

УДК 629.3.054.254

А.Г. Лыков (ассист.), А.Е. Кочин (канд. техн. наук, ассист.)
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра электронной техники
E-mail: lkv08@rambler.ru

УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В КОКСОВОМ ГАЗЕ

Проведена оценка влияния температуры, давления и наличия фоновых газов на результат измерения концентрации кислорода с помощью магнитного газоанализатора. Разработаны способы уменьшения дополнительной погрешности и структурная схема измерителя с улучшенными метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: магнитный газоанализатор, дополнительная погрешность, влияние, температура, давление, фоновые газы.

Актуальность и проблема. В качестве побочного продукта при производстве кокса выделяется коксовый газ, который после очистки используется для обогрева коксовых печей — обратный коксовый газ. Обратный коксовый газ имеет следующий качественный и количественный (в % по объёму) состав: водород H_2 — (55–60), метан CH_4 — (20–30), оксид углерода CO — (5–7), диоксид углерода CO_2 — (2–3), азот N_2 — (3.8–4), ненасыщенные углеводороды C_mH_n — (2–3), кислород O_2 — (0.4–1.0).

Обратный коксовый газ (далее просто коксовый газ) является токсичным и взрывоопасным, что обусловлено наличием в нем таких компонент как водород, метан и угарный газ. Кроме данных компонент коксовый газ также содержит незначительную часть кислорода, однако в процессе работы отопительной системы его концентрации может достигнуть критических значений (5–6 об%), что также может привести к возникновению взрывоопасной ситуации. В соответствии с правилами технической эксплуатации коксохимических предприятий содержание кислорода в коксовом газе не должно превышать 1 об% [1]. Возрастание концентрации кислорода может быть обусловлено попаданием кислорода в отопительную систему при проведении регламентных и ремонтных работ, а также наличием неисправностей в цехах очистки коксового газа.

Для повышения взрывобезопасности коксохимических предприятий целесообразно оснастить их автоматическими измерителями, определяющими концентрацию кислорода непосредственно в газопроводе. Однако наличие агрессивной среды и внешних факторов, влияющих на результат измерения, ухудшает метрологические характеристики существующих газоанализаторов.

Постановка задач исследований. Для улучшения метрологических характеристик измерителя концентрации кислорода в коксовом газе необходимо:

- оценить степень влияния параметров газовой среды на результат измерения концентрации кислорода;
- разработать способы уменьшения влияющих факторов;
- разработать структуру измерителя с улучшенными метрологическими характеристиками.

Решение задач и результаты исследований

Для контроля концентрации кислорода в газопроводе рекомендуется применять парамагнитный газоанализатор, достоинствами которого являются: способность измерять концентрацию кислорода в горючих смесях, долгий срок службы чувствительного элемента вне зависимости от типа газа, время отклика не более трех секунд, отсутствие движущихся час-

тей. Газоанализаторы данного типа сертифицированы на использование во взрывоопасных зонах [2].

Принцип работы газоанализатора основан на свойстве газообразного кислорода притягиваться к магниту. Это обусловлено тем, что все вещества являются в той или иной степени магнетиками, что объясняется наличием собственных магнитных моментов у атомов и их составных частей — электронов и ядер, а также наличием круговых молекулярных токов, образованных орбитальным движением электронов. Во внешнем магнитном поле вещество намагничивается за счет ориентации векторов магнитных моментов молекул и появления дополнительных молекулярных токов, индуцированных полем.

Объемная магнитная восприимчивость парамагнитных газов, к которым относится кислород, описывается выражением [3]:

$$\chi = \frac{C \cdot M \cdot P}{R \cdot T^2}, \quad (1)$$

где C — постоянная Кюри; M — молекулярная масса; P — давление; R — универсальная газовая постоянная; T — температура газа.

Магнитная восприимчивость смеси газов, не вступающих в химическое взаимодействие, равна сумме парциальных восприимчивостей отдельных ее компонент, то есть определяется по закону аддитивности:

$$\chi_{\text{см}} = \sum \chi_i \cdot q_i, \quad (2)$$

где χ_i и q_i — объемная магнитная восприимчивость и относительная объемная концентрация i -ого компонента.

