

УДК 543.272.108

Й. І. Стенцель, д. т. н., проф.;

В. В. Стенцель, студ.;

О. Б. Целіщев, к. т. н.

## ВИЗНАЧЕННЯ КИСНЮ В СКЛАДНИХ ГАЗОВИХ СУМІШАХ ТЕРМОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ ЗА «РОТОРНИМ» ПРИНЦИПОМ

*Описано результати теоретичних досліджень термомагнітного газоаналізатора з «роторним» ефектом. Показано, що у разі відповідного конструктивного його виконання, використовуючи тільки «роторний» ефект в термомагнітному полі, можна будувати прилади, які мають абсолютно лінійну статичну характеристику, практично не чутливі до зміни температури газу, барометричного тиску, напруги живлення і напруженості магнітного поля. Такі газоаналізатори відрізняються високою точністю і на цьому принципі можна будувати зразкові прилади.*

### Вступ

Термомагнітні газоаналізатори (ТМГ) призначені для вимірювання концентрації кисню в хімічній, теплоенергетичній, нафтопереробній та інших галузях промисловості. Вони мають певні недоліки, які ускладнюють їх широке використання для наукових досліджень і в промисловості. У статті пропонується новий метод вимірювання кисню в складних газових сумішах на основі «роторного» ефекту, дається його теоретичне обґрунтування і показані напрямки побудови газоаналізатора з високими метрологічними характеристиками.

Сучасні ТМГ мають суттєві недоліки, серед яких: нелінійність статичної характеристики, залежності від зміни температури навколишнього середовища, атмосферного тиску, складу неокисневої частини аналізованої газової суміші, напруженості магнітного поля, просторового розташування тощо. Це приводить до необхідності використання спеціальних термостатів, пристроїв стабілізації тиску газової суміші та інших, що значно збільшує їх вагу, вартість, складність в експлуатації, енергоємність, а основне, значно зменшує точність вимірювання, надійність та область використання.

### Аналітично-експериментальна частина

Конструктивно ТМГ складаються з системи постійних магнітів 3 (рис.), між якими розташований один термоанемометр  $A$ . Термоанемометр являє собою скляну трубку 1 з намотаною поверх неї платиною спіраллю 4, яка одночасно служить нагрівачем і вимірювальним перетворювачем витрати  $F$  аналізованої газової суміші, яка протікає в трубці термоанемометра під дією неоднорідного термомагнітного поля. Нагрівач двосекційний, секції якого є плечима мостової електричної вимірювальної схеми. Вихідна напруга  $U_{рвих}$  електричного моста 5 є мірою концентрації кисню в газовій суміші. На рис. 1 показана схема термомагнітного газоаналізатора з двома термоанемометрами  $A$  і  $B$ . У термоанемометрі  $B$  в області максимального термомагнітного поля розташована хрестоподібна перегородка 2, яка призначена для зменшення впливу на результат вимірювання «роторного» ефекту.

Як показано в [1], в області максимального термомагнітного поля виникає так званий «роторний» ефект, який зумовлений неокисневою частиною газової суміші. Рушійною силою цього ефекту є концентрація кисню, який має парамагнітні властивості, тобто здатний втягуватися в неоднорідне магнітне поле. Вперше явище «роторного» ефекту використано для побудови уніфікованого термомагнітного газоаналізатора з практично лінійною статичною характеристикою в діапазоні

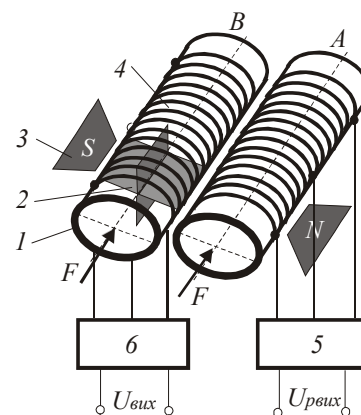


Схема термомагнітного  
газоаналізатора з двома  
термоанемометрами

від 0 до 100 % кисню, вдвічі вищою чутливістю, меншими похибками вимірювання [2]. Це дало можливість будувати багатодіапазонні прилади, з такими уніфікованими параметрами як напруженість магнітного поля та напругою живлення нагрівача. Але такий ТМГ має відповідні недоліки до яких відносяться: не абсолютна лінійність градувальних характеристик, необхідність термостатування для зменшення температурної похибки, використання стабілізатора абсолютного тиску газової суміші, значна залежність від зміни складу неокисневої частини аналізованої газової суміші та інші. Основна наведена похибка такого газоаналізатора достатньо велика (до 2,5 % від діапазону вимірювання), прилад має значні похибки, викликані зміною температури навколишнього середовища, атмосферного тиску тощо.

Важливою проблемою в разі експлуатації ТМГ на виробництві є практична відсутність стаціонарних і переносних зразкових приладів для перевірки робочих ТМГ. Тому метою роботи є розробка високоточного універсального термомагнітного газоаналізатора з абсолютно лінійними градувальними характеристиками в діапазоні вимірювання концентрацій кисню від 0 до 100 %, незначними додатковими похибками вимірювання, малою вагою, вартістю, енергоємністю і здатного визначати вміст кисню в складних технологічних газових сумішах.

Вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$  ТМГ з «роторним» ефектом (термоанемометр А) можна визначити за формулою

$$U_{\rho_{\text{вих}}} = 0,93 \cdot 10^{-4} U_0 \frac{D^4 \theta_0^2 T_0 \rho H_{\text{max}}^2 \Pi}{a \rho_0 L_1 L_T \eta_C} Q \nu_0 \frac{2 T_0 \bar{T}}{T_1 T_2} \left[ 1 + (1 - Q)^2 \frac{\eta_k}{\eta_H} \frac{\rho_{1H} \rho_{2H}}{\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H} \right], \quad (1)$$

де  $D$  — внутрішній діаметр трубки термоанемометра;  $\theta_0 = T_2 - T_1$ ;  $T_1, T_2$  — температура нагріву термоанемометра та навколишнього повітря відповідно;  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ;  $\rho_0 = 101,325 \text{ кПа}$ ;  $\rho$  — поточне значення атмосферного тиску;  $H_{\text{max}}$  — максимальна напруженість магнітного поля;  $a = \lambda / c_p \rho$  — коефіцієнт температуропровідності газу;  $\lambda, c_p, \rho$  — коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина газової суміші;  $L_1, L_T$  — довжина трубки термоанемометра, яка знаходиться в області максимального термомагнітного поля, і повна його довжина відповідно;  $\eta_k$  — в'язкість кисню;  $Q$  — відносна концентрація кисню в газовій суміші;  $\nu_0$  — магнітна сприйнятливність кисню при  $T_0$  і  $\rho_0$ ;  $\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$ ;  $\eta_H$  — в'язкість неокисневої частини газової суміші;  $\rho_{1H}, \rho_{2H}$  — густина неокисневої частини газу при температурі  $T_1$  і  $T_2$  відповідно;  $\bar{\rho}_k, \bar{\rho}_H$  — середня густина кисню та її неокисневої частини відповідно;

$$\Pi = \frac{\beta R_d [1 + \beta(T_1 - T_0)]}{2 [1 + \beta(T_2 - T_0)]^2 \{2 R_d + R + [1 + \beta(T_2 - T_0)]\}} \times \left[ 1 + \frac{\beta \theta_0 \{2 R_d + R + R_0 [1 + \beta(T_2 - T_0)]\}}{(2 R_d + R) [1 + \beta(T_1 - T_0)] + R_0 [1 + \beta(T_2 - T_0)] [1 + \beta(2 T_2 - T_1 - T_0)]} \right].$$

Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  ТМГ без «роторного» ефекту (термоанемометр В) дорівнює

$$U_{\text{вих}} = 0,93 \cdot 10^{-4} Q \nu_0 U_0 \frac{D^4 \theta_0^2 T_0 \rho H_{\text{max}}^2 \Pi}{a \rho_0 L_1 L_T \eta_C} \frac{2 T_0 \bar{T}}{T_1 T_2}. \quad (2)$$

З рівняння (2) видно, що у разі відсутності «роторного» ефекту вихідна напруга ТМГ пропорційна концентрації кисню в газовій суміші, а значить його статична характеристика є лінійною незалежно від концентрації кисню в газовій суміші.

Відношення вихідних напруг  $U_{\rho_{\text{вих}}}$  і  $U_{\text{вих}}$  визначає кінетичну дію кисню в максимальному неоднорідному термомагнітному полі. Позначимо  $K = U_{\rho_{\text{вих}}} / U_{\text{вих}}$ . Тоді з рівнянь (1) і (2) маємо

$$K = 1 + (1 - Q)^2 \frac{\eta_k}{\eta_H} \frac{\rho_{1H} \rho_{2H}}{\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H}. \quad (3)$$

З рівняння (3) знайдемо концентрацію кисню

$$Q = 1 - \sqrt{(K-1) \frac{\eta_H}{\eta_k} \frac{\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H}{\rho_{1H} \rho_{2H}}} \tag{4}$$

Рівняння (4) запишемо в такій формі

$$Q = 1 - \sqrt{\frac{(U_{pвих} - U_{вих})}{U_{вих}}} \sqrt{\frac{\eta_H}{\eta_k} \frac{\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H}{\rho_{1H} \rho_{2H}}} \tag{5}$$

Рівняння (5) є математичною моделлю, яка описує принцип роботи газоаналізатора, в якому вимірювання концентрації кисню здійснюється опосередовано, використовуючи явище «роторного» ефекту. З рівняння (5) не важко зробити висновок, що множник  $\sqrt{(U_{pвих} - U_{вих})/U_{вих}}$  не залежить від зміни таких основних параметрів як: напруги живлення мостової вимірювальної електричної схеми, напруженості магнітного поля, коефіцієнта температуропровідності, зміни атмосферного тиску, геометричних розмірів трубки термоанометра, електричних параметрів мостової вимірювальної схеми, температури нагріву термоанометра та навколишнього середовища. Другий множник у рівнянні (5)  $\sqrt{(\eta_H/\eta_k) (\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H/\rho_{1H} \rho_{2H})}$  не залежить від зміни атмосферного тиску, мало залежить від зміни температури нагрівання термоанометра та навколишнього повітря, а також складу неокисневої частини контрольованої газової суміші.

