED47	PD47NB	3672	0,00017
	LED46-PR	PD48-03-NS-PR	1260 13	0,00000 83
Диоксид углерода	LED42	PD42	2013	0,00002
	LED43-PR	PD48-03-NS-PR	1871	0,00001 3
	Lms43LED-D-CG	Lms43PD-05-CG	1567	0,00004

При расчете диапазоны концентраций газов составлял 0 – 7 г/м³. Параметры и характеристики светодиодов и фотодиодов (табл. 3) берутся из технической документации. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 0,5 м и определялось с учетом того, что, как правило, для оптических пылемеров, работающих на основе метода поглощения излучения расстояние находится в пределах от 0,1 до 1 м. Полоса частот при расчете отношения сигнал-шум для ОЭД угольной пыли устанавливалась 1 МГц.

В табл. 3 представлены результаты расчета параметров μ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод для ОЭД угольной пыли.

Таблица 3. Результаты расчета параметров μ и LOD

Пара светодиод-фотодиод		μ	LOD, г/м³
SFH 4550	SFH 203 FA	31471	0,00031
VSLY5850	BPV10NF	28191	0,00037
LED07HP-PR	ФДУК-11	1178	0,0089
ADL-78901TL	SFH 203	50459	0,0002

Наименьший порог обнаружения (0,0002 г/м³) обеспечивает оптопара ADL-78901TL – SFH 203, что обусловлено наибольшим потоком оптического излучения светодиода.

Передаточная функция для ОЭД концентрации угольной пыли на базе оптопары ADL-78901TL – SFH 203 приведена на рис. 11.

Проведена оценка абсолютной погрешности измерения концентрации угольной пыли по данным о передаточной функции и отношении сигнал-шум для исследуемых пар светодиод-фотодиод (рис. 12).

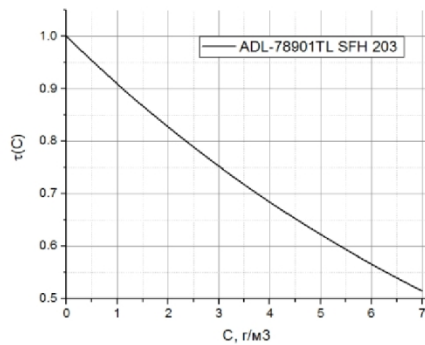


Рис. 11. Передаточная функция для ОЭД концентрации угольной пыли на базе оптопары ADL-78901TL – SFH 203

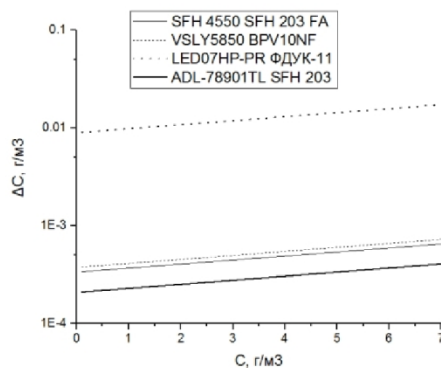


Рис. 12. Абсолютные погрешности измерений концентрации угольной пыли для исследуемых ОЭД

На основе данных об абсолютной погрешности измерения была выбрана оптопара ADL-78901TL – SFH 203 для реализации ОЭД концентрации газа характеризующаяся наименьшей абсолютной погрешностью.

Исследование влияния посторонних газов на показания ОЭД контролирующего концентрацию отдельного газа.

В ходе выполнения работы проведено исследование влияния посторонних газов на показания ОЭД, контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность). При выполнении исследования один из ОЭД концентрации газа (метана, оксида углерода и диоксида) выбирался в качестве основного и для него определялись передаточные характеристики при наличии посторонних газов, путем задания их коэффициента поглощения. Передаточные характеристики ОЭД получали в отсутствии непосредственно контролируемого газа. Концентрации посторонних газов изменялись в пределах диапазонов, указанных в исходных данных (табл. 1). Исследование выполнялось для выбранных при построении ОЭД пар светодиодов и фотодиодов на исходных данных использованных при их выборе.