При этом подавляющее большинство газов (фоновые газы) обладают малой по сравнению с кислородом магнитной восприимчивостью, что обеспечивает возможность избирательного определения концентрации кислорода в газовой смеси. Так, объемная магнитная восприимчивость газов, входящих в состав обратного коксового газа, при температуре 0 °С имеет следующие значения [4]: водород — (-0.164), метан — (-1.8), ненасыщенные углеводороды — 2 (усредненно); оксид углерода — (-0.194); диоксид углерода — (-0.84), азот — (-0.58), кислород — 146.

К недостаткам парамагнитных газоанализаторов можно отнести невысокую селективность при малых концентрациях кислорода за счет наличия фоновых газов, зависимость результата от температуры и давления газовой смеси. Конструктивные особенности датчиков, основанных на магнитном методе таковы, что вырабатываемый ими электрический сигнал зависит от положения в пространстве.

Эксплуатация газоанализаторов должна проводиться в следующих рабочих условиях [1]:

- температура обратного коксового газа в точке измерения от плюс 20 до плюс 30 °С;
- избыточное давление коксового газа в отопительной трубе от 5 до 7 кПа;
- атмосферное давление от 87,8 до 119,7 кПа;
- относительная влажность окружающего воздуха до 80 %.

Технические характеристики и параметры магнитного газоанализатора настраиваются в номинальных условиях эксплуатации:

- температура (20÷25)°С;
- атмосферное давление (101,1±3,3) кПа;
- относительная влажность, окружающего воздуха (30 – 80) %;
- состав и параметры анализируемого газа должны соответствовать номинальным значениям и допустимым отклонениям.

В работе проведена оценка влияния температуры, давления и фоновых газов на результат измерения концентрации кислорода с помощью магнитного газоанализатора. Магнитные газоанализаторы используются, как правило, для определения относительного объ-

емного содержания кислорода в газовых смесях. Поскольку фактически замеряется косвенный параметр — магнитные свойства смеси, то независимо от схемы и конструктивного исполнения прибора могут возникнуть погрешности, определяемые неоднозначностью функциональной связи между фактически замеряемой и искомой величинами [4]. Эта функциональная связь определяется формулой (1), из которой видно, что замеряемая величина — объемная магнитная восприимчивость газовой смеси — зависит от температуры и давления.

Объемная магнитная восприимчивость коксового газа $\chi_{см}$ приводится к стандартным условиям ($T_0 = 298 \text{ °K}$ и $P_{0\text{труб}} = 108.3 \text{ кПа}$) по соотношению:

$$\chi_{см} = \chi_{см0} \cdot \frac{P_{\text{труб}} \cdot T_0^2}{P_{0\text{труб}} \cdot T^2}, \quad (3)$$

где $\chi_{см0}$ — истинное значение объемной магнитной восприимчивости коксового газа; T и $P_{\text{труб}}$ — абсолютная температура и давление газовой смеси в трубе.

Погрешность, вызываемая изменением температуры, может быть найдена дифференцированием выражения (3):

$$d\chi_{см} \Big|_{P_{\text{труб}}=\text{const}} = \frac{d\chi_{см}}{dT} dT = -q_{O_2} \cdot \chi_{O_2} \cdot \frac{T_0^2}{P_{0\text{труб}}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{труб}}}{T^3} \cdot dT. \quad (4)$$

где q_{O_2} — концентрация кислорода, χ_{O_2} — объемная магнитная восприимчивость кислорода.

