

В.М. Гингольд, канд. тех. наук, В.А. Бублейник

(Днепропетровский отдел НИИ горноспасательного дела «Респиратор»)

А.В. Делямуре

(Институт геотехнической механики НАН Украины)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СРЕДЕ ВЫСОКИХ (ПОСЛЕВЗРЫВООПАСНЫХ) КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА

Несмотря на интенсивное развитие новых методов газового анализа и связанное с ним создание современных газоанализаторов основной парк средств шахтной метанометрии в Украине и в ведущих угледобывающих странах состоит из приборов и систем, основанных на использовании терموкаталитического метода. Это обусловлено относительной простотой и дешевизной термокаталитического датчика, удобством его конструктивной и схмотехнической привязки и обработки информации, высокой чувствительностью и инвариантностью к мешающим факторам. Применение современных материалов и технологий при создании термокаталитических датчиков позволяет реализовать высокие динамические качества, низкую энергоемкость и как следствие последнего – простое обеспечение взрывобезопасного исполнения.

Вышеперечисленное дает возможность прогнозировать широкое применение термокаталитических датчиков в новых поколениях средств шахтной метанометрии, особенно портативных и встраиваемых в экипировку шахтера.

Однако наметившиеся в последнее десятилетие тенденции усложнения газовой обстановки шахт, рост количества и категоричности (тяжести) аварий по газовому фактору [1] привели к ужесточению требований к эксплуатационным характеристикам средств шахтной метанометрии.

Одно из таких требований – это однозначность получаемой от метанометра информации в диапазоне объемных долей метана до 100 %, которое нашло отражение в отечественной [2] и зарубежной нормативной базе.

Классически построенный термокаталитический датчик не позволяет реализовать это требование в полной мере из-за неоднозначности функции преобразования [3]. Одна из основных причин – снижение термокаталитического эффекта на послестехиометрических концентрациях из-за дефицита кислорода. Для устранения указанного недостатка разработано ряд технических решений, основанных на физических эффектах и схмотехнических приемах. Однако для эффективного использования этих решений необходимо минимизировать естественное снижение чувствительности датчика на послестехиометрических концентрациях.

Этому и посвящена настоящая работа.

Объектом исследований является термокаталитический датчик с цилиндрическими чувствительными элементами диаметром 0,6 и длиной 0,85 мм. Со-

противление чувствительных элементов при температуре 20 °С составляет $(6,3 \pm 0,4)$ Ом. При напряжении питания датчика 2,4 В температура чувствительных элементов на воздухе колеблется от 370 до 408 °С, что обеспечивает реализацию диффузионной области процесса каталитического окисления метана [4]. Благодаря этому минимизировано влияние мешающих факторов на результаты измерений. Так, датчик в диапазоне измерений от 0 до 2,5 % объемной доли метана имеет основную абсолютную погрешность измерений в пределах $\pm 0,15$ % и инерционность не более 4 с, работает устойчиво и ведет себя предсказуемо. Зависимость выходного сигнала датчика от напряжения питания на концентрации метана 1,65 % изображена на рис. 1, из которой следует, что начиная с напряжения 2,3 В выходной сигнал, практически, не зависит от напряжения питания, что подтверждает реализацию диффузионной области процесса каталитического окисления. Однако при исследованиях описанного датчика на концентрациях метана до 100 % проявились его некоторые отрицательные свойства.

Графики функции преобразования датчика на концентрациях метана от 0 до 100 % (прямой и обратный циклы) представлены на рис. 2.

Из них видно, что на прямом цикле при концентрации метана около 65 % происходит резкий и глубокий провал выходного сигнала, в то время как концентрация кислорода при этом снижается монотонно. Причем, на обратном цикле восстановление выходного сигнала происходит на концентрации около 27 %. Таким образом наблюдается гистерезисность функции преобразования, т. е. грубое несовпадение функций преобразования при прямом и обратном циклах. На прямом цикле в промежутке концентраций от 65 до 100 % и на обратном цикле от 100 до 27 % выходные сигналы датчика неоднозначны.

