

**А.В. Вовна, А.А. Зори, А.Г. Лыков, М.Г. Хламов**  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра электронной техники  
E-mail: [zori@kita.dgtu.donetsk.ua](mailto:zori@kita.dgtu.donetsk.ua)

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГАРНОГО ГАЗА**

### **Аннотация**

*Вовна А.В., Зори А.А., Лыков А.Г., Хламов М.Г. Математическая модель оптического тракта измерителя концентрации угарного газа. На основании исходного экспериментального спектра поглощения угарного газа получена его математическая модель. Установлена взаимосвязь между поглощением угарного газа и параметрами оптического тракта передачи сигналов, вследствие чего получена математическая модель оптического тракта измерителя концентрации угарного газа.*

***Ключевые слова:** угарный газ, спектр поглощения, оптический тракт, коэффициент пропускания, математическая модель.*

### **Актуальность и проблема.**

В последнее время на предприятиях горно-металлургического комплекса особо остро встал вопрос безопасности труда персонала. Это, в первую очередь, вызвано участвовавшими случаями отравления угарным газом, а также внезапными выбросами горючих газов. В процессе производства на предприятиях горно-металлургического комплекса происходит выделение таких газов как коксовый, природный, ферросплавный и т.п. Основными составляющими данных газов являются водород, метан и угарный газ. Такого рода соединения опасны как для производства, поскольку могут привести к взрыву, так и для рабочих, поскольку эти газы тяжелее воздуха, а угарный газ, который составляет основную часть этих газов, может вызвать токсическое отравление персонала. Следовательно, важно непрерывно контролировать концентрацию опасных газов в районе рабочей зоны технологического оборудования. Для непрерывного контроля концентрации угарного газа в районе рабочей зоны технологического оборудования предложено использовать автоматические газоаналитические измерители. Для построения данных измерителей предлагается использовать метод бездисперсионной абсорбционной спектроскопии, который основан на способности газов избирательно поглощать инфракрасное излучение в спектральной области. При этом первоочередное значение имеет получение математического описания процесса измерения для постановки требований к составным частям и построения схемы измерителя концентрации газов в районе рабочей зоны технологического оборудования.

### **Постановка задач исследований.**

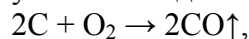
Для построения математической модели оптического тракта измерителя концентрации угарного газа необходимо:

- произвести математическое описание спектра поглощения угарного газа;
- установить взаимосвязь между поглощением угарного газа и параметрами оптического тракта передачи сигналов.

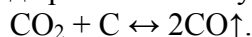
### **Решение задач и результаты исследований.**

Угарный газ (моноксид углерода, окись углерода) – бесцветный газ без вкуса и запаха с химической формулой CO. Концентрация угарного газа в воздухе 12.5 – 74<sup>об.о</sup>% является взрывоопасной; концентрация в воздухе более 0.1<sup>об.о</sup>% может привести к летальному исходу

в течение одного часа. В промышленном производстве угарный газ образуется при горении углерода или соединений на его основе в условиях недостатка кислорода [1]:



или при восстановлении диоксида углерода раскаленным углем:



Смеси угарного газа с другими веществами получают при пропускании воздуха, водяного пара сквозь слой раскаленного кокса, каменного или бурого угля. Из анализа литературных источников [2] установлено, что спектр поглощения угарного газа имеет вид, представленный на рис. 1.