Получены передаточные характеристики ОЭД концентрации метана, построенного на базе оптопары LED34 – PD34, в присутствии по отдель-

сти оксида углерода и диоксида углерода. Исходные данные для моделирования соответствуют исходным данным, принятым при выборе элементной базы ОЭД.

Влияние оксида углерода на передаточную функцию ОЭД концентрации метана является несущественным ввиду очень малой концентрации оксида углерода и не приводится. На рис. 13 показана передаточная характеристика при воздействии диоксида углерода. Наличие диоксида углерода также практически не воздействует на показания ОЭД концентрации метана.

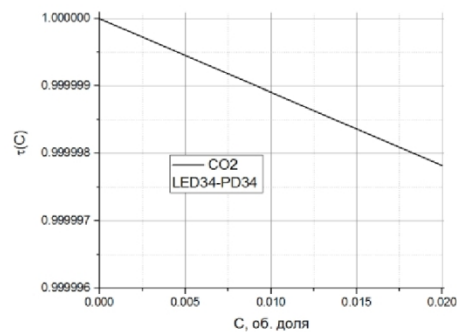


Рис. 13. Передаточная характеристика ОЭД концентрации метана на базе оптопары LED34 – PD34 при воздействии постороннего диоксида углерода

В ходе исследования получены передаточные характеристики ОЭД концентрации диоксида углерода, построенного на базе оптопары LED43-PR – PD48-03-NS-PR, в присутствии по отдельности оксида углерода и метана (рис. 14).

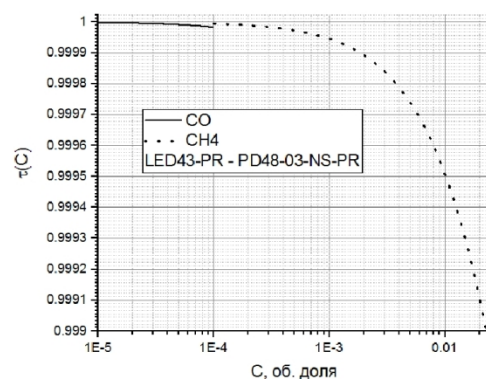


Рис. 14. Передаточная характеристика ОЭД концентрации CO_2 на базе оптопары LED43-PR – PD48-03-NS-PR при воздействии постороннего оксида углерода и метана

Влияние оксида углерода также как в предыдущем случае является несущественным. Наличие метана оказывает большее влияние по сравнению с оксидом углерода и его необходимо учитывать.

Передаточные характеристики ОЭД концентрации оксида углерода на базе оптопары LED46-PR – PD48-03-NS-PR, в присутствии по отдельности метана диоксида углерода приведены на рис.

15 а и б соответственно. Также для удобства сравнения приведена передаточная характеристика для основного газа – оксида углерода.

Присутствие посторонних газов в виде метана и диоксида углерода существенно (в особенности CO_2) влияет на передаточную характеристику ОЭД CO и не позволяет обнаружить малые концентрации CO , что требует принятия дополнительных мер заключающихся в компенсации данного влияния и введении дополнительного спектрального фильтра.

Исследования по учету влияния на показания ОЭД концентрации пыли посторонних газов.

Исследование по учету влияния на показания ОЭД концентрации пыли посторонних газов выполнялось для выбранной пары светодиодов и фотодиодов ADL-78901TL – SFH 203 для тех же исходных данных, которые использовались при выборе оптопары. Исследование проводилось для постороннего метана с учетом результатов моделирования спектральных коэффициентов пропускания газов и пылевоздушной смеси. Установлено, что наличие постороннего метана является крайне малым и может не учитываться.

