

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-АБСОРБЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Вовна А.В., Хламов М.Г. ✓

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра электронной техники

E-mail: Vovna\_Alex@ukr.net

### Abstract

*Vovna A.V., Khlamov M.G. Application of optical absorption method for measurement of volumetric concentration of methane in conditions of coal mines. The simulation mathematical model optical and analytical channels of optical absorption infra-red measuring device of by volume concentration of gases with the methods of identification of coal dust for determination of by volume concentration of methane in coal mines is developed.*

**Общая постановка проблемы.** Для решения вопросов создания безопасных условий труда горнорабочих в сочетании с возрастающей потребностью в добыче угля на пластах, опасных по внезапным выбросам угольной пыли и газа, необходимо детальное изучение газодинамических явлений, что невозможно без широких экспериментальных исследований, опирающихся на эффективные рабочие средства измерения. Среди таких средств важное место занимают быстродействующие информационно-измерительные системы получения данных о процессах изменения концентрации метана в атмосфере подземных выработок угольных шахт.

Скоротечность газодинамических явлений, сложность и специфичность условий, в которых они протекают, отсутствие малоинерционных измерителей концентрации метана с широким динамическим диапазоном, нечувствительных к влиянию основных возмущающих факторов атмосферы угольных шахт, жесткие конструктивные требования в сочетании с требованиями искробезопасности не позволили до настоящего времени создать средства измерения, обеспечивающие получения информации о процессах изменения концентрации метана с малыми статическими и динамическими погрешностями.

**Постановка задач исследования.** Для построения быстродействующего измерителя объемной концентрации метана в условиях угольных шахт необходимо решить следующие основные задачи:

– разработать имитационную математическую модель оптических и аналитических каналов оптико-абсорбционного инфракрасного газоанализатора с методами компенсации угольной пыли для определения концентрации метана в угольных шахтах.

– разработать на основе полученных результатов имитационного моделирования многоканальные микропроцессорные оптико-абсорбционные инфракрасные газоанализаторы для контроля объемной концентрации метана, отвечающих требованиям европейских стандартов для условий угольных шахт Донбасса.

**Решение задач и результаты исследований.** Метод, положенный в основу построения быстродействующих информационно-измерительных систем измерения объемной концентрации метана, основан на способности атмосферных газов избирательно поглощать инфракрасное излучение в спектральной области, и относится к бездисперсионным методам абсорбционной спектроскопии.

В соответствии с экспериментальными данными о молекулярном поглощении [1] спектр поглощения метана имеет сложную структуру. Сечение поглощения спектра метана и инфракрасной (ИК) области приведено на рис. 1, получено при высокой разрешающей способности анализатора, включает в себя спектральные полосы, каждая из которых содержит

электронно-колебательно-вращательные компоненты и их комбинационные составляющие, отличающиеся местом положения в спектральной области и интенсивностью поглощения.

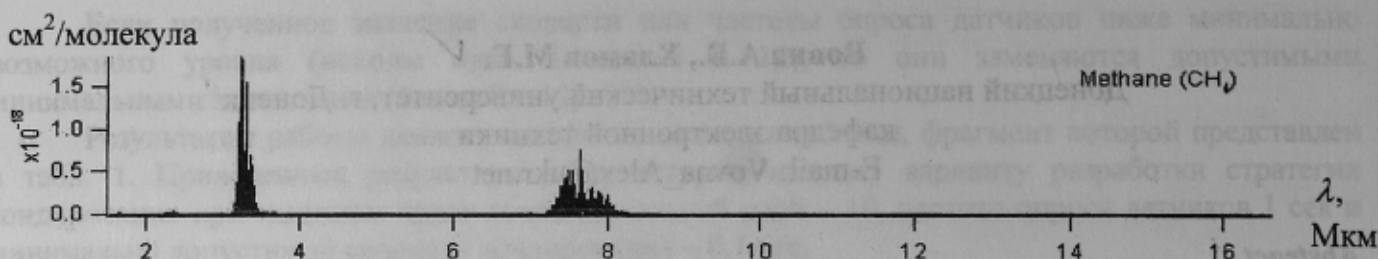


Рисунок 1 – Спектр поглощения метана в ИК-области

Наиболее интенсивная колебательно-вращательная полоса сечения поглощения метана лежит в области с центром  $\lambda_0 = 3,31 \text{ мкм}$  ( $\nu_0 = 3018 \text{ см}^{-1}$ ) и приведена на рис. 2.

