

А.К. Котляров*(Украина, Конотоп Сумской обл., ОАО «Красный металлист»)***В.И. Голинько, д-р техн. наук***(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ МЕТАНА

Причины значительного числа тяжелых аварий, в особенности взрывов метана и пыли, в значительной мере объясняются недостаточной надежностью существующих средств контроля содержания метана в горных выработках шахт. Хотя этим вопросам уделяется достаточно много внимания [1,2], однако, следует отметить, что, несмотря на развитие микроэлектроники и средств вычислительной и информационной техники, средства контроля взрывоопасности горных выработок шахт за последние 10–15 лет практически мало изменились. В первую очередь это касается таких конструктивных недостатков средств контроля, как отсутствие автоматической диагностики их состояния и выявления несанкционированного вмешательства в их работу.

Обоснование методов автоматической диагностики важнейших параметров терموкаталитических датчиков анализаторов метана, как наименее надежного их элемента – цель настоящей работы.

При условии, что в стационарном режиме работы термокаталитического датчика метана лимитирующим агентом в метановоздушной смеси является метан, а протекание реакции окисления на рабочем элементе осуществляется в диффузионной области, то поток метана Q_m к поверхности каталитически активного элемента линейно зависит от концентрации метана в реакционной камере и эффективной диффузионной проводимости элемента [1], т.е.

$$Q_m = \gamma_{\varepsilon} C_{mk}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\varepsilon} = 10^{-2} K_{\varepsilon\phi} \beta_m F_{\varepsilon}$ – эффективная диффузионная проводимость элемента, м³/с; C_{mk} – концентрация метана в реакционной камере, кг/м³; $K_{\varepsilon\phi}$ – коэффициент эффективности окисления метана; β_m – коэффициент массопередачи, м/с; F_{ε} – площадь поверхности элемента, м².

В свою очередь концентрация метана в реакционной камере, выполненной в виде металлокерамического фильтра, связана с концентрацией метана в окружающей атмосфере C_{ma} соотношением [1]:

$$C_{mk} = \kappa_m C_{ma} = C_{ma} \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{\varepsilon} + \gamma_{\phi}}, \quad (2)$$

где $\kappa_m = \gamma_\phi / (\gamma_\varepsilon + \gamma_\phi)$ – коэффициент передачи датчика по концентрации; γ_ϕ – диффузионная проводимость фильтра, м³/с.

При постоянных параметрах питания термокаталитического датчика эффективная диффузионная проводимость однозначно определяет активность рабочего элемента. Изменение параметров питания термокаталитического датчика приводит к изменению эффективной диффузионной проводимости элемента и, соответственно, к изменению концентрации метана в реакционной камере. Рассмотрим возможность осуществления диагностики активности рабочего элемента путем управления режимом питания термоэлементов.

Предположим, что напряжение питания термокаталитического датчика кратковременно снижают до величины, при которой температура начального разогрева каталитически активного элемента является недостаточной для протекания окисления метана на его поверхности. За время паузы выгорание метана в реакционной камере не происходит, поэтому после паузы его концентрация в камере будет выше, чем до нее. После разогрева рабочего элемента и возобновления процесса горения метана до установления стационарного режима выходное напряжение измерительного моста будет больше, чем до паузы.

Концентрацию метана в камере при стационарном режиме горения в начале паузы определим как

$$C_{mko} = C_{ma} \frac{\gamma_\phi}{\gamma_\phi + \gamma_\varepsilon}. \quad (3)$$

В течение паузы длительностью t происходит изменение концентрации метана в камере, со скоростью

$$\frac{dC_{mk}}{dt} = \frac{\gamma_\phi}{V_p} (C_{ma} - C_{mk}), \quad (4)$$

где V_p – объем реакционной камеры, м³.

Решение уравнения (4) с учетом начальных условий имеет вид:

$$C_{mk} = C_{mko} + (C_{ma} - C_{mko}) \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_\phi}{V_p} t\right) \right]. \quad (5)$$

Теоретически вопросы переноса метана через пористые керамические и металлокерамические фильтры рассмотрены в работе [1], однако полученные выражения для расчета проводимости фильтров включают параметры, которые практически невозможно определить на практике (средний размер пор, их длина, извилистость и др.). Поэтому проводимость фильтров оценим исходя из экспериментальных данных о скорости выгорания метана в герметичной камере [2,3].