Позначимо множник  $k_C = \sqrt{(\eta_H/\eta_k) (\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H/\rho_{1H} \rho_{2H})}$  і покажемо як він залежить від температури. Згідно з рівнянням Сатерленда [3] в'язкість газу  $\eta = \eta_0 \left(\frac{T_2}{T_0}\right)^{3/2} \frac{(T_0 + C_\eta)}{(T_2 + C_\eta)}$ , де  $\eta_0$  — в'язкість газу при температурі  $T_0$ ,  $C_\eta$  — стала Сатерленда. Густина газу  $\rho = \frac{pM}{848zT}$ , де  $p$  — атмосферний тиск;  $M$  — молекулярна вага газу;  $z$  — стала;  $T$  — температура. Тоді маємо:

$$k_C = \sqrt{\frac{\eta_{0H}}{\eta_{0k}} \frac{(T_0 + C_{\eta H})(T_2 + C_{\eta k})}{(T_2 + C_{\eta H})(T_0 + C_{\eta k})}} \sqrt{\frac{\bar{M}_k \bar{M}_H}{M_{1H} M_{2H}}}$$

Враховуючи, що молекулярна вага газу не залежить від температури, одержуємо

$$k_C = \sqrt{\frac{\eta_{0H}}{\eta_{0k}} \frac{(T_0 + C_{\eta H})(T_2 + C_{\eta k})}{(T_2 + C_{\eta H})(T_0 + C_{\eta k})}} \sqrt{\frac{M_k}{M_H}} \tag{6}$$

Оскільки для більшості газів коефіцієнти Сатерленда відрізняються між собою несуттєво, то відношення  $k_T = \sqrt{\frac{(T_0 + C_{\eta H})(T_2 + C_{\eta k})}{(T_2 + C_{\eta H})(T_0 + C_{\eta k})}}$  практично залишається постійним. З врахуванням цього рівняння (6) можна записати таким чином

$$k_C = \sqrt{k_T \frac{\eta_{0H}}{\eta_{0k}} \frac{M_k}{M_H}} \tag{7}$$

У виробничій практиці завжди відомий склад аналізованої газової суміші, і тому для кожної з них можна розрахувати коефіцієнт  $k_C$  за формулою (7). Таким чином, для певної газової суміші коефіцієнт  $k_C$  є сталою величиною. Враховуючи вищевказане, рівняння (5) приймає таку форму

$$Q = 1 - k_C \sqrt{\frac{(U_{pвих} - U_{вих})}{U_{вих}}} \tag{8}$$

Оскільки напруги  $U_{pвих}$  і  $U_{вих}$  можна вимірювати, то рівняння (8) є основою для побудови термомагнітного газоаналізатора з лінійною статичною характеристикою, який практично не залежить від зміни напруги живлення вимірювальної електричної мостової схеми, напруженості магнітного поля, температуропровідності контрольованої газової суміші та температури навколишнього середовища.

### Висновки

Використано «роторний ефект» у неоднорідному термомагнітному полі для розробки нового принципу побудови газоаналізатора контролю кисню в багатокомпонентних газових сумішах. Виконані теоретичні дослідження методу вимірювання концентрації кисню за «роторним» принципом і показана можливість розробки автоматичного газоаналізатора з лінійною статичною характеристикою, який не залежить від таких основних параметрів як напруга живлення, напруженості магнітного поля, зміни атмосферного тиску, теплофізичних параметрів газової суміші, а також мало залежить від зміни температури навколишнього повітря. Це дає можливість розробляти зразкові переносні та стаціонарні прилади контролю кисню в багатокомпонентних газових сумішах, а також промислові багатодіапазонні прилади з високими метрологічними характеристиками, які відрізняються малою вартістю, вагою та габаритами, високою надійністю і точністю. Такі газоаналізатори можуть бути використані в хімічній, нафтохімічній, біохімічній, теплоенергетичній, металургійній промисловості, а також в медицині та в космічній галузі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стенцель Й. І., Целіщев О. Б., Єлісєєв П. Й. Теплофізичні моделі перетворень в термомагнітному полі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2003. — № 1. — С. 26—29.
2. Целіщев О. Б. Математична модель термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2003. — № 2. — С. 69—72.
3. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. — Л.: Государственное науч. техн. изд-во хим. литературы. — 1961. — 819 с.

Рекомендована кафедрою хімії та екологічної безпеки

Надійшла до редакції 16.02.05  
Рекомендована до друку 18.03.05

**Стенцель Йосип Іванович** — завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів.

**Стенцель Віктор Володимирович** — студент.

**Целіщев Олексій Борисович** — старший викладач кафедри автоматизації технологічних процесів.

Севєродонецький технологічний інститут