Замена бесконечно малых приращений конечными и деление на $\chi_{см}$, дает относительную погрешность:

$$\frac{\Delta\chi_{см}}{\chi_{см}} \Big|_{P_{\text{труб}}=P_{0\text{труб}}} = -\frac{2 \cdot T_0^2}{T^3} \cdot \Delta T = -\frac{2 \cdot (273 + 25)^2 \cdot 100\%}{(273 + 30)^3} \cdot \Delta T = -0.62\% \cdot \Delta T.$$

Таким образом, при допустимом диапазоне изменения температуры коксового газа 5 °C относительная погрешность измерения объемной магнитной восприимчивости составляет 3.1% .

Погрешность, вызываемая изменением давления, также определяется дифференцированием выражения (3):

$$d\chi_{см} \Big|_{T=\text{const}} = \frac{d\chi_{см}}{dP} dP = q_{O_2} \cdot \chi_{O_2} \cdot \frac{T_0^2}{P_{0\text{труб}}} \cdot \frac{dP}{T^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\chi_{см}}{\chi_{см}} \Big|_{T=T_0} = \frac{1}{P_{0\text{труб}}} \cdot \Delta P = \frac{100\%}{108.3} \cdot \Delta P = 0.92 \frac{\%}{\text{кПа}} \cdot \Delta P.$$

Из полученного выражения следует, что изменение давления дает пропорциональную ему погрешность. Другими словами, показания прибора определяются парциальным давлением кислорода в коксовом газе. Таким образом, при допустимом диапазоне изменения атмосферного давления 18.4 кПа и поддержании избыточного давления в трубе на постоянном уровне относительная погрешность измерения объемной магнитной восприимчивости составляет 16.9% .

Результат измерения, полученный с помощью магнитного газоанализатора, зависит от магнитных свойств всех, входящих в коксовый газ, компонент. Выражение (2) может быть представлено в виде:

$$\chi_{см} = q_{O_2} \cdot \chi_{O_2} + \sum q_i \cdot \chi_{нi} = q_{O_2} \cdot \chi_{O_2} + (1 - q_{O_2}) \cdot \chi_{н}, \quad (6)$$

где $\chi_{н}$ — объемная магнитная восприимчивость неокислородной части коксового газа.

Выражение (6) может быть переписано в более удобной форме [4]:

$$\frac{\chi_{\text{см}}}{\chi_{\text{O}_2}} = q_{\text{O}_2} + (1 - q_{\text{O}_2}) \cdot \eta, \quad (7)$$

где $\chi_{\text{см}}/\chi_{\text{O}_2}$ — относительная магнитная восприимчивость коксового газа (величина, фактически замеряемая магнитным газоанализатором); $\eta = \chi_{\text{H}}/\chi_{\text{O}_2}$ — поправка на магнитные свойства неокислородной части.

Из выражения (7) следует, что влияние магнитных свойств неокислородной части коксового газа на точность измерения тем значительнее, тем меньше измеряемые концентрации кислорода.

Для определения влияния фоновых газов на результат измерения концентрации кислорода следует воспользоваться количественным составом и значениями объемной магнитной восприимчивости составляющих коксового газа. Объемная магнитная восприимчивость коксового газа, содержащего кислород в концентрации 0.4 об% (минимально возможное значение), без учета влияния фоновых газов, составляет:

$$\chi_{\text{см по O}_2} = q_{\text{O}_2} \cdot \chi_{\text{O}_2} = 0.004 \cdot 146 = 0.584.$$

С учетом влияния фоновых газов объемная магнитная восприимчивость коксового газа составляет:

$$\begin{aligned} \chi_{\text{см}} = & q_{\text{O}_2} \cdot \chi_{\text{O}_2} + q_{\text{H}_2} \cdot \chi_{\text{H}_2} + q_{\text{CH}_4} \cdot \chi_{\text{CH}_4} + q_{\text{CO}} \cdot \chi_{\text{CO}} + q_{\text{CO}_2} \cdot \chi_{\text{CO}_2} + \\ & + q_{\text{N}_2} \cdot \chi_{\text{N}_2} + q_{\text{CmHn}} \cdot \chi_{\text{CmHn}} = 0.537. \end{aligned}$$

Следовательно, относительная погрешность определения концентрации кислорода за счет влияния фоновых газов может достигать 8%.