При номинальном напряжении питания экспериментальные значения эффективной диффузионной проводимости рабочего термоэлемента термогрупп

серийно используемых в анализаторах метана АТ1-1 и АТ3-1 составляют около $\gamma_{\varepsilon} = 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$. Чувствительность газоанализатора при снятии с такой термодетекторной группы металлокерамического фильтра (режим работы без ограничения диффузии контролируемой среды) возрастает в среднем на 50%. С учетом этих данных и зависимости (2) величина диффузионной проводимости металлокерамического фильтра термодетекторных анализаторов $\gamma_{\phi} = 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, а объем реакционной камеры этих термодетекторных групп – $V_p = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$.

При таких значениях γ_{ϕ} и V_p можно считать, что при паузе где-то 20 с концентрация метана в реакционной камере практически достигнет концентрации метана в окружающей атмосфере, т.е. $C_{mk} = C_{ma}$.

Наличие более высокой концентрации метана в камере после паузы приводит к первоначальному всплеску выходного напряжения моста, нормированное значение которого в таком случае будет:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{C_{mk} - C_{mko}}{C_{mko}}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2) и (5) получим

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{\gamma_{\phi} + \gamma_{\varepsilon}}{\gamma_{\phi}}. \quad (7)$$

Таким образом, при значительной длительности паузы и стабильной концентрации метана нормированное значение всплеска выходного напряжения моста однозначно не характеризует каталитическую активность элемента, а зависит от отношения суммарной диффузионной проводимости к диффузионной проводимости фильтра, которая может изменяться в процессе эксплуатации вследствие загрязнения фильтра пылью.

При длительности паузы до 2 с выражение (5) можно представить в виде линейной зависимости

$$C_{mk} = C_{mko} + (C_{ma} - C_{mko}) \frac{\gamma_{\phi}}{V_p} t. \quad (8)$$

Подставляя в выражение (6) значение концентрации метана из уравнения (8), получим

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{\gamma_{\varepsilon} t}{V_p}. \quad (9)$$

Таким образом, при небольшой длительности паузы, постоянном объеме

реакционной камеры и времени паузы нормированное значение всплеска выходного напряжения моста характеризует каталитическую активность элемента и не зависит от диффузионной проводимости фильтра.

Экспериментальная проверка предложенного метода диагностики активности рабочего термоэлемента была выполнена на серийно выпускаемых термокаталитических датчиках, применяемых в стационарных анализаторах метана АТ1-1 и АТ3-1. Она показала, что при длительности паузы порядка 2 с первоначальный всплеск выходного напряжения измерительного моста имеет небольшую величину (до $1,1 U_{вых.о}$) и во многих случаях существенно искажен переходными тепловыми процессами, возникающими в результате разогрева элементов термогруппы.

Учитывая изложенное, для диагностики активности термогруппы по переходным процессам необходима разработка специальных типов датчиков. В этом плане представляет интерес, предложенный авторами датчик с двойным диффузионным фильтром [4], конструкция которого приведена на рис. 1.

Датчик такой конструкции позволил расширить диапазон измерения, уменьшить влияние нестабильности питания, температуры, скорости газовой смеси и запыленности металлокерамического фильтра на погрешность измерения, сохраняет работоспособность при повышенном содержании горючего газа в контролируемой атмосфере.

Параметры фильтра, калиброванного отверстия и термоэлементов в датчике подобраны так, что обеспечивается неравенство

$$\gamma_{отв} \ll \gamma_{\varepsilon} \ll \gamma_{\phi}, \quad (10)$$

где $\gamma_{отв}$ – диффузионная проводимость калиброванного отверстия, $\text{м}^3/\text{с}$.