Анализ этих явлений позволил сделать предположение о том, что основной их причиной является охлаждение катализатора на высоких концентрациях метана из-за увеличения теплопроводности газовой среды, окружающей чувствительный элемент (коэффициент теплопроводности метана в 1,3 раза больше,

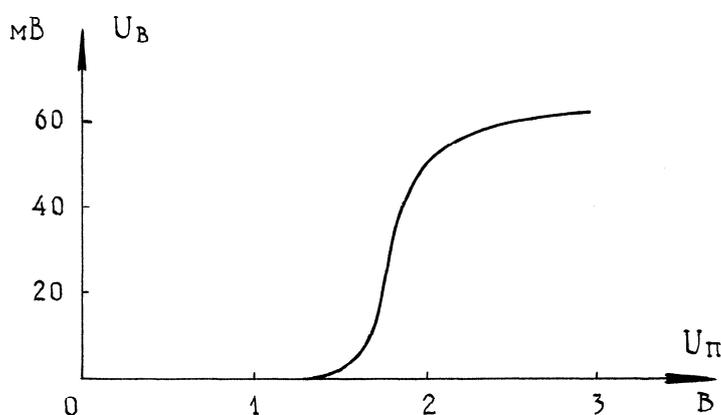


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала датчика $U_{в}$ от напряжения питания $U_{п}$ на концентрации метана 1,65 %

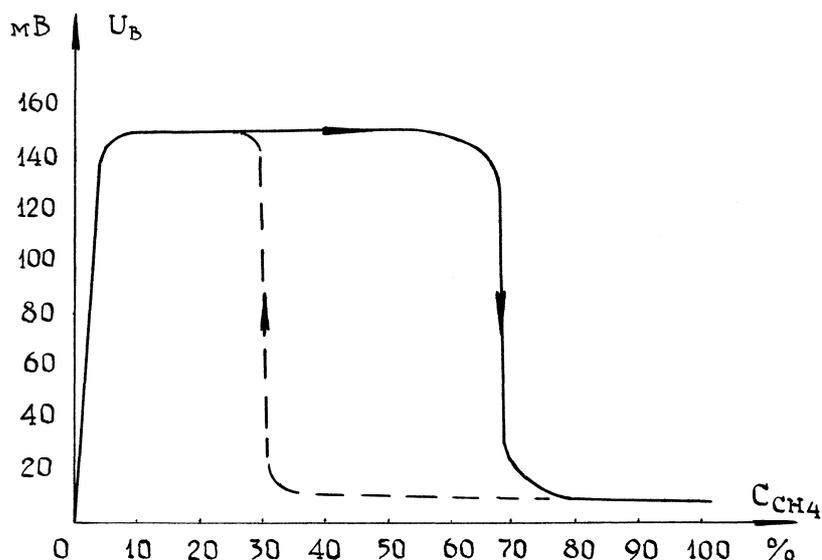


Рис. 2. Функция преобразования датчика на концентрации метана от 0 до 100 % при $U_{п} = 2,4 \text{ В}$

чем коэффициент теплопроводности воздуха [5, 6]). При этом каталитический процесс сначала переходит в кинетическую область [4], характеризующуюся сильной зависимостью каталитической активности от температуры, а затем и вовсе прекращается.

Дальнейшие исследования были направлены на подтверждение этого предположения.

Степень влияния коэффициента теплопроводности газовой среды, окружающей чувствительный элемент, помещенный в реакционную камеру, на его температуру описывается уравнением теплового баланса [3]. Такие уравнения известны для цилиндрического чувствительного элемента, коаксиально расположенного в цилиндрической камере, и для сферического элемента, расположенного в сферической. В исследуемом датчике чувствительный элемент цилиндрический, но расположен он в камере не коаксиально; его диаметр и длина соизмеримы (0,6 и 0,85 мм) и примерно на порядок меньше размеров сечения камеры, что позволяет рассматривать его как точечный. Поэтому в исследуемом датчике для описания механизма теплопередачи более удобно использовать уравнение для сферического чувствительного элемента [3]:

$$\frac{4\pi\lambda(t_{э} - t_{к})}{\frac{1}{r_{э}} - \frac{1}{r_{к}}} = I^2 R, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газовой среды, заполняющей реакционную камеру;

$t_{э}$, $t_{к}$ – температуры чувствительного элемента и внутренней стенки реакционной камеры соответственно;

$r_{\text{э}}, r_{\text{к}}$ – радиусы чувствительного элемента и сечения реакционной камеры в которой он расположен соответственно;

I – ток чувствительного элемента;

R – сопротивление чувствительного элемента при температуре $t_{\text{э}}$.