Из проведенного анализа влияющих факторов, следует, что составляющие дополнительной относительной погрешности магнитных газоанализаторов по температуре, давлению и фоновым газам при работе с коксовым газом в (3-17) раз превышает основную относительную погрешность равную 1%. При этом требуемое значение дополнительной погрешности составляет не более 50% от основной погрешности.

Для уменьшения влияния температуры и давления на результат измерения концентрации кислорода предложено использовать следующие способы:

- применять термостатирование газовой смеси либо чувствительного элемента измерителя и поддерживать давление газовой смеси на постоянном уровне;
- установить закон изменения объемной магнитной восприимчивости коксового газа от изменения температуры и давления и вносить поправки в результат измерения при отклонении температуры и давления от номинальных значений.

Осуществление первого способа производится введением в состав измерителя системы пробоподготовки, что существенно удорожает измеритель. Применение второго способа, основанного на дополнительном измерении температуры и давления коксового газа, является наиболее рациональным. Поскольку относительные изменения температуры и давления невелики, то можно применить линейную аппроксимацию для компенсации влияния температуры и давления на результат измерения концентрации кислорода с помощью магнитного газоанализатора. Тогда искомое значение объемной магнитной восприимчивости может быть найдено из выражения:

$$\chi_{\text{см0}_1} = \chi_{\text{смИ}} + 0.0062 \cdot \Delta T \cdot \chi_{\text{смИ}} - 0.0092 \cdot \Delta P \cdot \chi_{\text{смИ}}. \quad (8)$$

где $\chi_{\text{смИ}}$ — измеренное значение объемной магнитной восприимчивости коксового газа.

Для уменьшения влияния фоновых газов на результат измерения концентрации кислорода предложено использовать следующие способы:

- измерять концентрации фоновых газов и вносить поправки в результат измерения;
- вносить фиксированную поправку в результат измерения при незначительных изменениях концентраций фоновых газов относительно средних значений.

Осуществление первого способа производится введением в состав измерителя дополнительных каналов и существенному его удорожанию. Применительно к коксовому газу второй способ является предпочтительным, поскольку концентрации фоновых газов остаются практически стабильными и, как правило, изменяются только при применении другого типа сырья. Тогда искомое значение объемной магнитной восприимчивости может быть найдено из выражения:

$$\chi_{\text{см}0_2} = k \cdot \chi_{\text{смИ}} = (1.0 \div 1.09) \cdot \chi_{\text{смИ}}, \quad (9)$$

где k — коэффициент влияния фоновых газов, зависящий от типа применяемого сырья и концентрации кислорода.

Таким образом, истинное значение объемной магнитной восприимчивости коксового газа, а соответственно и концентрации кислорода, будет определяться выражением:

$$\chi_{\text{см}0} = \chi_{\text{см}0_1} + \chi_{\text{см}0_2} = \chi_{\text{смИ}} + 0.0062 \cdot \Delta T \cdot \chi_{\text{смИ}} - 0.0092 \cdot \Delta P \cdot \chi_{\text{смИ}} + k \cdot \chi_{\text{смИ}}, \quad (10)$$

$$q = \frac{\chi_{\text{смИ}} + 0.0062 \cdot \Delta T \cdot \chi_{\text{смИ}} - 0.0092 \cdot \Delta P \cdot \chi_{\text{смИ}} + k \cdot \chi_{\text{смИ}}}{\chi_{\text{O}_2}}.$$

Предложенная укрупненная структурная схема измерителя концентрации кислорода в коксовом газе с улучшенными метрологическими характеристиками представлена на рисунке 1.

