

ефективне рішення, яке дає змогу застосовувати поворотну заслінку для регулювання витрат потоків у трубопроводах з великими діаметрами.

1. Арбузов Н.С. Влияние времени закрытия судовых задвижек на уровень максимального давления в трубопроводах нефтеналивных терминалов // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и газа. – 2011(1). – 38–40 с. 2. Зайцев Л.А., Ясинский Г.С. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. – М.: Недра, 1980. – 187 с.

УДК 543.27.8

О.В. Макарь

Національний університет “Львівська політехніка”

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНОДОПУСТИМИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ГАЗОАНАЛІТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ

© Макарь О.В., 2014

Досліджуються режими роботи теплового чутливого елемента за постійних значень теплофізичних параметрів газової суміші. За цих самих режимів забезпечується висока відтворюваність результатів вимірювання, висока чутливість і не перевищується допустима температура чутливого елемента.

Ключові слова: газоаналізатор, газоаналітична техніка, тепловий чутливий елемент, вимірювальна комірка.

Combined methods of analysis based on the measurement of thermal and mechanical parameters of the gaseous mixture could be applicable in the development of gas analyzers for energy-saving technologies and new technologies of the enhanced raw materials and waste processing. Gas analyzers developed with the application of such methods of measurement have more advanced metrological and operational characteristics under complex measuring conditions and are not susceptible of the effect of corrosive contaminants and acidic gases. Thermal sensors, acting as transducers of thermal-physical and mechanical parameters of the gaseous mixture into an electrical signal, produce the output, the change of electrical resistance, which depends upon the thermal conductivity, heat capacity, energy consumption, density and viscosity of the gaseous mixture. The detection of the optimum operational modes of a heat sensing element, which could be heated up by the current, is essential for the pilot research of new circuit solutions in gas analyzing technologies. With certain restrictions, preconditioned by the small ratio of the length of the sensing element to its diameter, it would be reasonable to investigate the change of the measuring element sensitivity under the conditions of the current change, the change in the gaseous mixture expenditure and the temperature of the sensing element. The mathematical model of the measuring element with the heat sensing element is studied in this paper, obtained as a result of experimental calculations for the purpose of detecting the parameter values.

Key words: gas analyzers, gas analytical technique, thermal sensing element, measuring cell.

### Постановка задачі

Для експериментального дослідження нових схемотехнічних рішень у газоаналітичній техніці важливим є визначення оптимальних значень режимів роботи теплової вимірювальної комірки з чутливим елементом, який нагрівається електричним струмом. За певних обмежень, які зумовлені малим відношенням довжини чутливого елемента до його діаметра, доцільно дослідити зміну чутливості вимірювальної комірки за змін струму через чутливий елемент, зміну витрати газової

суміші та зміну температури чутливого елемента. Для визначення значень цих параметрів досліджується математична модель вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом, яка одержана експериментально-розрахунковим шляхом і наведена в [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [1, 2] одержано модель вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом за різних режимів роботи електричної вимірювальної схеми: з постійним значенням сили струму, що протікає через чутливий елемент; з постійним значенням спаду напруги на чутливому елементі; з постійним значенням температури чутливого елемента. Далі доцільно дослідити вплив зміни сили струму через чутливий елемент, витрати газової суміші через вимірювальну комірку, зміну температури чутливого елемента на чутливість теплової вимірювальної комірки з врахуванням того, що сила струму та температура не повинні виходити за межі значень, за яких можливе руйнування чутливого елемента.

### Формулювання цілі роботи

Мета роботи – дослідження впливів змін режимів роботи теплової вимірювальної комірки на її чутливість та температуру чутливого елемента з метою визначення граничнодопустимих значень режимів, за яких виключається можливість руйнування чутливого елемента.