Как известно, для ИК-области характерны так называемые колебательно-вращательные полосы поглощения, представляющие собой последовательности линий поглощения, контур каждой из которых определяется межмолекулярными соударениями и описывается выражением [2]:

$$K_i(\nu) = \frac{a_i}{\pi} \cdot \frac{\delta_i}{(\nu - \nu_{0i})^2 + \delta_i^2}, \quad (1)$$

где  $a_i = \int_0^{\infty} K_i(\nu) d\nu$  – интегральная интенсивность  $i$ -й линии;  $\delta_i = 0,18 \text{ см}^{-1}$  – полуширина вращательной линии;  $\nu_{0i}$  – центр линии.

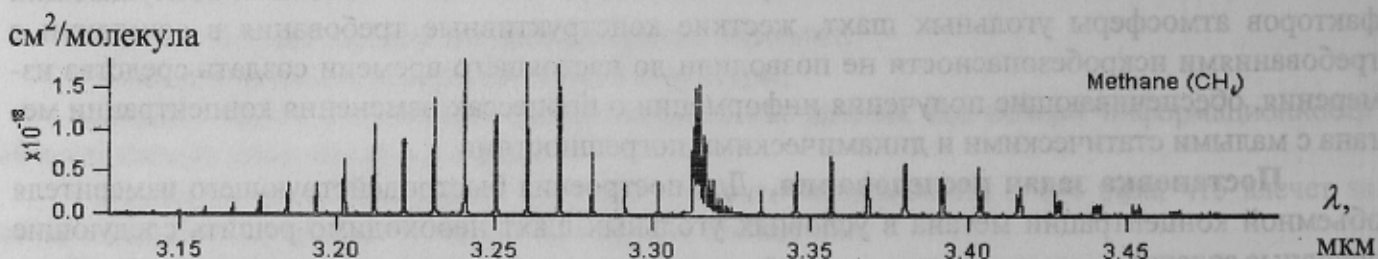


Рисунок 2 – Наиболее интенсивная полоса сечения поглощения метана

Спектр структуры носит характер длинно- и коротковолновых не полностью симметричных крыльев при центральной вращательной составляющей колебательно-вращательные полосы поглощения, представляющей собой последовательности линий поглощения, контур каждой из которых определяется межмолекулярным соударением и описывается коэффициентом поглощения  $K(\lambda)$  полосы, который выражается суммой коэффициентов поглощения отдельных линий:

$$K(\nu) = \sum_{i=1}^{\infty} K_i(\nu) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{\pi} \cdot \frac{\delta_i}{(\nu - \nu_{0i})^2 + \delta_i^2}, \quad (2)$$

Из рисунка 2 видно, что сечение поглощения для наиболее интенсивных линий молекулярного метана в области 3,31 мкм составляет около  $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{молекула}$ . Для того вычисления интегральной интенсивности линии, эту величину нужно умножить на число Аво-

гадро ( $6,0221415 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>, число частиц (атомов, молекул, ионов) в 1 моле вещества). Таким образом, интегральная интенсивность  $a_i$ , определяется в соответствии:

$$a_i = K(\nu_i = \nu_{0i}) \cdot \pi \cdot \delta_i \cdot N_A, \left[ \frac{\text{см}}{\text{моль}} \right]. \quad (3)$$

Для вычисления ряда вводились различные допущения о характере изменения  $a_i$ ,  $\delta_i$  и  $\nu_{0i}$  в пределах колебательно-вращательной полосы. Бреслер П.И [2] рассматривал полосу поглощения как бесконечную последовательность одинаковых по интенсивности ( $a_i = \text{const}$ ) и полуширине ( $\delta_i = \delta$ ) равноотстоящих линий. Для упрощения расчетов была рассмотрена модель полосы поглощения, в которой равноотстоящие линии равной полуширины  $\delta$  имеют распределение интенсивности в каждой из ветвей полосы, соответствующее распределению молекул по вращательным уровням энергии. На рисунке 3 приведены графики функции  $K(\nu)$ , вычисленные для полосы поглощения метана с использованием принятой модели.