В этом случае при малой длительности паузы выражение (5) принимает вид:

$$C_{МК} = C_{МКО} + (C_{Ма} - C_{МКО}) \frac{\gamma_{отв} t}{V_p}, \quad (11)$$

а выражения (9) и (7) можно представить как

$$\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.о.}} = \frac{\gamma_{\varepsilon} t}{V_p}, \quad (12)$$

$$\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.о.}} = \frac{\gamma_{отв} + \gamma_{\varepsilon}}{\gamma_{отв}}. \quad (13)$$

Величина диффузионной проводимости калиброванного отверстия в таком датчике $\gamma_{отв} = 0,25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, а $\gamma_{\varepsilon} = 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$. Объем реакционной камеры $V_p = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. При таких параметрах отверстия и камеры выражение (12) справедливо при длительности паузы менее 2 с. При длительной паузе справедливо

ливо выражение (13). Характерным для этого случая является то, что при стабильной неизменной величине γ_{ome} и указанном соотношении величин диффузионной проводимости нормированное значение выброса и во втором случае однозначно связано с эффективной диффузионной проводимостью термоэлемента. При этом прогнозируемая амплитуда выброса до пяти раз может превышать выходное напряжение моста до паузы.

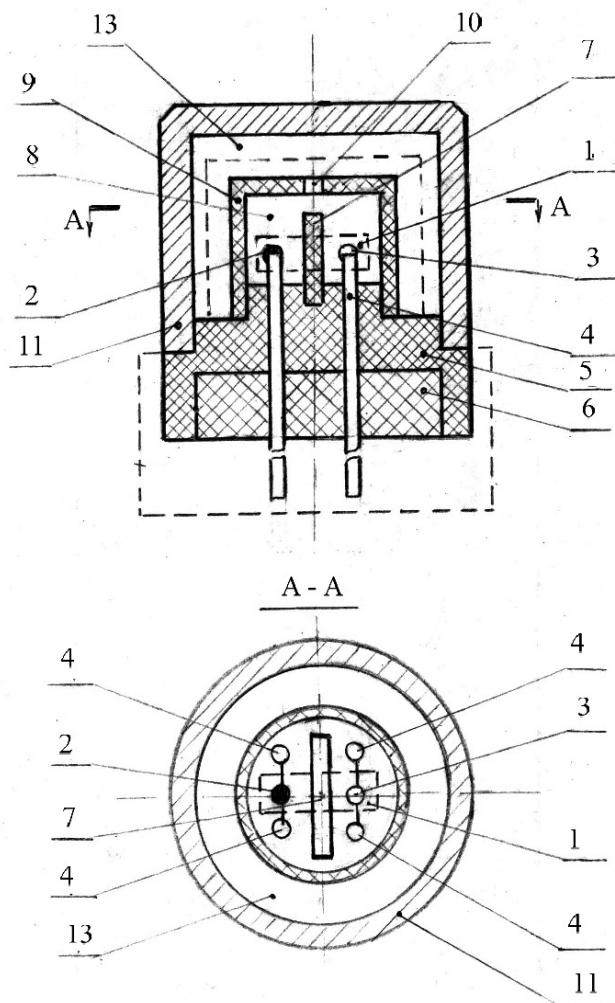


Рис. 1. Конструкция датчика с дополнительным газодиффузионным фильтром: 1 – чувствительные элементы; 2, 3 – каталитически активный и сравнительный элементы; 4 – стойки; 5 – основание; 6 – эпоксидный компаунд; 7 – экран; 8 – реакционная камера; 9 – полный стакан; 10 – калиброванное отверстие; 11 – фильтрэлемент; 13 – промежуточный объем

На рис. 2 изображены экспериментально снятые кривые переходных процессов в газоанализаторах с предложенными термокаталитическими датчиками (рис. 1). В первом датчике установлен чувствительный элемент, изготовленный по стандартной технологии, а во втором – специальный, с пониженной каталитической активностью (на поверхность чувствительного элемента термогруппы нанесено небольшое количество платиново-палладиевого катализатора). Размеры калиброванного отверстия для датчиков выбраны следующие: $l=0,5$ мм; $d=1,0$ мм; выходное напряжение измерительного моста с первым датчиком со-

ставляет 7,3 мВ/об.% CH₄, а со вторым – 4,8 мВ/об.% CH₄; концентрация метана при исследованиях C_м=1,03 об.%. Первоначально осуществлялась балансировка нуля измерительных мостов по методике, изложенной в работе [5], и регулировка чувствительности анализаторов. Как видно из рис. 2, до момента начала паузы (t=6 с) показания анализаторов являются одинаковыми, несмотря на разную каталитическую активность чувствительных элементов. Относительные величины амплитуд всплеска выходного напряжения после 20-секундной паузы (начало разогрева t=26 с) существенно отличаются, что позволяет достаточно эффективно выявить потерю каталитической активности термогруппы, наступившую вследствие отравления или иных причин.