### Виклад основного матеріалу

Під час розробки газоаналізаторів для енергоощадних технологій та нових технологій поглибленої переробки первинної сировини та відходів є перспективними комбіновані методи аналізу на основі вимірювання теплофізичних і механічних параметрів газової суміші. Газоаналізатори, реалізовані за такими методами вимірювання, мають кращі метрологічні і експлуатаційні характеристики у важких умовах вимірювання та дії агресивних домішок і газів з кислотою реакцією. Як перетворювачі теплофізичних і механічних параметрів газової суміші в електричний сигнал у них застосовуються теплові чутливі елементи (ТЧЕ), вихідний сигнал яких – зміна електричного опору, що залежить від теплопровідності, теплоємності, витрати, густини та в'язкості газової суміші [1].

Статична характеристика ТЧЕ, поміщеного у протічну вимірювальну комірку, є функцією електричного опору  $R$  від концентрації вимірюваного компонента газової суміші  $c$ , теплопровідності  $\lambda$ , теплоємності  $C_p$ , об'ємні витрати  $Q$ , густини  $\rho$  та температури  $T$  газової суміші, від струму, що протікає через ТЧЕ –  $I$ , а також конструктивних розмірів вимірювальної комірки – довжина  $L$ , її діаметр  $D$ , діаметр чутливого елемента  $d$ :

$$R = f(c, I, C_p, Q, r, T, L, D, d). \quad (1)$$

Розміри вимірювальної комірки  $L, D, d$  – сталі величини, значення яких вибираються залежно від конструкції комірки і яка, своєю чергою, визначатиметься тим, які саме фізичні параметри газової суміші мають робити основний внесок у формування функції перетворення газоаналізатора.

Фізичні параметри газової суміші  $\lambda, C_p, \rho$  залежать від складу газової суміші:

$$I = f(c), \quad C_p = f(c), \quad r = f(c). \quad (2)$$

Загалом, враховуючи, що властивості більшості газів, які входять до аналізованих сумішей вищерозглянутих задач вимірювання, мало відрізняються від властивостей ідеального, фізичні параметри газових сумішей можна виразити адитивними залежностями:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \cdot c_i, \quad C_p = \sum_{i=1}^n C_{p_i} \cdot c_i, \quad r = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c_i, \quad (3)$$

де  $I_i, C_{p_i}, r_i, c_i$  – відповідно: теплопровідність, теплоємність, густина та концентрація  $i$ -го компонента суміші, а  $n$  – кількість компонентів суміші.

Значення одного з наступних параметрів – об’ємна витрата газової суміші  $Q$  через комірку, температура  $T$  ТЧЕ, сила струму  $I$  через ТЧЕ можуть підтримуватися сталими. Отже, обмежують вплив на результат вимірювання багатьох неінформативних параметрів. Збільшення сили струму, що протікає через ТЧЕ, призводить до збільшення чутливості, але значення струму і, відповідно, значення температури ТЧЕ обмежують з метою виключення можливості руйнування чутливого елемента. Доцільно визначити межі змін значень цих параметрів з метою застосування одержаних результатів під час розробки вимірювальних схем різних газоаналітичних приладів.

Допустимі межі змін значень цих параметрів можна знайти за математичною моделлю теплової вимірювальної комірки для бінарних і псевдобінарних газових сумішей, одержаною в [1]. Рівняння статичної характеристики теплової вимірювальної комірки у режимі роботи зі сталим значенням сили струму, що протікає через чутливий елемент, має такий вигляд:

$$R_i = \frac{\frac{1}{I^2} \cdot \left[ p \cdot L \cdot I \cdot \left[ A + B \cdot \frac{4 \cdot d_e \cdot Q_o \cdot r \cdot C_{p_i}}{p \cdot (D^2 - d_e^2) \cdot I} \right] + y \right] \cdot (T_0 - 1/a - T_2)}{1 - \frac{\frac{1}{I^2} \cdot \left[ p \cdot L \cdot I \cdot \left[ A + B \cdot \frac{4 \cdot d_e \cdot Q_o \cdot r \cdot C_{p_i}}{p \cdot (D^2 - d_e^2) \cdot I} \right] + y \right]}{a \cdot R_0}}, \quad (4)$$

де, крім відомих:  $R_0$  – опір ТЧЕ за температури  $T_0$ ;  $T_2$  – температура газової суміші;  $A$ ,  $B$ ,  $\psi$  – коефіцієнти, які визначаються конструктивними параметрами вимірювальної комірки;  $a$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу ТЧЕ.