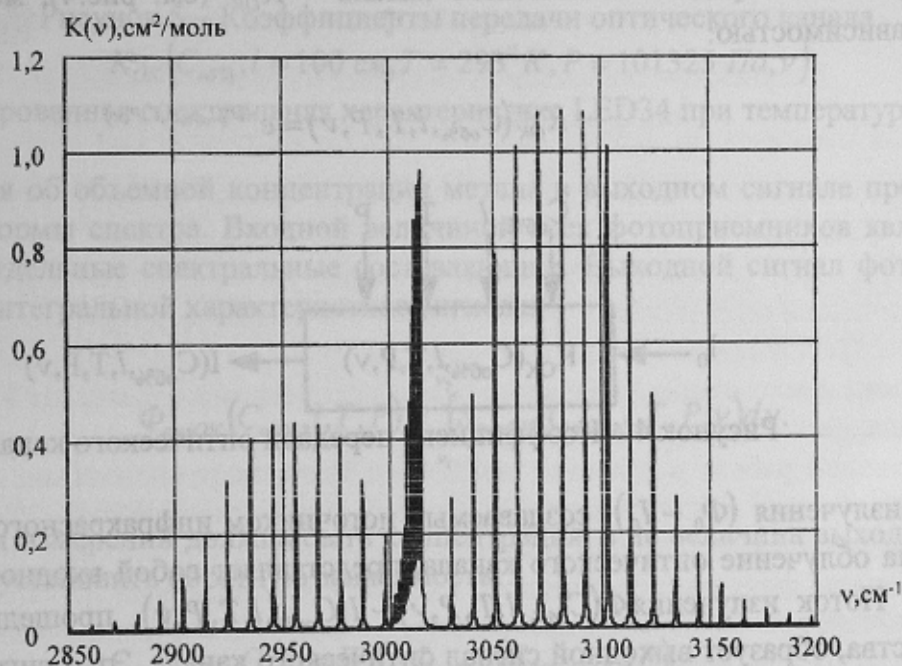


Рисунок 3 – Спектр поглощения метана

В общем виде, поглощение излучения в газе описывается законом Бугера-Ламберта-Бера, который связывает поглощение образца с его толщиной и концентрацией исследуемого компонента газовой смеси и записывается в следующем виде:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = K(\nu) \cdot C \cdot l = D(C, l, \nu), \quad (4)$$

где  $I_0$  – интенсивность или энергия падающего, а  $I$  – интенсивность прошедшего излучения,  $C$  – концентрация активной компоненты вещества, поглощающего излучение;  $l$  – единица толщины (длина трассы, кюветы);  $K(\nu)$  – показатель поглощения;  $\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$  – обычно называют оптической плотностью вещества  $D$ .

При измерении объемной концентрации метана  $C_{об\%}$ , [об %] требуется воспользоваться формулой пересчета из объемной концентрации газового компонента в молярную концентрацию  $C_M$ ,  $\left[\frac{\text{моль}}{\text{см}^3}\right]$  [3]:

$$C_M(C_{об\%}, T, P) = \frac{C_{об\%} \cdot P}{100 \cdot R \cdot T} \cdot 10^{-6} = \frac{16,04 \cdot 10^{-8} \cdot C_{об\%} \cdot P}{T}, \quad (5)$$

где  $P$  – общее давление газовой смеси в Па;  $T$  – температура в  $^{\circ}\text{K}$ ;  $R = 8,314472$  – универсальная газовая постоянная в Дж/(моль·К).

Таким образом, оптическую плотность объемной концентрации метана можно рассчитать, воспользовавшись соотношением:

$$D(C_{об\%}, l, T, P, \nu) = K(\nu) \cdot C_M(C_{об\%}, T, P) \cdot l. \quad (6)$$

Коэффициент передачи оптического канала –  $K_{OK}$  (см. рис.4), можно представить следующей зависимостью:

$$K_{OK}(C_{об\%}, l, T, P, \nu) = e^{-D(C_{об\%}, l, T, P, \nu)}. \quad (7)$$

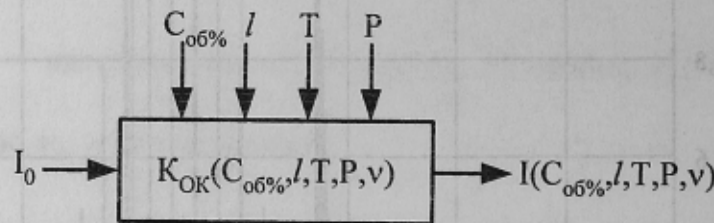


Рисунок 4 – Коэффициент передачи оптического канала

Поток излучения ( $\Phi_0 \sim I_0$ ), создаваемый источником инфракрасного излучения и направляемый на облучение оптического канала, представляет собой входной сигнал оптического канала. Поток излучения  $\Phi(C_{об\%}, l, T, P, \nu) \sim I(C_{об\%}, l, T, P, \nu)$ , прошедший слой тестируемого вещества, образует выходной сигнал оптического канала. Этот сигнал содержит информацию об объемной концентрации метана в анализируемом объеме атмосфере горной выработки, который описывается в следующем виде:

$$S_{выхOK}(C_{об\%}, l, T, P, \nu) = S_{вхOK}(\nu) \cdot K_{OK}(C_{об\%}, l, T, P, \nu), \quad (8)$$

где  $S_{вхOK}(\nu)$  – спектральная плотность мощности светоизлучающего диода, причем спектр выходного сигнала равен спектру входного сигнала при  $C_{об\%} = 0$  об% :

$$S_{выхOK}(C_{об\%} = 0, l, T, P, \nu) = S_{вхOK}(\nu). \quad (9)$$

Полученные выражения спектральных плотностей потоков излучения используются для построения спектров входного и выходного сигналов ОК.

В качестве источника инфракрасного излучения применяется светоизлучающий диод LED34 [4] с длиной волны излучения 3,35 мкм. Нормированная спектральная характеристика

светоизлучающего диода LED34 при температуре + 22 °С приведена на рис. 5. Также на рис. 5 приведены графики функции коэффициента передачи оптического канала, вычисленные для выбранной полосы поглощения метана с использованием принятой модели.

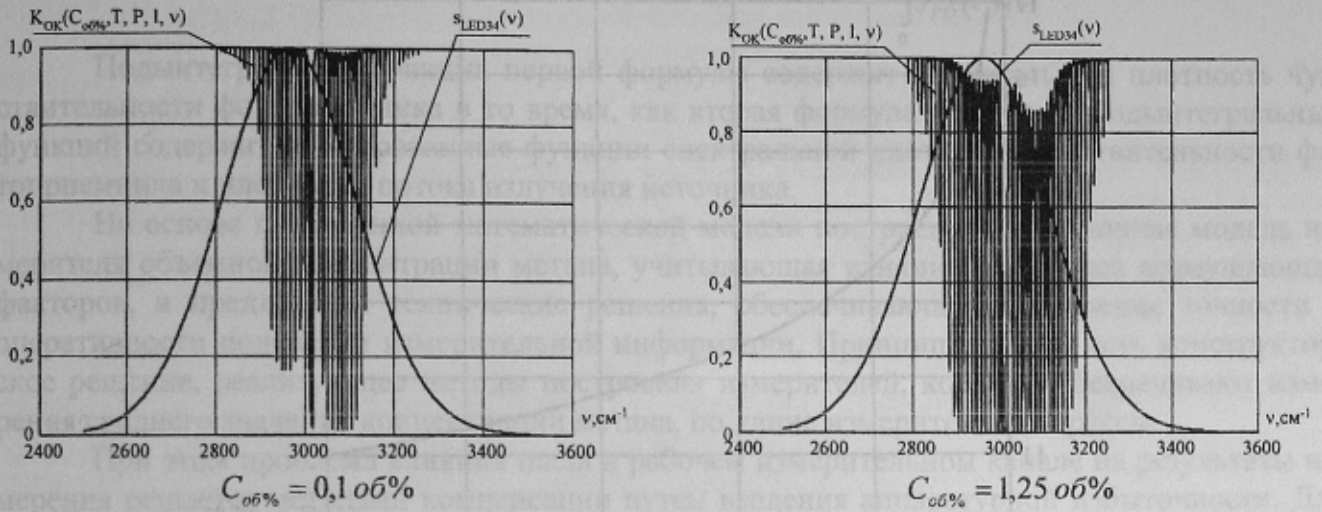


Рисунок 5 – Коэффициенты передачи оптического канала  $K_{ОК}(C_{об\%}, l = 100 \text{ см}, T = 293^0 \text{ К}, P = 101325 \text{ Па}, \nu)$  и нормированная спектральная характеристика LED34 при температуре + 22 °С

