

УДК 543.272.108

**ВИЗНАЧЕННЯ КИСНЮ В СКЛАДНИХ ГАЗОВИХ СУМІШАХ  
ТЕРМОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ ЗА «РОТОРНИМ» ПРИНЦИПОМ****Кхалед Аквіре, Целіщев О.Б., Лорія М.Г., Целіщев Є.Б.****ITS DEVAIS OXYGEN WITH GAS MIXTURE THERMOMAGNETICAL  
METHOD WITH "ROTOR" PRINSIPAL****Khaled Akvire, Tselithhev A.B., Loriya M.G., Tselithhev E.B.**

Важливою проблемою при 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 здатними визначати вміст кисню в складних технологічних 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 мостових електричних схем, напруженості магнітного поля, зміни атмосферного тиску, теплофізичних параметрів газової суміші, а також незначною залежністю від зміни температури навколишнього повітря. Це дає можливість розробляти зразкові переносні та стаціонарні прилади контролю кисню в багатоконпонентних газових сумішах, а також промислових багатодіапазонних приладів з високими метрологічними характеристиками, які відрізняються малою вагою та габаритами, високою надійністю, точністю і вартістю.

**Ключові слова:** кисень, термомагнітний метод, "роторний" ефект, термоанемометр.

**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 некісневої частини аналізуючої 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.

**Основна частина.** Конструктивно ТМГ складаються з системи постійних магнітів 3 (див. рис.), між якими розташований один термоанемометр *A*. Термоанемометр являє собою скляну трубку 1 з намотаною поверх неї платиновою спіраллю 4, яка одночасно служить нагрівачем і вимірювальним перетворювачем витрати *F* аналізуючої газової суміші, котра протікає в трубці термоанемометра під дією неоднорідного термомагнітного поля. Нагрівач двохсекційний, секції якого є плечами мостової електричної вимірювальної схеми. Вихідна напруга  $U_{рвви}$  електричного моста 5 є мірою концентрації кисню в газовій суміші. На рис. 1 показана схема термомагнітного газоаналізатора з двома термоанемометрами *A* і *B* і двома вимірювальними електричними мостами 5 і 6. У термоанемометрі *B* в області максимального термомагнітного поля розташована хрестоподібна перегородка 2, яка призначена для зменшення впливу на результат вимірювання "роторного" ефекту.

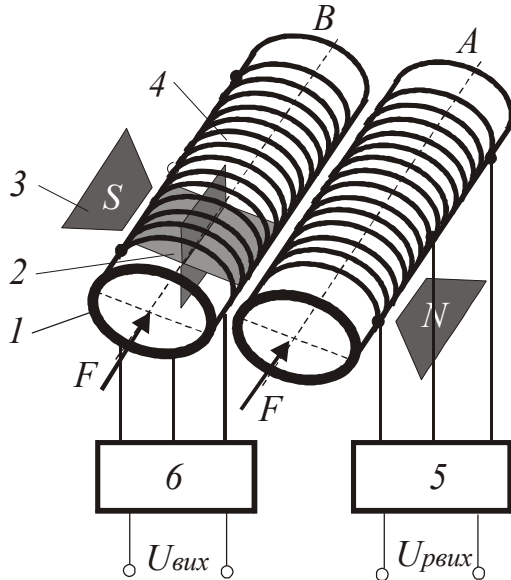


Рис. Схема термомагнітного газоаналізатора з двома термоанемометрами

Як показано в [1], в області максимального термомагнітного поля виникає так званий “роторний” ефект, який обумовлений некисневою частиною газової суміші. Рушійною силою цього ефекту є концентрація кисню, який володіє парамагнітними властивостями, тобто здатний втягуватися в неоднорідне магнітне поле. Вперше явище “роторного” ефекту використано для побудови уніфікованого термомагнітного газоаналізатора з практично лінійною статичною характеристикою в діапазоні 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 некисневої частини аналізуючої газової суміші та інші. Основна приведена 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 при 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 здатними визначати вміст кисню в складних технологічних газових сумішах.