Для режиму роботи теплової вимірювальної комірки зі сталим значенням температури чутливого елемента рівняння статичної характеристики має такий вигляд:

$$I_t = \sqrt{\frac{(T_1 - T_2) \cdot \left[ p \cdot L \cdot I \cdot \left[ A + B \cdot \frac{4 \cdot d_e \cdot Q_o \cdot r \cdot C_{p_i}}{p \cdot (D^2 - d_e^2) \cdot I} \right] + y \right]}{R_0 \cdot (1 + a \cdot (T_1 - T_0))}}. \quad (5)$$

Далі дослідження проведено так. Змінюючи значення струму через ТЧЕ і розраховуючи параметри теплової вимірювальної комірки для різних значень постійної температури ТЧЕ, а також змінюючи значення витрати газу через теплову вимірювальну комірку, визначимо як змінюються залежні або зв’язані з ними характеристики та режими роботи теплової вимірювальної комірки. Обмеження значень цих режимів, які можуть призвести до руйнування або погіршення роботи теплової вимірювальної комірки, називатимемо граничнодопустимими режимами роботи.

Для дослідження статичних характеристик у межах змін значень вищеперерахованих параметрів, які можуть бути в реальних газоаналітичних пристроях, вибрана теплова вимірювальна комірка з конструктивними, електричними та теплофізичними параметрами, поданими у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри вимірювальної комірки

Параметри	Позначення параметра	Значення парметра, вим. одиниці
Довжина ТЧЕ	$L$	0.012 м
Діаметр ТЧЕ	$d_e$	0.0006 м
Діаметр вимірювальної комірки	$D$	0.006 м
Опір ТЧЕ за температури $T_0$	$R_0$	22 Ом
Температура $T_0$	$T_0$	313 К
Температурний коефіцієнт опору платини	$a$	0.0038 1/К
Коефіцієнт А	$A$	1.772
Коефіцієнт В	$B$	0.08563
Коефіцієнт $\psi$	$\psi$	0.0002965

Для усунення впливу температури навколишнього середовища на результат вимірювання температура газової суміші і температура металевого блока, в якому розміщені теплові вимірювальні комірки, підтримуються сталою зі значенням 313 К. Збільшувати значення цих температур більше як 323 К є недоцільним, оскільки це призводить до зменшення чутливості за обмежень щодо збільшення значення температури ТЧЕ.

Розрахунки проведені для азото-аргонної суміші (найпоширеніша суміш для наповнення електроосвітлювальних ламп) [3] у межах зміни вмісту аргону від 0 до 100 % за теплофізичних параметрів компонентів для температури 313К [4], наведених у табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні параметри аргону та азоту за температури 313 К

Параметри	Позначення параметра	Значення парметра, вим. одиниці
Теплопровідність аргону	$I_1$	0.01793 Вт/(м·К)
Теплоємність аргону	$C_{p_1}$	523 Дж/(кг·К)
Густина аргону	$r_1$	1.784 кг/м <sup>3</sup>
Теплопровідність азоту	$I_2$	0.02728 Вт/(м·К)
Теплоємність азоту	$C_{p_2}$	1040.2 Дж/(кг·К)
Густина азоту	$r_2$	1.251 кг/м <sup>3</sup>

