

А.В. ПРУССКИЙ<sup>1</sup>, В.Д. КАЛУГИН<sup>2</sup>, А.Ю. ВОЙТОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт государственного управления в сфере гражданской защиты, г. Киев

<sup>2</sup>Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков

<sup>3</sup>Научно-производственное предприятие «Газтехника», г. Харьков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ГАЗОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ДАТЧИКОМ СПИРАЛЕВИДНОГО ТИПА ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА

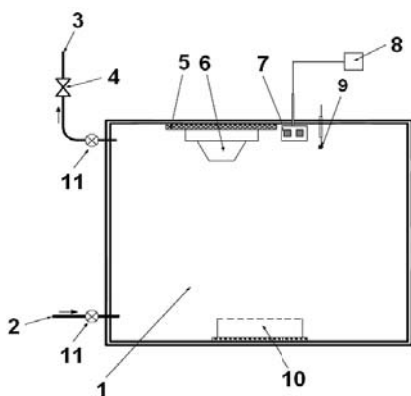
Создана математическая модель изменения концентрации монооксида углерода (СО) во времени при возникновении возгорания твердых горючих материалов (ТГМ). Впервые экспериментально установлены зависимости величины аналитического сигнала ( $U_c$ ) для газового пожарного извещателя (ГПИ) с полупроводниковым датчиком (ППД) спиралевидного типа (СТ) от концентрации монооксида углерода (СО).

**Постановка проблемы.** ГПИ с ППД СТ ориентирован на выявление СО как неотъемлемого компонента газообразных продуктов начальной стадии термического разложения твердых горючих материалов. Однако для обеспечения максимальной эффективности работы ГПИ с ППД СТ в автоматизированных системах пожарной сигнализации необходимо четко знать законы изменения концентрации анализируемых газовых компонентов во времени, которые устанавливаются на основе экспериментальных зависимостей величины аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ от концентрации газовых компонентов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ нормативно-технической и научной литературы показал, что предлагаемые к рассмотрению в работе закономерности и зависимости для монооксида углерода не исследованы.

**Формулирование цели статьи.** Целью данной работы является построение математической модели изменения концентрации СО при термической деструкции твердых горючих материалов во времени, а также установление экспериментальной зависимости величины аналитического сигнала ( $U_c$ ) газового пожарного извещателя с полупроводниковым датчиком спиралевидного типа от концентрации СО.

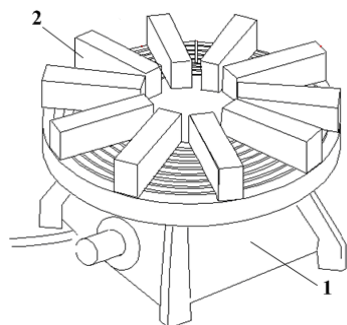
**Изложение основного материала.** Для проведения экспериментальных исследований разработана и использована стеклянная герметичная газовая камера размерами 1×1×1 м (объемом 1 м<sup>3</sup>) со съемной верхней рабочей панелью (рис. 1).



**Рис. 1.** Стеклянная газовая камера для проведения экспериментальных исследований технических характеристик газовых пожарных извещателей: 1 – газовая испытательная камера; 2 – подача чистого воздуха; 3 – выход газовой смеси; 4 – стравливающий клапан; 5 – подложка под ГПИ; 6 – ГПИ; 7 – датчик измерения концентрации СО; 8 – устройство для считывания информации с датчика СО; 9 – датчик температуры (термометр); 10 – тестовый очаг пожара TF-2; 11 – регулирующий кран

Необходимо отметить, что в качестве датчика измерения концентрации CO (7) и устройства для считывания информации с датчика CO (8) использовался газоанализатор марки OKSI 5M-4.

В соответствии со стандартом EN 54-7:2001, каждый тестовый очаг состоит из определенного горючего материала, имеет определенную конфигурацию и небольшие размеры. Очаг TF-2 (рис. 2) состоит из 10 высушенных буковых брусков (влажность ~5 %) размерами 75×25×20 мм, которые расположены на поверхности электрической плитки, мощностью примерно 2 кВт и диаметром 220 мм, и подогреваются до температуры 600 °С.



**Рис. 2.** Тестовый очаг пожара TF-2: 1 – электрическая плитка; 2 – деревянные брусочки

Очаг TF-2 – тлеющее пламя (пиролитическое), эмиссия тепла небольшая, эмиссия дыма большая, дым видимый, ясный. Пламенное горение недопустимо.