Выразив правую часть уравнения (1) через параметры питания датчика и решив его относительно температуры чувствительного элемента, получим

$$t_{\text{э}} = \frac{\left(\frac{1}{r_{\text{э}}} - \frac{1}{r_{\text{к}}}\right)UI}{4\pi\lambda} + t_{\text{к}}, \quad (2)$$

где U – падение напряжения на чувствительном элементе.

По этому выражению были произведены практические расчеты температуры чувствительного элемента в воздухе и метане. Исходные данные для расчетов и их результаты представлены в табл. 1.

Расчеты были выполнены в несколько этапов методом последовательного приближения с учетом зависимости теплопроводности газов от температуры [6] (в таблице приведены окончательные значения λ для температуры, определенной как среднее арифметическое температур чувствительного элемента и внутренней стенки камеры).

Таблица 1

Газовая среда	λ , Вт/м·град	U, В	I, А	$r_{\text{э}}$, м	$r_{\text{к}}$, м	$t_{\text{к}}$, °С	$t_{\text{э}}$, °С
Воздух	40,7	1,200	0,085	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	20	408
Метан	62,0	0,977					227

Учитывая, что при расчетах принято целый ряд допущений (реальный цилиндрический чувствительный элемент заменен сферой, радиус которой равен половине длины цилиндрического чувствительного элемента; реальная полуцилиндрическая камера заменена сферической; принят линейный закон распределения температуры от чувствительного элемента к внутренней стенке камеры), их корректность была проверена экспериментально с использованием зависимости сопротивления платинового терморезистора от температуры [7]:

$$R = R_0(1 + At_{\text{э}} + Bt_{\text{э}}^2), \quad (3)$$

где R_0 – сопротивление чувствительного элемента при температуре 0 °С;

$$A = 3,968 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{\text{К}};$$

$$B = -5,847 \cdot 10^{-7}, \frac{1}{\text{К}^2}.$$

Данные расчетов по уравнению (3) и их результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Газовая среда	R_0 , Ом	R , Ом	t , °С
Воздух	5,9	14,1	370
Метан		11,5	248

Сопоставимость результатов, полученных по уравнению теплового баланса и по температурному коэффициенту сопротивления платины, подтверждает верность выполненных расчетов, которые свидетельствуют о том, что охлаждение чувствительного элемента за счет высокой теплопроводности метана действительно является причиной провала функции преобразования датчика на высоких концентрациях, т.к. устойчивость процесса каталитического окисления метана на платино-палладиевом катализаторе при температурах ниже 300 °С заметно снижается.

По изложенной методике было выбрано напряжение питания датчика 2,8 В, при котором температура измерительного чувствительного элемента в воздухе и метане составила соответственно 515 и 320 °С. При этом ток датчика увеличился с 85 до 90 мА. Все характеристики датчика на дозрывоопасных концентрациях после повышения его температуры сохранились без изменений. На функции преобразования датчика после повышения его напряжения питания область неоднозначности сузилась до значений 76 – 100 %, а гистерезисность исчезла вообще (см. рис. 3). Иными словами, функции преобразования прямого и обратного циклов совпали.

Полученные результаты подтвердили ранее высказанное предположение: причиной «провала» функции преобразования и ее гистерезисности может быть недопустимое снижение температуры катализатора из-за того, что коэффициент теплопроводности метана существенно выше, чем коэффициент теплопроводности воздуха.