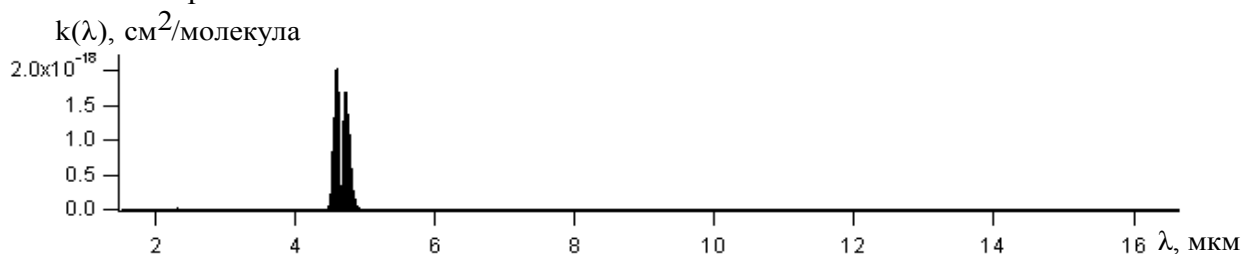


Рисунок 1 – Спектр поглощения угарного газа

Из результатов, приведенных на рис. 1, следует, что наиболее интенсивная полоса спектра поглощения расположена в инфракрасной области и включает в себя спектральные полосы, каждая из которых содержит электронно-колебательно-вращательные компоненты и их комбинационные составляющие, которые отличаются местом расположения в спектральной области и интенсивностью поглощения. Центральная длина волны полосы поглощения угарного газа составляет  $\lambda_0 = 4.66$  мкм. На рис. 2 представлена наиболее интенсивная полоса спектра поглощения угарного газа. Основная трудность при получении математической модели спектра поглощения угарного газа заключается в сложном виде функции  $k(\lambda)$ . Установлено, что для инфракрасной области характерны колебательно-вращательные полосы поглощения, которые являются последовательностями линий поглощения, контур каждой из которых определяется межмолекулярными соударением и описывается выражением вида [3]:

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

где  $a_i = \int_0^\infty K_i(\lambda) d\lambda$  – интегральная интенсивность  $i$ -ой линии;  $\delta_i$  – полуширина вращательной линии;  $\lambda_{0i}$  – центр линии.

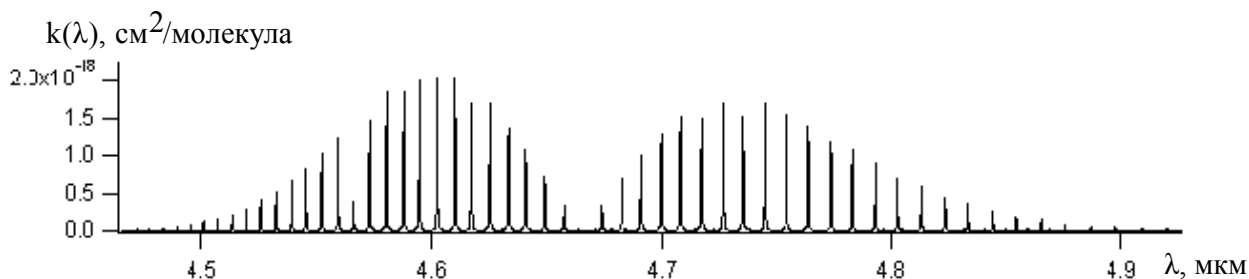


Рисунок 2 – Наиболее интенсивная полоса спектра поглощения угарного газа

Коэффициент поглощения  $K(\lambda)$  полосы выражается суммой коэффициентов поглощения отдельных линий:

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

Для вычисления ряда вводятся различные допущения о характере изменения параметров  $a_i$ ,  $\delta_i$

и  $\lambda_{0i}$  в пределах колебательно-вращательной структуры полосы. В работе [3] рассматривается полоса поглощения как бесконечная последовательность одинаковых по интенсивности ( $a_i = \text{const}$ ) и полуширине ( $\delta_i = \delta$ ) равноотстоящих линий. В данной работе использована 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.

Для задания характера изменения спектра поглощения изначально предложено построить нормированную огибающую спектра  $K_{\text{огиб\_норм}}(\lambda)$ . При этом полоса поглощения разбивается на коротковолновую, средневолновую и длинноволновую ветви. Для угарного газа средневолновая ветвь является вырожденной, поэтому:

$$K_{\text{огиб\_норм}}(\lambda) = K_{\text{огиб\_норм\_крв}}(\lambda) + K_{\text{огиб\_норм\_длв}}(\lambda), \quad (3)$$

где  $K_{\text{огиб\_норм\_крв}}(\lambda)$  и  $K_{\text{огиб\_норм\_длв}}(\lambda)$  – составляющие нормированной огибающей спектра поглощения, соответствующие, соответственно, коротковолновой и длинноволновой ветвей.

Полученная нормированная огибающая спектра поглощения угарного газа представлена на рис. 3.

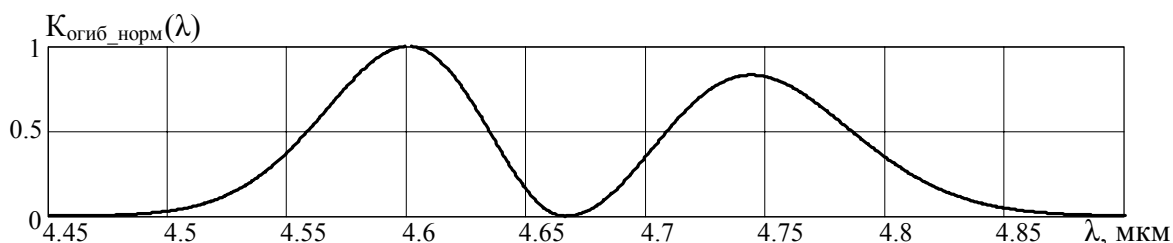


Рисунок 3 – Нормированная огибающая спектра поглощения угарного газа

Из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что максимальные поглощения угарного газа для коротковолновой и длинноволновой ветвей соответствуют длинам волн:

$$\lambda_{\text{крв\_max}} = 4.6 \text{ мкм}; \quad \lambda_{\text{длв\_max}} = 4.74 \text{ мкм}$$