Информация об объемной концентрации метана в выходном сигнале представлена в виде изменения формы спектра. Входной величиной всех фотоприемников является поток излучения, а не отдельные спектральные составляющие. Выходной сигнал фотоприемника пропорционален интегральной характеристике сигнала:

$$\Phi_{\text{выхОК}}(C_{об\%}, l, T, P) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} S_{\text{выхОК}}(C_{об\%}, l, T, P, \nu) d\nu. \quad (10)$$

Результатом измерений должна быть концентрация, а не величина выходного потока. Для этого следует установить обратную зависимость:

$$C_{об\%} = W^{-1} \cdot \Phi_{\text{выхОК}}(C_{об\%}, l, T, P). \quad (11)$$

Одной из задач представленной работы является установление теоретической функции преобразования «концентрация → поток» и ей обратная «поток → концентрация». Последняя предназначена для градуировки оптического канала и решения измерительных задач. Зависимость концентрации от потока излучения оказывается более наглядной и воспринимаемой, если она устанавливается не для потока излучения, а его относительного изменения:

$$C_{об\%} = W^{-1} \cdot \frac{\Phi_{\text{акОК}} - \Phi_{\text{выхОК}}(C_{об\%}, l, T, P)}{\Phi_{\text{акОК}}}. \quad (12)$$

Эти зависимости представляются в графической форме. Обратная функция  $W^{-1}$  представляет собой решение уравнения относительно  $C_{об\%}$ . В этом выходной поток оптического канала входит в виде интегрального соотношения со сложной зависимостью от длины волны. Это значительно усложняет поиск решения в аналитическом виде, но за это решение может быть принято табличное представление зависимости, где аргумент и функцию легко поменять местами. Зависимость выходного потока оптического канала, как функция объемной

концентрации метана при нормальных условиях ( $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$ ) и длине трассы оптического излучения  $l = 100 \text{ см}$  приведена на рис. 6.

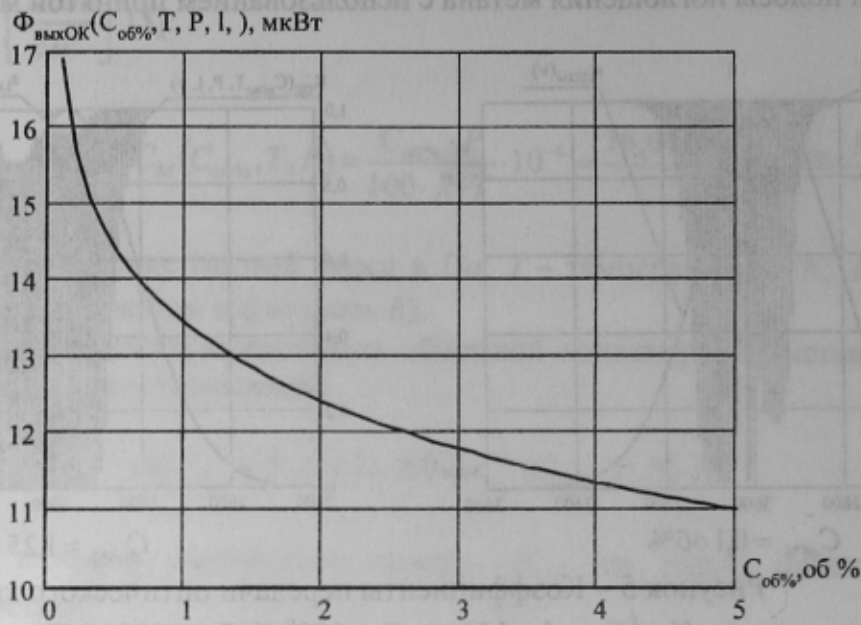


Рисунок 6 – Зависимость выходного потока оптического канала, как функция объемной концентрации метана

В разрабатываемой имитационной математической модели учтено подавляющее большинство факторов, влияющих на прохождение инфракрасного излучения по кюветам газоанализатора. Оптическая неоднородность канала вызвана применением в канале материалов с различными оптическими свойствами. Оптическая неоднородность учитывается коэффициентами преломления. Потери излучения на границах раздела и в средах с различными коэффициентами преломления учитываются коэффициентами отражения и пропускания границами раздела, рассеяния и поглощения излучения в этих средах.