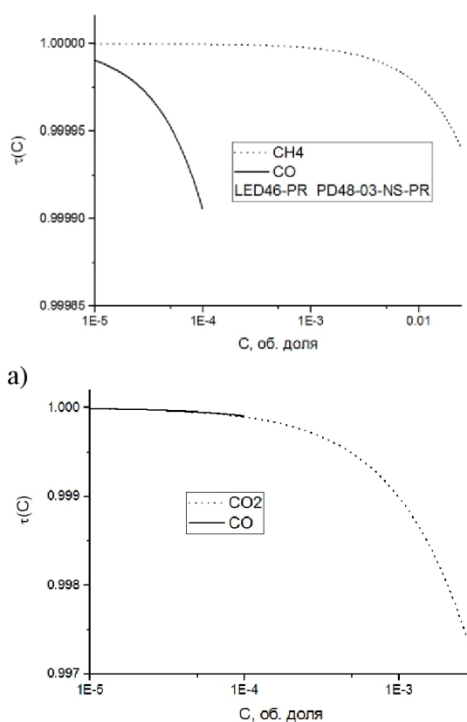


Рис. 15. Передаточные характеристики ОЭД концентрации оксида углерода на базе оптопары LED46-PR – PD48-03-NS-PR в присутствии по

отдельности метана (а) диоксида углерода (б)

Заключение

В результате выполнения работ проведено моделирование ОЭД концентрации газов и пыли, входящих в состав МКОЭП.

В результате проверки адекватности компьютерной модели установлено, что данные о передаточных функциях ОЭД CO_2 , CO , C_2H_4 и угольной пыли полученные при экспериментальном исследовании, и результаты моделирования хорошо согласуются друг с другом. Относительная погрешность моделирования ОЭД CO_2 не превышает 5 %, CO – 5 %, C_2H_4 – 4 %, ОЭД угольной пыли – 7 %.

Исходя из анализа спектральных коэффициентов пропускания газов с учетом влияния перекрестной чувствительности уточнены спектральные диапазоны контроля газов: контроль концентрации метана диапазон – 3,2 – 3,7 мкм; контроль концентрации диоксида углерода диапазон – 4,2 – 4,4 мкм; контроль концентрации оксида углерода диапазон – 4,5 – 4,7 мкм.

ОЭД концентрации газов предлагается реализовать на базе следующих выбранных оптопар:

- контроль метана – оптопара LED34-PD34 (порог обнаружения 0,013 об. %).
- контроль оксида углерода – оптопара LED46-PR- PD48-03-NS-PR (порог обнаружения 0,00083 об. %)
- контроль диоксида углерода – оптопара LED43-PR-PD48-03-NS-PR (порог обнаружения 0,0013 об. %).

Для реализации ОЭД концентрации газа была выбрана оптопара ADL-78901TL – SFH 203 (порог обнаружения 0,0002 г/м³).

В результате исследований установлено, что влияние посторонних оксида и диоксида углерода на передаточную функцию ОЭД концентрации метана является несущественным. На ОЭД концентрации диоксида углерода оказывает влияние наличие постороннего метана, которое необходимо учитывать.

На передаточную характеристику ОЭД CO существенно влияет присутствие посторонних газов в виде метана и диоксида углерода (в особенности CO_2) и не позволяет обнаружить малые концентрации CO .

Влияние на показания ОЭД концентрации пыли постороннего метана может не учитываться.

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 Con-

ference 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. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный // Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 6. – С. 112–118.

4. Low voltage CO₂-gas sensor based on III-V mid-IR immersion lens diode optopairs: where we are and how far we can go? Sotnikova G.Y., Gavrilov G.A., Aleksandrov S.E., Kapralov A.A., Karandashev S.A., Remennyi M.A., Matveev B.A. IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10. No2. pp. 225-234.

5. Performance analysis of diode optopair gas sensors. Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Optical Sensors 2009. Ser. "Optical Sensors 2009" sponsors: SPIE Europe. Prague, 2009. C. 73561T.

6. Low voltage episode down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3.3-4.3 μ m spectral range. Remennyi M.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Stus N.M., Talalakin G.N. Sensors and Actuators B: Chemical. 2003. Vol. 91. No 1-3. pp. 256-261.

7. 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.

8. Матвеев Б.А., Ратушный В.И., Рыбальченко А.Ю., Сотникова Г.Ю. Высокотемпературные датчики углекислого газа для систем безопасности в энергетике на основе поверхностно облучаемых фотодиодов на основе InAsSb // Глобальная ядерная безопасность. 2011. №1 (1). С.110-115

9. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с: ил.

10. Гаврилов Г. А. 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.