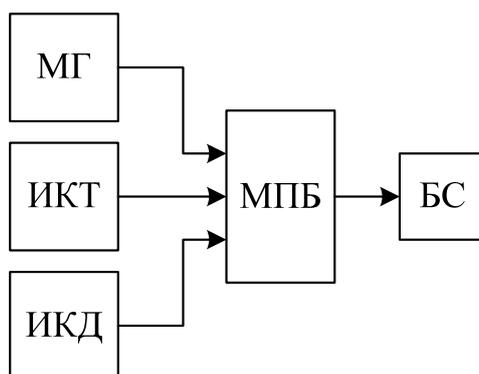


Рисунок 1 — Укрупненная структурная схема измерителя концентрации кислорода с улучшенными метрологическими характеристиками
(МГ — магнитный газоанализатор, ИКТ — измерительный канал температуры, ИКД — измерительный канал давления, МПБ — микропроцессорный блок, БС — блок связи)

Предлагаемый алгоритм работы микропроцессорного блока измерителя концентрации кислорода включает в себя следующие операции:

- измерение объемной магнитной восприимчивости коксового газа — $\chi_{\text{смИ}}$;
- измерение температуры и давления коксового газа — T и P ;
- расчет поправок по температуре и давлению (при отклонении параметров от номинальных значений — ΔT и ΔP);
- расчет поправки по фоновым газам (зависит от типа сырья и концентрации кислорода);
- расчет истинного значения объемной магнитной восприимчивости кислорода в коксовом газе — $\chi_{\text{см}0}$;
- определение концентрации кислорода в коксовом газе — q ;
- обмен данными через блок связи с химической лабораторией предприятия;
- повторение измерений через заданный интервал времени.

Требования к дополнительным измерительным каналам:

- значение абсолютной погрешности измерения температуры — не более $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- значение относительной погрешности измерения давления — не более 1% .

Использование магнитного газоанализатора с измерительными каналами температуры и давления позволяют уменьшить дополнительную относительную погрешность измерителя концентрации кислорода в коксовом газе до значений менее 0.3%.

Выводы

1. Проведена оценка влияния температуры, давления и наличия фоновых газов на результат измерения концентрации кислорода с помощью магнитного газоанализатора. Полученные значения составляющих дополнительной погрешности существенно превышают основную погрешность (в (3-17) раз), что недопустимо.

2. Разработаны способы уменьшения дополнительной погрешности магнитного газоанализатора, предложены структурная схема и алгоритм работы измерителя концентрации кислорода в коксовом газе с улучшенными метрологическими характеристиками. Дополнительная относительная погрешность предложенного измерителя составляет менее 0.3% при основной относительной погрешности 1%.

Список использованной литературы

1. Правила технической эксплуатации коксохимических предприятий / под ред. В.П. Сидогина. — Харьков, 2001. — 310 с.
2. Yokogawa: Парамагнитный анализатор кислорода в газах MG8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.yokogawa.ru/analysisgas>. — Дата доступа: май 2011. — Загл. с экрана.
3. Измерительная техника: Газоанализатор. Магнитные газоанализаторы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika>. — Дата доступа: декабрь 2011. — Загл. с экрана.
4. Агейкин Д.И. Магнитные газоанализаторы/ Д.И. Агейкин. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963 — 216 с.

Надійшла до редакції:
16.02.2012 р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

A.G. Lykov, A.E. Kochin. Improvement of metrologistics characteristics of oxygen concentration measuring device for coke gas. Influencing of temperature, pressure and background gases presence on the results of oxygen concentration measuring by magnetic gasanalyser are estimated. The methods of additional error reducing and flow diagram of measuring device with improved metrologistics characteristics are developed.

Keywords: a magnetic gasanalyser, an additional error, influencing, temperature, pressure, background gases.

О.Г. Лыков, О.Е. Кочин. Поліпшення метрологічних характеристик вимірювача концентрації кисню в коксівному газі. Проведена оцінка впливу температури, тиску і наявності фонових газів на результат вимірювання концентрації кисню за допомогою магнітного газоаналізатора. Розроблені способи зменшення додаткової похибки та структурна схема вимірювача з поліпшеними метрологічними характеристиками.

Ключові слова: магнітний газоаналізатор, додаткова похибка, вплив, температура, тиск, фонові газу.

© Лыков А.Г., Кочин А.Е., 2012