Для надёжной статистической обработки экспериментальных данных и последующего их анализа проведено пять серий опытов. Анализ полученных данных позволяет судить о характере зависимости изменения концентрации CO от времени –  $C_{CO}(t)$ . В общем виде ее можно записать так:

$$C_{CO}(t) = k \cdot t^n, \quad (1)$$

где:  $k$  – константа скорости выделения CO при термическом разложении ТГМ;  $t$  – время (с);  $n$  – показатель степени.

С использованием метода наименьших квадратов (определение минимального значения среднеквадратического отклонения) проведены линеаризация и преобразование выражения (1) с целью получения численных значений неизвестных коэффициентов:

$$\ln C = \ln k + n \cdot \ln t \quad . \quad (2)$$

Проведем замену переменных:  $y = \ln C$ ;  $a = \ln k$  ( $k=e^a$ );  $x = \ln t$  и определим минимальное значение среднеквадратического отклонения функции ( $S$ ):

$$S = \min \sum_i (y(x_i) - y_i)^2 = \min \sum_i (a + (n \cdot x_i) - y_i)^2 \quad . \quad (3)$$

Откуда:

$$\frac{dS}{da} = 2 \sum_i (a + (n \cdot x_i) - y_i) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dn} = 2 \sum_i x_i \cdot (a + (n \cdot x_i) - y_i) = 0 \quad . \quad (5)$$

Преобразуя выражения (4) и (5), получим:

$$n = \frac{N \cdot \sum_i (x_i \cdot y_i) - \sum_i y_i \sum_i x_i}{N \cdot \sum_i (x_i^2) - (\sum_i x_i)^2} \quad . \quad (6)$$

Проведем еще одну замену переменных:  $\overline{xy} = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_i (x_i \cdot y_i)$ ,  $\overline{x} = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_i x_i$ ,  
 $\overline{y} = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_i y_i$ ,  $\overline{x^2} = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_i (x_i)^2$ .

Тогда получим:

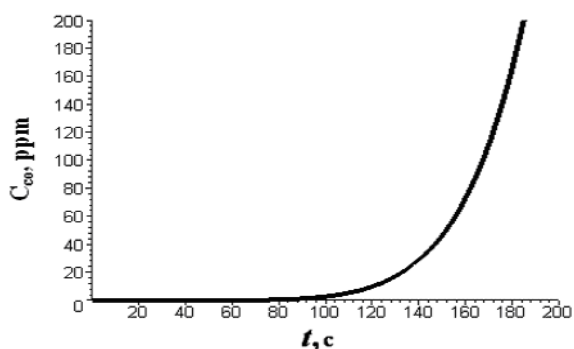
$$n = \frac{\overline{(x \cdot y)} - (\overline{x}) \cdot (\overline{y})}{(\overline{x^2}) - (\overline{x})^2}, \quad (7)$$

$$a = (\overline{y}) - n \cdot (\overline{x}). \quad (8)$$

Подставив численные значения экспериментальных данных в выражения (7) и (8), получили выражение изменения концентрации СО в газовой среде при термическом разложении твердых горючих материалов:

$$C_{CO}(t) = (2,7 \cdot 10^{-14}) \cdot t^7. \quad (9)$$

Графическое представление этой зависимости приведено на рис. 3.



**Рис. 3.** Изменение концентрации СО при термическом разложении твердых горючих материалов

Таким образом, получена математическая модель изменения концентрации СО во времени при возникновении возгорания твердых горючих материалов.

С использованием полученных значений рабочих характеристик ГПИ с ППД СТ проведено обоснование и выбор порога срабатывания последнего.

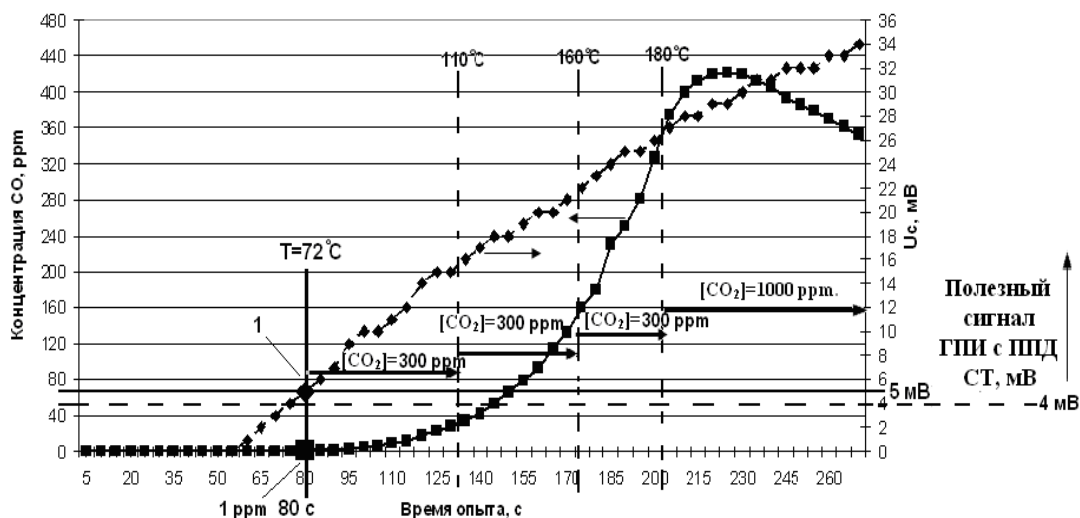
ГПИ с ППД СТ построен таким образом, что аналитическим сигналом является падение напряжения ( $U_c$ ) при