11. Lisakov S.A., Sypin E.V., Pavlov A.N., Mikhanchina J.L., Leonov G.V. Determination of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2015, pp. 353–358.

12. Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. Computer Simulation of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 374-379.

13. Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. Experimental Research of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 380–385.

14. ИоффелеД. Светить и видеть в темно-красном [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ioffeled.com/>

15. 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

16. ООО «ЛЭД Микросенсор НТ». Оптоэлектронные приборы среднего инфракрасного диапазона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.lmsnt.com>

REFERENCES

1. Sidorenko A.I. Prospects for the development of multicrite-rion 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. Lisakov S.A. Postanovka zadachi modelirovaniya mnogokriterial'nogo optiko-ehlektronnogo pribora kontrolya avariynih i predavariynih situacij v ugol'nyh shahtah / S.A. Lisakov, A.I. Sidorenko, I.S. Zorin, E.V. Sypin // Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. – 2017. – № 2. – С. 96–106.

3. Modelirovanie harakteristik opticheskikh gazovyh sensorov na osnove diodnyh optopar srednego IK-diapazona spektra / S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrilov, A.A. Kapralov, B.A. Matveev, G.YU. Sotnikova, M.A.

Remennyj // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2009, tom 79, vyp. 6. – S. 112–118.

4. Low voltage CO₂-gas sensor based on III-V mid-IR immersion lens diode optopairs: where we are and how far we can go? Sotnikova G.Y., Gavrilov G.A., Aleksandrov S.E., Kapralov A.A., Karandashev S.A., Remennyi M.A., Matveev B.A. IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10. No2. pp. 225-234.

5. Performance analysis of diode optopair gas sensors. Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Optical Sensors 2009. Ser. "Optical Sensors 2009" sponsors: SPIE Eu-rope. Prague, 2009. S. 73561T.

6. Low voltage epoxide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3.3-4.3 μm spectral range. Remennyi M.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Stus N.M., Tala-lakin G.N. Sensors and Actuators B: Chemical. 2003. Vol. 91. No 1-3. pp. 256-261.

7. Mihajlenko S.N., Babikov YU.L., Golovko V.F. Informacionno-vychislitel'naya sistema "Spektroskopiya atmosferykh gazov". Struktura i osnovnye funktsii // Optika atmosfery i okeana. 2005. T. 18, № 09. S. 765-776.

8. Matveev B.A., Ratushnyj V.I., Rybal'chenko A.YU., Sotnikova G.YU. Vysokotemperaturnye datchiki uglekislogo gaza dlya sistem bezopasnosti v ehnergetike na osnove poverhnostno obluchaemykh fotodiodov na osnove InAsSb // Global'naya yadernaya bezopasnost'. 2011. №1 (1). S.110-115

9. Gauehr Dzh. Opticheskie sistemy svyazi: Per. s angl. – M.: Radio i svyaz', 1989. – 504 s: il.

10. Gavrilov G. A. Predel'naya chuvstvitel'nost' fotopriemnogo ustrojstva na osnove fotodiodov A{3} B{5} srednego IK-diapazona spektra [Tekst] / G. A. Gavrilov, B. A. Matveev, G. YU. Sotnikova // Pis'ma v «Zhurnal tekhnicheskoy fiziki». – 2011. – T. 37, vyp. 18. – S. 50-57.

11. Lisakov S.A., Sypin E.V., Pavlov A.N., Mikhannoshina J.L., Leonov G.V. Determination of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2015, pp. 353–358.

12. Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. Computer Simulation of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 374-379.

13. Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V. Experimental Research of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU, 2016, pp. 380–385.

14. IoffeLED. Svetit' i videt' v temno-krasnom [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.ioffeled.com/>

15. Optoelektronnye pribory dlya blizhney i sredney IK oblasti spektra 0.7 - 5.0 mkm. Katalog OOO «AI-BI» [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.ibsg.ru/catalogue_2015.pdf

16. OOO «LED Mikrosensor NT». Optoelektronnye pribory srednego infrakrasnogo diapazona [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ru.lmsnt.com>

Поступило в редакцию 11.07.2018

Received 11 July 2018