Для побудови статичної характеристики теплової вимірювальної комірки необхідно ще задатись значенням об'ємної витрати газової суміші для режиму з постійною витратою через теплову вимірювальну комірку, для режиму  $I=\text{const}$  – значенням сили струму, що протікає через чутливий елемент, для режиму  $T=\text{const}$  – значенням температури чутливого елемента. В [1, 2] дослідження проведені для значень струму  $I = 60$  мА,  $T = 363$  К,  $Q_0 = 10$  л/год. Розраховані статичні характеристики теплової вимірювальної комірки під час вимірювання концентрації аргону в азото-аргонній суміші, для режиму з постійним значенням струму,  $I=60$  мА, відображені на рис. 1, та для режиму з постійним значенням температури ( $T = 363$  К °С) – на рис. 2.

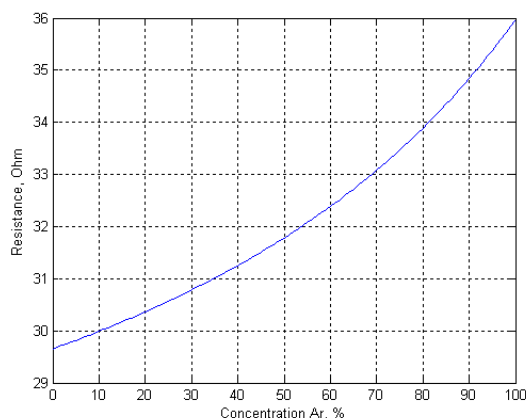


Рис. 1. Статична характеристика залежності опору ТЧЕ теплової вимірювальної комірки від концентрації аргону у режимі роботи чутливого елемента  $I=\text{const}$ .

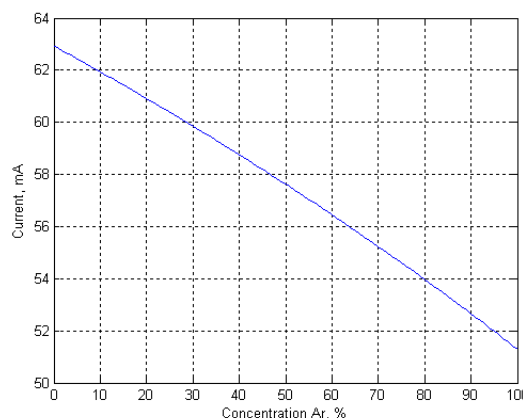


Рис. 2. Статична характеристика залежності струму через ТЧЕ теплової вимірювальної комірки від концентрації аргону у режимі роботи чутливого елемента  $T=\text{const}$

Наступним треба знайти вплив зміни сили струму, температури ТЧЕ і об'ємної витрати газової суміші на чутливість теплової вимірювальної комірки. При цьому виразимо чутливість  $S$  як зміну опору ТЧЕ від зміни концентрації:

$$S = \frac{dR}{dc}. \quad (6)$$

Чутливість теплової вимірювальної комірки у режимі з постійним значенням сили струму  $I = \text{const}$  через ТЧЕ і з постійним значенням температури чутливого елемента  $T = \text{const}$  описується рівняннями, які наведені в [5].

Розраховуючи чутливість вимірювальної комірки для режиму з постійним значенням сили струму через ТЧЕ за значень струму у межах від 60 до 100 мА, паралельно розрахуємо значення температури ТЧЕ.

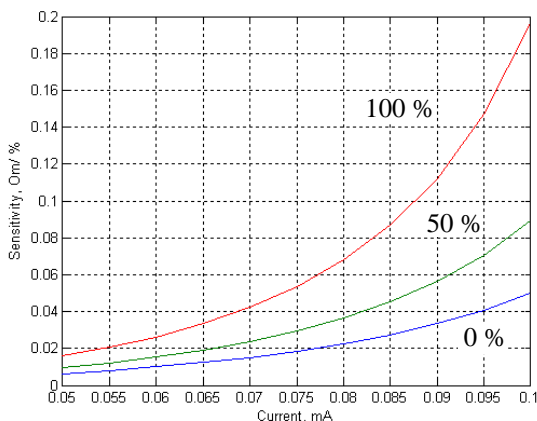


Рис. 3. Залежність впливу зміни струму на чутливість теплової вимірювальної комірки у режимі з  $I = \text{const}$  через ТЧЕ для трьох значень концентрації аргону в азото-аргонній суміші