В настоящей работе в качестве таких сред выступают оптические линзы, изготавливаемые из специальных материалов: специальных сортов оптического стекла, природных и синтетических кристаллов. Рассматриваемые линзы считаются тонкими (их толщина и диаметр много меньше фокусных расстояний) в связи, с чем потерями на рассеяние и поглощение можно пренебречь. По этой же причине будем считать, что потоки излучения падают на границы раздела сред по нормали к поверхности раздела.

В диапазоне малых углов падения луча на границу раздела, коэффициент отражения практически остается постоянной величиной. Поэтому малое отклонение угла падения на границу раздела обусловленное кривизной линзы практически не влияет на коэффициент отражения. Сделанное допущение следует считать справедливым. Источник излучения имеет конечные размеры и поток выходящий из линзы оказывается расходящимся, поэтому при определении коэффициента ввода излучения в объектив учитывается угол расхождения луча.

Эффективность ввода излучения в окно фотоприемного устройства оценивается коэффициентом ввода, при этом полагается, что интенсивность потока по сечению однородна. Выходной сигнал фотоприемника представляет собой сигнал тока, поскольку фотоприемное устройство – фотодиод PD-36 [4], и определяется соотношением:

$$I_{выхPD}(C_{об\%}, l, T, P) = S_{Ситт} \cdot \Phi_{выхОК}(C_{об\%}, l, T, P), \quad (13)$$

где  $S_{Ситт}$  – интегральная чувствительность фотоприемника к сигналу излучателя; эта характеристика связана со спектральными характеристиками, как фотоприемника, так и излучателя и отличается от интегральной чувствительности фотоприемника. Обе характеристики определяются следующим образом:

$$S_{\text{инт}} = \int_0^{\infty} S_{PD}(\nu) d\nu, \quad S_{\text{Синт}} = S_{\text{инт}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} S_{PD}(\nu) \cdot S_{LED}(\nu) d\nu}{\int_0^{\infty} S_{PD}(\nu) d\nu}, \quad (14,15)$$

Подынтегральная функция первой формулы содержит спектральную плотность чувствительности фотоприемника в то время, как вторая формула в качестве подынтегральных функций содержит нормированные функции спектральной плотности чувствительности фотоприемника и плотности потока излучения источника.

На основе приведенной математической модели построена имитационная модель измерителя объемной концентрации метана, учитывающая влияние комплекса возмущающих факторов, и предложены технические решения, обеспечивающие повышение точности и оперативности получения измерительной информации. Принципиальным есть конструкторское решение, реализующее методы построения измерителей, которые обеспечивают измерения среднего значения концентрации метана, по длине измерительной трассы.

При этом проблема влияния пыли в рабочем измерительном канале на результаты измерения решается методами компенсации путем введения аппаратурной избыточности. Для компенсации влияния рудничной пыли на результат измерения концентрации метана в измеритель введены два пространственных и в них по два частотных канала [5].

#### Выводы.

1. Предложенная имитационная математическая модель оптического канала измерителя объемной концентрации метана учитывает комплекс возмущающих факторов, а именно: температуру и давление газовой атмосферы, влияние длины оптической трассы. Учет этих факторов позволяет повысить точность измерения объемной концентрации метана.

2. Методы математического и имитационного моделирования, а также современные оптические и микроэлектронные средства позволяют разработать инфракрасные газоанализаторы высокого быстродействия и точности.

#### Литература

1. NASA [Электронный ресурс] /Virtual Planetary Laboratory, Diane.L.Engler. – Электронные данные, – Режим доступа: <http://vpl.ipac.caltech.edu/spectra/ch4.htm>. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
2. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. Л.: Энергия, 1980. – 164 с.
3. Аналитический анализ, спектральный анализ, показатели преломления: Справочник /Под. общ. ред. Б.П. Никольский. – Л.: Химия Ленингр. отд-ние. – Т. 4 – 1967. – 920 с.
4. Ioffe Physico-Technical Institute [Электронный ресурс] / Mid-IR Diode Optopair Group (MIRDOG), Dr. Boris Matveev, Web: Maxim Remennyi. – Электронные данные, Режим доступа: <http://mirdog.spb.ru>. – Загл. с экрана. – Яз. рус. англ.
5. Вовна А.В., Хламов М.Г. Алгоритм компенсации влияния пыли на точность измерения концентрации метана в угольной шахте. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація» Випуск 107. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – 164 – 170 с.