Этот фактор должен учитываться при выборе рабочей точки датчика на характеристике в координатах «напряжение питания – выходной сигнал»

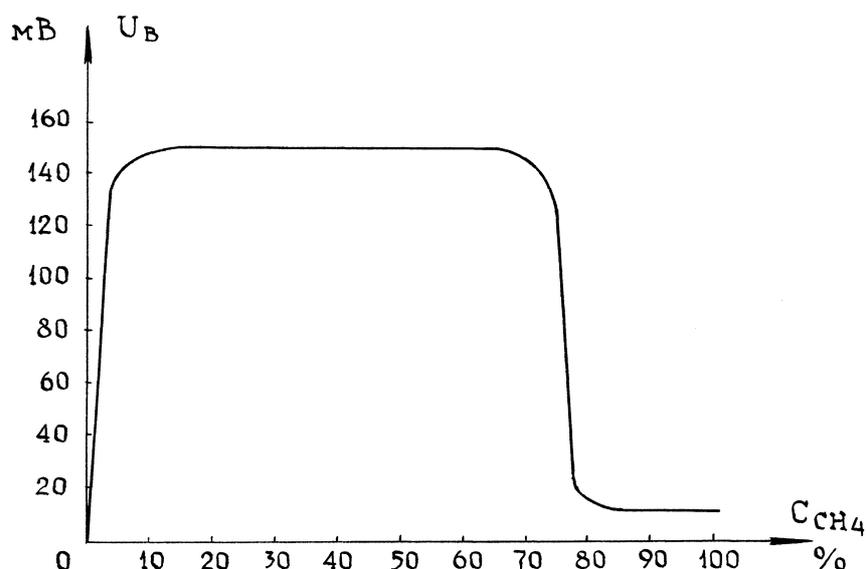


Рис. 3. Функция преобразования датчика на концентрациях метана от 0 до 100 % при $U_{п} = 2,8 \text{ В}$

(см. рис. 1) с целью недопущения охлаждения катализатора за счет теплопроводного эффекта до температур, при которых процесс каталитического окисления смещается в кинетическую область.

Устранение описанного вредного явления требует увеличения потребляемой датчиком мощности. Так, например, в описанном датчике потребляемая мощность была увеличена, примерно, на 23 %. Это привело к некоторому ухудшению потребительских качеств датчика, особенно при его применении в средствах измерительной техники и контроля с автономным питанием. Анализ выражения (2) показывает, - если температура внутренней стенки реакционной камеры будет существенно выше, чем температура окружающей среды, то и температура чувствительного элемента повысится, что обеспечит снижение энергопотребления. Это возможно при увеличении разности температур наружной и внутренней стенок реакционной камеры, т.е. при выполнении реакционной камеры из теплоизоляционного материала.

Оценка влияния теплоизоляционных свойств реакционной камеры датчика на его энергопотребление - актуальная задача для средств метанометрии с автономным питанием, однако ее решение выходит за рамки настоящей работы.

Список литературы

1. Брюханов А.М., Коптиков В.П., Левкин Н.Б. Предотвращение аварий в угольных шахтах – актуальная задача. Проблемы пожарной безопасности. Ликвидация аварий и их последствий: Тез. докл. Междунар. конф. – Донецк, 2002. – 163 с.
2. ГОСТ 24032 – 80. Приборы шахтные газоаналитические. Общие технические требования. Методы испытаний. Группа П 63, 1980.
3. Карпов Е.Ф. и др. Природные опасности в шахтах, способы их контроля и предотвращения – М.: Недра», 1981. – 343 с.
4. Карпов Е.Ф. Физико-технические основы автоматической защиты от выделений метана – М.: Наука, 1981. – 183 с.

5. Павленко В.А. Газоанализаторы – М.- Л.: Машиностроение, 1965. – 395 с.
6. Варгафтик Н.Б., и др. Теплопроводность газов и жидкостей – Государственная служба стандартных и справочных данных, 1970. – 207 с.
7. Туричин А.М., и др. Электрические измерения неэлектрических величин – 5-е издание - Л., Энергия, 1975. – 576 с.