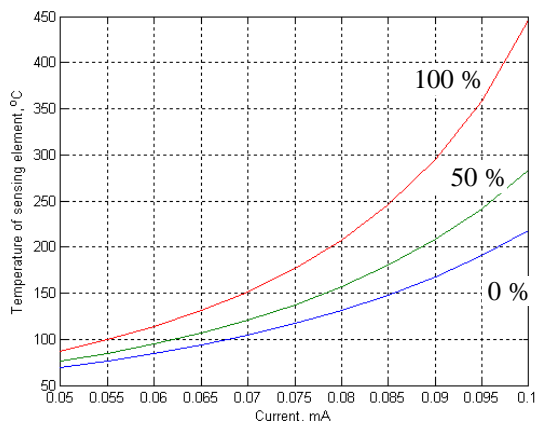


Рис. 4. Залежність впливу зміни струму на температуру ТЧЕ теплової вимірювальної комірки у режимі з  $I = \text{const}$  через ТЧЕ для трьох значень концентрації аргону в азото-аргонній суміші

З графіків, зображених на рис. 3, 4, бачимо, що за збільшення сили струму чутливість теплової вимірювальної комірки збільшується, однак це призводить до надмірного розігрівання чутливого елемента. За струму 100 мА для чистого аргону чутливість ТЧЕ становить 0.195 Ом/%, але при цьому розрахункова температура ТЧЕ досягне майже 450 °С, що є неприпустимим, оскільки це призведе до його руйнування. Температура чутливого елемента з платинового мікропроводу, який заплавлений в скло, не повинна перевищувати 200 °С.

Враховуючи це, для режиму роботи ТЧЕ з постійним значенням струму можна визначити допустимі значення сили струму. Максимальне нагрівання ТЧЕ з перерахованих газових сумішей буде за чистого аргону. Отже, за концентрації аргону 100 % допустиму силу струму через ТЧЕ слід обмежити значенням від 50 до 80 мА. При цьому за струму 80 мА чутливість теплової вимірювальної комірки виражена в одиницях зміни опору ТЧЕ на один відсоток концентрації аргону в азоті у кінці діапазону вимірювання дорівнює 0,068 Ом/%, а за 50 мА – 0,018 Ом/%.

Чутливість теплової вимірювальної комірки за зміни об'ємної витрати газу, що протікає через вимірювальну комірку, майже постійна. Це пояснюється тим, що через теплові комірки важко пропустити більш, ніж 100 л/хв, витрати газової суміші і це недоцільно з погляду побудови самого газоаналітичного пристрою; тому режим протікання газової суміші через теплову вимірювальну комірку ламінарний. Якщо в газоаналітичному пристрої достатньо великі в межах наведених значень витрати газової суміші, вимірювальна схема може працювати за більших значень сили струму через ТЧЕ.

З графіків, зображених на рис. 5 і 6, бачимо, що за збільшення значення витрати газової суміші до 60 л/год, допустиме збільшення струму через ТЧЕ до 100 мА. Але основним висновком необхідно вважати те, що надійно захистити ТЧЕ від перевищення граничнодопустимих режимів роботи можна у вимірювальних схемах з постійним значенням температури ТЧЕ теплової вимірювальної комірки. Як усунути основний недолік таких схем – високу чутливість до зміни неінформативного параметра температури модуля з тепловими комірками і нестабільність початкових показів, – запропоновано у [6].