и составляют, соответственно:

$$k_{\text{крв\_max}} = 2.0438 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{молекула}; \quad k_{\text{длв\_max}} = 1.7 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{молекула}.$$

Используя данные величины коэффициентов поглощения вычисляется максимальная интегральная интенсивность линий в ветвях:

$$a_{\text{крв\_max}} = k_{\text{крв\_max}} \cdot \pi \cdot \delta \cdot N_A, \quad a_{\text{длв\_max}} = k_{\text{длв\_max}} \cdot \pi \cdot \delta \cdot N_A, \quad (4)$$

где  $N_A$  – число Авогадро,  $N_A = 6.0221415 \cdot 10^{23}$  молекула/моль.

Зная расстояние между линиями в полосе поглощения (для угарного газа  $d = 0.0084$  мкм) и определив по рис. 2 количество линий в каждой ветви полосы поглощения ( $n_{\text{крв}} = n_{\text{длв}} = 26$ ) определяется интегральная интенсивность линий. Для коротковолновой ветви:

$$a_{\text{крв}_i} = a_{\text{крв\_max}} \cdot K_{\text{огиб\_норм\_крв}}(\lambda_{\text{крв}_i}). \quad (5)$$

Для длинноволновой ветви:

$$a_{\text{длв}_i} = a_{\text{длв\_max}} \cdot \frac{K_{\text{огиб\_норм\_длв}}(\lambda_{\text{длв}_i})}{K_{\text{ас}}}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{ас}} = k_{\text{длв\_max}}/k_{\text{крв\_max}}$  – коэффициент асимметрии длинноволновой ветви по отношению к коротковолновой.

С учетом представленного, математическая модель спектра поглощения угарного газа имеет вид:

$$K(\lambda) = \sum_{i=1}^{n_{крв}} \frac{a_{крв\_i}}{\pi} \cdot \frac{\delta}{(\lambda - \lambda_{крв0\_i})^2 + \delta^2} + \sum_{i=1}^{n_{длв}} \frac{a_{длв\_i}}{\pi} \cdot \frac{\delta}{(\lambda - \lambda_{длв0\_i})^2 + \delta^2}. \quad (7)$$

На рис. 4 приведен спектр поглощения спектра угарного газа, полученный с использованием разработанной математической модели.

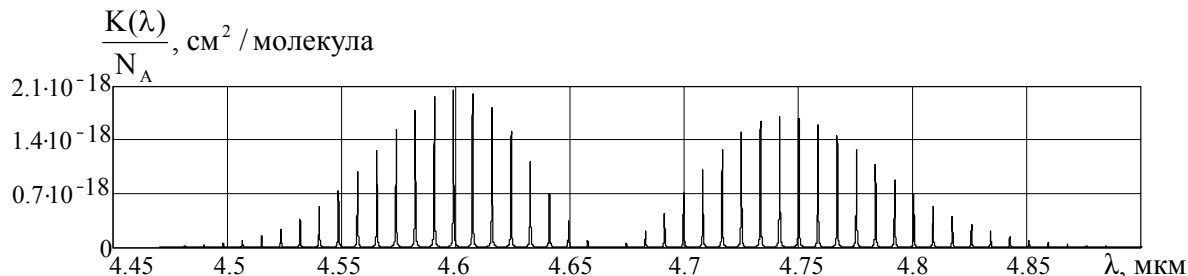


Рисунок 4 – Спектр поглощения угарного газа, полученный с использованием разработанной математической модели

Относительное среднеквадратичное отклонение экспериментального спектра от спектра, полученного с использованием математической модели, не превышает 5 %.

Для получения математической модели оптического тракта измерителя использован закон Бугера-Ламберта-Бера [4]:

$$D(\lambda, C_M, l) = K(\lambda) \cdot C_M \cdot l, \quad (8)$$

где  $D$  – оптическая плотность угарного газа;  $C_M$  – молярная концентрация угарного газа;  $l$  – длина оптического тракта.