воздействии на датчик различных газов среды, которое соответствует определенному значению концентрации газа.

Показано, что уровень полезного сигнала ГПИ с ППД СТ находится выше 4 мВ и принят равным 5 мВ [1, 2].

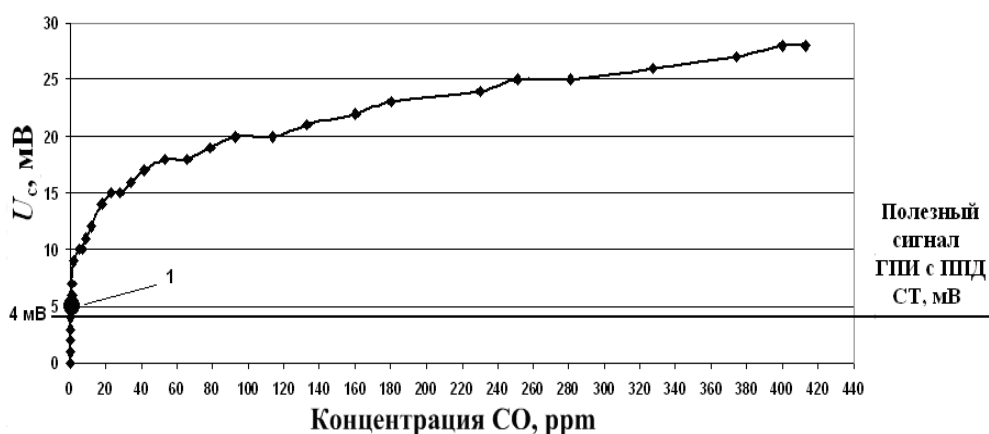
С помощью измерительной установки (рис. 1) были проведены исследования процесса пиролиза в конкретном диапазоне температур. Для выполнения динамических исследований проведен вывод на ЭВМ всех контролируемых параметров ( $U_c$  (мВ),  $\tau$  (с),  $t$  (°C) и [CO] (ppm)).

Результаты таких измерений представлены на рис. 4. Это результаты последовательных пяти измерений в интервале времени от 0 до 270 с и температуры пиролиза от  $30 \pm 5$  °C до  $180 \pm 5$  °C. Из графика видно, что ГПИ с ППД СТ срабатывает на концентрацию СО = 1 ppm (точка 1), когда величина полезного сигнала составляет 5 мВ [1, 2].



**Рис. 4.** Зависимость величины аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ  $U_c$  (◆) и концентрации СО (■) от времени пиролиза:  $\Delta T_{\text{пиролиза}} = 30 \pm 5 - 180 \pm 5$  °С; 1 – точка срабатывания ГПИ с ППД СТ ( $U_c = 5$  мВ,  $[CO] = 1$  ppm)

По данным рис. 4 построена зависимость аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ от концентрации СО (рис. 5), которая подтверждает представления об особенностях формирования аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ при концентрации СО > 1 ppm.



**Рис. 5.** Зависимость величины аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ -  $U_c$  от концентрации СО:  $\Delta T_{\text{пиролиза}} = 30 \pm 5 - 180 \pm 5$  °С;  $\tau_{\text{пиролиза}} = 215$  с; 1 – точка срабатывания ГПИ с ППД СТ ( $U_c = 5$  мВ,  $[CO] = 1$  ppm)

На основе данных рис. 5 получена общая зависимость изменения аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ от концентрации СО:

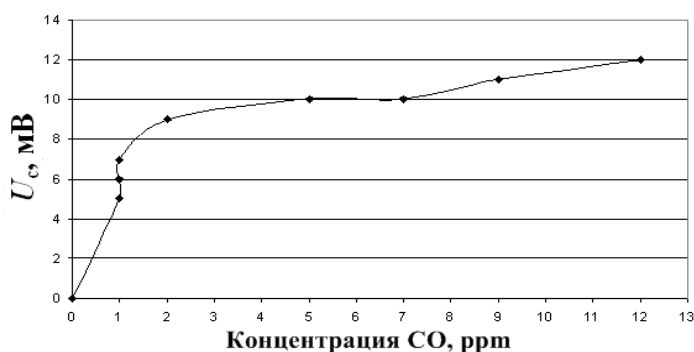
$$U_c = k \cdot C_{\text{CO}}^n, \quad (10)$$

где:  $U_c$  – величина аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ (мВ);  $k$  – коэффициент ( $k=f(T)$ );  $C_{\text{CO}}$  – концентрация СО (ppm);  $n$  – показатель степени (порядок химической реакции по СО) [1, 2].

Необходимо отметить, что зависимость  $U_c$  (мВ) от концентрации СО в этом случае носит нелинейный характер.

С целью выявления особенностей начальной стадии возгорания – пиролиза ТГМ – зависимость (10) проанализирована для самого начального участка процесса (рис. 6), до

концентраций  $CO \approx 10\text{--}15$  ppm. Из графика видно, что линейная зависимость  $U_c\text{--}[CO]$  наблюдается только лишь в интервале до 1 ppm  $CO$ .



**Рис. 6.** Зависимость величины аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ  $U_c$  от концентрации  $CO$  на начальном этапе пиролиза ТГМ (до 40 с)

Таким образом, получены экспериментальные зависимости величины аналитического сигнала ГПИ с ППД СТ от концентрации газообразных продуктов пиролиза ТГМ ( $CO$ ,  $CO_2$ ). Чувствительность (порог срабатывания) ГПИ с ППД СТ составляет 1 ppm по  $CO$ , что соответствует значению аналитического сигнала  $U_c = 5$  мВ.

#### **Выводы**

1. Построена математическая модель изменения концентрации  $CO$  во времени при возникновении возгорания твердых горючих материалов.

2. Впервые установлены экспериментальные зависимости величины аналитического сигнала ( $U_c$ ) ГПИ с ППД СТ от концентрации  $CO$ . На основе их анализа показано, что чувствительность (порог срабатывания) ГПИ с ППД СТ составляет 1 ppm по  $CO$ , что соответствует значению аналитического сигнала 5 мВ.

1. Прусский А.В. Предупреждение чрезвычайных ситуаций путем фиксирования концентраций газообразных продуктов пиролиза целлюлозосодержащих материалов газовыми пожарными извещателями с полупроводниковыми чувствительными элементами спиралевидного типа / А.В. Прусский, В.Д. Калугин, А.Ю. Войтов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2007. – Вип. 5. – С. 166–176.

2. Прусский А.В. Исследование технических характеристик газового пожарного извещателя с полупроводниковым чувствительным элементом спиралевидного типа для обнаружения газообразных продуктов пиролиза целлюлозосодержащих материалов / А.В. Прусский, В.Д. Калугин, А.Я. Шаршанов, А.Ю. Войтов // Системи обробки інформації. – 2007. – Вип. 7(65). – С. 123–128.

#### **А.В. Прусский, В.Д. Калугин, О.Ю. Войтов**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ВЕЛИЧИНИ АНАЛІТИЧНОГО СИГНАЛУ ГАЗОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА З НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДАТЧИКОМ СПІРАЛЕВИДНОГО ТИПУ ВІД КОНЦЕНТРАЦІЇ МОНООКСИДУ ВУГЛЕЦЮ.**

*Побудована математична модель зміни концентрації CO у часі при виникненні заpalення твердих горючих матеріалів. Вперше встановлені експериментальні залежності величини аналітичного сигналу газового пожежного сповіщувача з напівпровідниковим датчиком спиралевидного типу від концентрації CO.*

#### **A.V. Prusskiy, V.D. Kalugin, A.Y. Voitov**

**EXPERIMENTAL DEPENDENCES OF SIZE OF AN ANALYTICAL SIGNAL OF THE GAS FIRE DETECTOR WITH THE SEMI-CONDUCTOR GAGE OF HELICOID TYPE FROM CONCENTRATION CO.**

*The mathematical model of change of concentration CO in time is constructed at occurrence of ignition of firm combustible materials. For the first time experimental dependences of size of an analytical signal of the gas fire detector with the semi-conductor gage of helicoid type from concentration CO are established.*