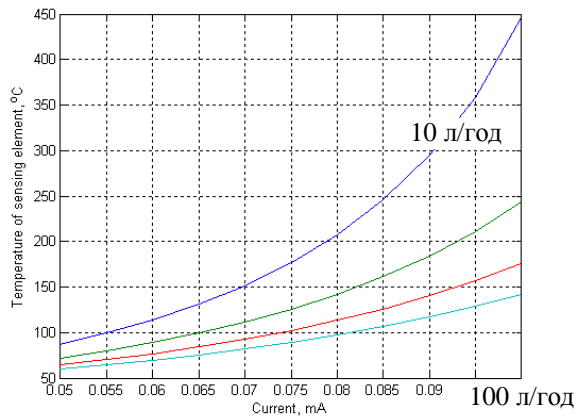


Рис. 5. Залежність впливу зміни значення струму на температуру ТЧЕ теплової вимірювальної комірки у режимі  $I = \text{const}$  через ТЧЕ за витрат аргону – 10, 40, 70 і 100 л/год

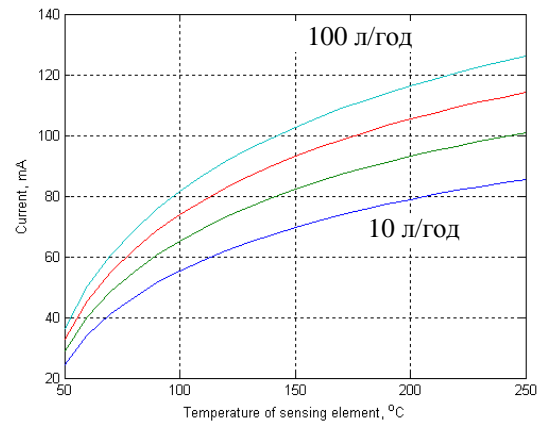


Рис. 6. Залежність значення струму через ТЧЕ теплової вимірювальної комірки у режимі  $T = \text{const}$  ТЧЕ за витрат аргону – 10, 40, 70 і 100 л/год

### Висновки

Встановлено граничнодопустимі режими роботи теплового чутливого елемента для витрати газової суміші 10 л/год, значення сили струму лежить у межах від 50 до 80 мА. Верхня межа сили струму визначається температурою розігрівання чутливого елемента – 200 °С. Нижня межа сили струму визначається чутливістю теплової вимірювальної комірки. Для кожної конкретної реалізації газоаналізатора на певний більш вузький діапазон вимірювання з одержаних графіків можна вибрати значення струму через ТЧЕ теплової вимірювальної комірки, діапазон зміни струму можна розширити, збільшивши витрату газової суміші, за витрати 60 л/год верхнє значення сили струму становить 100 мА. За аналогією до проведеного моделювання можна вибрати режими роботи ТЧЕ у теплової вимірювальної комірки для інших компонентів і концентрацій.

1. Кріль О.В., Макар О.В. Математична модель вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія докiлля. автоматизація”. – 2011. – № 712. – С. 152–155.
2. Макар О.В. Моделювання теплових чутливих елементів для газоаналітичної техніки // Матер. 1-ї Всеукр. наук.-практ. конференції молодих учених, студентів та аспірантів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології-2011”. – К., 2011. – С. 36–38.
3. Кріль О.В., Кріль Б.А. Підвищення точності газоаналізаторів для пристроїв приготування азото-аргонової суміші // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія докiлля. автоматизація”. – 2005. – № 537. – С. 155–158.
4. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов: справочник. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
5. Макар О.В., Кріль О.В. Дослідження чутливості вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом // Матер. 18-ї Міжнар. конф. з автоматичного управління “Автоматика - 2011”, 28–30 вересня. – Львів, 2011. – С. 399.
6. Кріль О.В., Кріль Б.А. Експериментальне порівняння режимів роботи теплових чутливих елементів газоаналітичних приладів // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація”. – 2009. – № 659. – С. 84–91.