Вихідну напругу  $U_{вих}$  ТМГ з “роторним” ефектом (термоанемометр А) можна визначити за формулою

$$U_{рвих} = 0,93 \cdot 10^{-4} U_0 \frac{D^4 \theta_0^2 T_0 p H_{\max}^2 \Pi}{a p_0 L_1 L_T \eta_C} \cdot Q v_0 \frac{2 T_0 \bar{T}}{T_1 T_2} \left[ 1 + (1 - Q)^2 \frac{\eta_k}{\eta_H} \cdot \frac{\rho_{1H} \rho_{2H}}{\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H} \right], \quad (1)$$

де  $D$  - внутрішній діаметр трубки термоанемометра;  $\theta_0 = T_2 - T_1$ ;  $T_1, T_2$  - температура нагріву термоанемометра та навколишнього повітря відповідно;  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ;  $p_0 = 101,325 \text{ кПа}$ ;  $p$  - поточне значення атмосферного тиску;  $H_{\max}$  - максимальна напруженість магнітного поля;  $a = \lambda / c_p \rho$  - коефіцієнт температуро-провідності газу;  $\lambda, c_p, \rho$  - коефіцієнт тепло-провідності, 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;  $v_0$  - магнітна сприйнятливості кисню при  $T_0$  і  $p_0$ ;  $\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$ ;  $\eta_H$  - в'язкість некисневої частини газової суміші;  $\rho_{1H}, \rho_{2H}$  - густина некисневої частини газу при температурі  $T_1$  і  $T_2$  відповідно;  $\bar{\rho}_k, \bar{\rho}_H$  - середня густина кисню та її некисневої частини відповідно.

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

Вихідна напруга  $U_{вих}$  ТМГ без “роторного” ефекту (термоанемометр  $B$ ) дорівнює

$$U_{вих} = 0,93 \cdot 10^{-4} Q \nu_0 U_0 \frac{D^4 \theta_0^2 T_0 p H_{max}^2 \Pi 2 T_0 \bar{T}}{a p_0 L_1 L_T \eta_C T_1 T_2} \quad (2)$$

З рівняння (2) видно, що при 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  $U_{рвих}$  і  $U_{вих}$  являє собою кінетичну дію кисню в максимальному неоднорідному термомагнітному полі. Позначимо  $K = U_{рвих} / U_{вих}$ . Тоді з рівнянь (1) і (2) маємо

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

З рівняння (3) знайдемо концентрацію кисню

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

Рівняння (4) запишемо в такій формі

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

Рівняння (5) являє собою математичну модель, яка описує принцип роботи газоаналізатора, в якому вимірювання концентрації кисню здійснюється посереднім способом, використовуючи явище “роторного” ефекту. З рівняння (5) не важко зробити висновок, що множник  $\sqrt{(U_{рвих} - U_{вих}) / U_{вих}}$  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 термоанемометра, електричних параметрів мостової вимірювальної схеми, температури нагріву термоанемометра та навколишнього середовища. Другий множник у рівнянні (5)  $\sqrt{(\eta_H / \eta_k) \cdot (\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H / \rho_{1H} \rho_{2H})}$  не залежить від зміни атмосферного тиску, мало залежить від зміни температури нагріву термоанемометра та навколишнього повітря, а також складу неокисневої частини вимірювальної газової суміші.

Позначимо множник  $k_C = \sqrt{(\eta_H / \eta_k) \cdot (\bar{\rho}_k \bar{\rho}_H / \rho_{1H} \rho_{2H})}$  і покажемо як він залежить від температури. Згідно з рівнянням Сатерленда [3] в'язкість газу

$$\eta = \eta_0 \left( \frac{T_2}{T_0} \right)^{3/2} \frac{(T_0 + C_\eta)}{(T_2 + C_\eta)}, \text{ де } \eta_0 - \text{в'язкість газу}$$

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:

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

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

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

Так як для більшості газів коефіцієнти Сатерленда відрізняються між собою незначно, 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 урахуванням цього рівняння (6) можна записати таким чином

$$k_C = \sqrt{k_T \frac{\eta_{0H}}{\eta_{0k}} \cdot \frac{M_k}{M_H}} \quad (7)$$

Так як у промисловій практиці завжди відомий склад аналізуючої газової суміші, то 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 сказане, рівняння (5) приймає наступну форму

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

Так як напруги  $U_{рвих}$  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 аналізуючої 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 мостових електричних схем, напруженості магнітного поля, зміни атмосферного тиску, теплофізичних параметрів газової суміші, а також незначною залежністю від зміни температури навколишнього повітря. Це дає можливість розробляти зразкові переносні та стаціонарні прилади контролю кисню в багатокомпонентних газових сумішах, а також промислових багатодіапазонних приладів з високими метрологічними характеристиками, які відрізняються малою вагою та габаритами, високою надійністю, точністю і вартістю.