При контроле концентрации угарного газа в районе рабочей зоны технологического оборудования необходимо иметь объемную концентрацию. Для перехода от молярной концентрации к объемной используется выражение:

$$C_M = \frac{C_{об} \cdot P}{R \cdot T} \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где  $C_{об}$  – объемная концентрация угарного газа;  $P$  – атмосферное давление;  $T$  – абсолютная температура газовой смеси;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R=8.314472$  Дж/(моль·К). В этом случае коэффициент пропускания оптического тракта передачи сигналов описывается выражением [5]:

$$K_{OK}(\lambda, C_{об}, l) = e^{-D(\lambda, C_{об}, l)}. \quad (10)$$

Выражение (11) является математической моделью оптического тракта измерителя концентрации угарного газа. При длине оптического тракта  $l = 20$  см и объемной концентрации угарного газа  $C_{об} = 0.25$  об.% зависимость коэффициента пропускания оптического тракта от длины волны имеет вид, представленный на рис. 5.

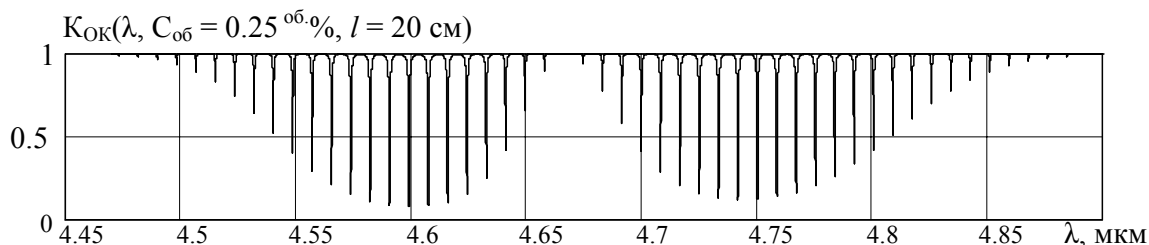


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента пропускания оптического тракта измерителя от длины волны, полученная с использованием разработанной математической модели

Разработанная математическая модель оптического тракта используется при постановке требований к оптическому измерительному каналу концентрации угарного газа. Точ-

ность полученной математической модели определяется погрешностью математического описания спектра поглощения угарного газа.

#### **Выводы.**

1. Разработана математическая модель спектра поглощения угарного газа, которая связывает коэффициент поглощения полосы спектра с интегральной интенсивностью отдельных линий поглощения, центром каждой линии и ее шириной. Данная модель является составной частью математической модели оптического тракта передачи сигналов.

2. Установлена взаимосвязь между поглощением угарного газа и коэффициентом пропускания оптического тракта, который определяется концентрацией угарного газа и длиной оптического тракта, что позволяет поставить требования к оптоэлектронным компонентам измерителя концентрации угарного газа.

#### **Литература**

1. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия/ Н.С.Ахметов – М.:Высш. шк.,2001.– 743 с.
2. NASA [Электронный ресурс]: Virtual Planetary Laboratory. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://vpl.astro.washington.edu/spectra/cohitranimagesmicrons.htm>. – Дата доступа: март 2010. – Загл. с экрана.
3. Бреслер П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение/ П.И. Бреслер. – Л.: Энергия, 1980. – 164 с.
1. Вовна О.В. Розробка математичної моделі швидкодіючої вимірювальної системи контролю концентрації метану у вугільних шахтах /О.В. Вовна // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2009. – Випуск 16 (147). – С. 194 – 200.
2. Пат. 46197. Україна, МПК G 01 N 21 / 31. Спосіб вимірювання концентрації метану у рудничній атмосфері / О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренєв, М.Г. Хламов; Донец. нац. техн. ун-т (Україна). – № u200906578; заявл. 23.06.2009; опубл. 10.12.2009.

#### **Анотація**

**Вовна А.В., Зорі А.А., Ликов О.Г., Хламов М.Г. Математична модель оптичного тракту вимірювача концентрації чадного газу.** На підставі початкового експериментального спектру поглинання чадного газу отримана його математична модель. Встановлений взаємозв'язок між поглинанням чадного газу і параметрами оптичного тракту передачі сигналів, унаслідок чого отримана математична модель оптичного тракту вимірника концентрації чадного газу.

**Ключові слова:** чадний газ, спектр поглинання, оптичний тракт, коефіцієнт пропускання, математична модель.

#### **Abstracts**

**Vovna A.V., Zory A.A., Lykov A.G, Hlamov M.G. An optical channel mathematical model of carbon monoxide concentration measuring device.**

*A mathematical model of carbon monoxide absorption spectrum was developed on the basis of its experimental spectrum. There was set communication between the carbon monoxide absorption and parameters of optical channel for signal transmission, hereupon the mathematical model of carbon monoxide concentration measuring device was developed.*

**Keywords:** carbon monoxide, an absorption spectrum, an optical channel, an admission coefficient, a mathematical model.

Здано в редакцію:  
01.04.10г.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Скобцов Ю.А.