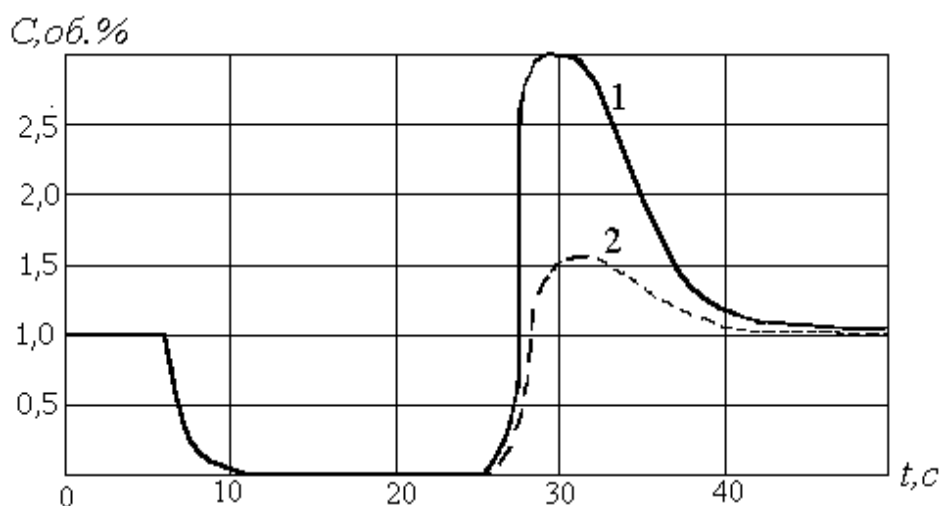


Рис. 2. Переходные процессы при диагностике серийных датчиков (1) и датчиков с пониженной каталитической активностью чувствительного элемента (2)

При одинаковых параметрах калиброванного отверстия, используя выражение (13), можно оценить различия в величинах эффективной диффузионной проводимости термоэлементов. Нормированное значение всплеска выходного напряжения моста после паузы для первого датчика составляет

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{\gamma_{\text{отв}} + \gamma_{\text{э1}}}{\gamma_{\text{отв}}} = 3,0, \quad (14)$$

а для второго

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{\gamma_{\text{отв}} + \gamma_{\text{э2}}}{\gamma_{\text{отв}}} = 1,6. \quad (15)$$

Откуда получим $\gamma_{\text{э1}} = 2,0\gamma_{\text{отв}}$ и $\gamma_{\text{э2}} = 0,6\gamma_{\text{отв}}$. Следовательно, каталитическая активность второго элемента в 3,5 раза ниже, чем первого $\gamma_{\text{э1}} = 3,5\gamma_{\text{э2}}$.

Аналогичная ситуация возникает и при нарушении целостности реакционной камеры, поскольку увеличение γ_o приводит к повышению установившейся концентрации метана в камере и снижает относительную скорость его поступления в камеру во время паузы и, соответственно, относительную величину амплитуды всплеска выходного напряжения.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при применении в стационарных анализаторах метана разработанных терموкаталитических датчиков с двойным диффузионным фильтром, путем анализа изменения относительного значения амплитуды всплеска выходного напряжения измерительного моста после паузы постоянной длительности, возможно осуществление автоматической диагностики одного из важнейших параметров терموкаталитических датчиков – чувствительности термогруппы.

Список литературы

1. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И., Биренберг И.Э. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
2. Голинько В.И., Котляров А.К., Белоножко В.В. Контроль взрывоопасности горных выработок шахт. – Днепропетровск: Наука и образование, 2004. – 207 с.
3. Голинько В.И., Белоножко В.В. Исследование процесса окисления метана в терموкаталитических датчиках / Науковий вісник НГУ. – 2003. – №7. – С. 62-65.
4. Пат. України 61224А, МК G01N25/22, E21F1/00. Спосіб вимірювання вмісту горючих газів в шахтній атмосфері та пристрій для його реалізації / В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько, А.К. Котляров та ін. // Відкриття. Винаходи. – 2003. – №11. – С. 77-78.
5. Патент України 62861А, МК G01N27/18. Схема включення терموкаталітичного датчика і спосіб її балансування / В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько, А.К. Котляров та ін. // Відкриття. Винаходи. – 2003. – №12. – С. 34-35.