#### Література

1. Стенцель Й.І., Целищев О.Б., Єлісєєв П.Й. Теплофізичні моделі перетворень в термомагнітному полі //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –2003. -№1. С. 26-29.
2. Целищев 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. – С. 819.

#### References

1. Stencil' J.I., Celishhev O.B., Eliseev P.J. Teplofizichni modeli peretvoren' v termomagnitnomu poli //Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. –2003. -№1. S. 26-29.
2. Celishhev O.B. Matematichna model' termomagnitnogo gazoanalizatora z vnutrishn'uju termomagnitnoju konvekciju //Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2003. - №2. – S.69-72.
3. Hobler T. Teploperedacha i teploobmenniki. L.: Gosudarstvennoe nauch. tehn. izd-vo him. literatury. – 1961. – С. 819.

**Кхалед Аквире, Целищев О.Б., Лория М.Г., Целищев Е.Б. Определение кислорода в сложных газовых смесях термомагнитным методом по "роторному" принципу.**

*Важной проблемой при эксплуатации ТМГ на производстве является практическое отсутствие стационарных и переносных образцовых приборов для проверки рабочих ТМГ. Поэтому целью работы является разработка высокоточного универсального термомагнитного газоаналитатора с абсолютно линейными градуировочными характеристиками в диапазоне измерения концентраций кислорода от 0 до 100 незначительными дополнительными погрешностями измерения, малым весом, стоимостью, энергоемкостью и способными определять содержимое кислорода в сложных технологических газовых смесях.*

*Выполненные теоретические исследования метода измерения концентрации кислорода по "роторному" принципу и показанная возможность разработки автоматического газоаналитатора с линейной статичной характеристикой, который не зависит от таких основных параметров как напряжение питания мостовых электрических схем, напряженности магнитного поля, изменения атмосферного давления, теплофизических параметров газовой смеси, а также незначительной зависимостью от изменения температуры окружающего воздуха. Это дает возможность разрабатывать образцовые переносные и стационарные приборы контроля кислорода в многокомпонентных газовых смесях, а также промышленных многодиапазонных приборов с высокими метрологическими характеристиками, которые отличаются малым весом и габаритами, высокой надежностью, точностью и стоимостью.*

**Ключевые слова:** кислород, термомагнитный метод, "роторный" эффект, термоанемометр.

**Khaled Akvire, Tselithhev A.B., Loriya M.G., Tselithhev E.B. Its devais oxygen with gas mixture thermomagnetical method with "rotor" prinsipal**

*An important problem during exploitation of ТМГ on a production is practical absence of stationary and portable exemplary devices for verification of workers of ТМГ. Therefore the aim of work is development of high-fidelity universal термомагнітного gas analyzer with absolutely linear calibration descriptions in the range of measuring of concentrations of oxygen from 0 to 100 by the insignificant additional errors of measuring, small weight, cost, power-hungryness and able to determine content of oxygen in difficult technological gas mixtures.*

*Executed theoretical researches of method of measuring of concentration of oxygen on "rotor" principle and shown possibility of development of automatic gas analyzer with linear static description, that does not depend on such basic parameters as tension of feed of bridge electric charts, tension of magnetic-field, change of atmospheric pressure, thermophysical parameters of gas mixture, and also by insignificant dependence on the change of temperature of surrounding air. It gives an opportunity to develop the exemplary portable and stationary devices of control of oxygen in multicomponent gas mixtures, and also industrial multirange devices with high metrology descriptions, that differ in small weight and sizes, high reliability, exactness and cost.*

**Key words:** oxygen, термомагнітний method, "rotor" effect, thermoanemometer.

---

**Кхалед Аквіре** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, м. Сєверодонецьк.

**Целіщев Олексій Борисович** – доцент, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Східноукраїнського національного університету імені В. Даля м. Сєверодонецьк.

**Лорія Марина Геннадіївна** – доцент, к.т.н., доцент кафедри електронних апаратів Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, м. Сєверодонецьк.

**Целіщев Євген Борисович** – студент Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, м. Сєверодонецьк.

*Рецензент:* **Суворин А. В.** – д.т.н., доцент.

Стаття подана 12.01.2015