

**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЦЕЛІЩЕВ ОЛЕКСІЙ БОРИСОВИЧ**

**УДК 543.272.108**

**ТЕРМОМАГНІТНИЙ ГАЗОАНАЛІЗАТОР ІЗ КОРЕКЦІЄЮ  
ЗА “РОТОРНИМ” ЕФЕКТОМ**

**05.11.13 – прилади і методи контролю та  
визначення складу речовин**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Вінниця - 2004**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Северодонецькому технологічному інституті Східноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України

Науковій керівник: доктор технічних наук, професор  
**Стенцель Йосип Іванович**,  
Северодонецький технологічний інститут, завідувач  
кафедри “Автоматизації технологічних процесів”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Петрук Василь Григорович**,  
Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри  
“Хімії та екологічної безпеки”

доктор технічних наук, професор  
**Порєв Володимир Андрійович**  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, професор кафедри “Наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем”

**Провідна установа:** Національний університет “Львівська політехніка”  
Міністерства освіти і науки України (м. Львів), кафедра “Автоматизація теплових і хімічних процесів”

Захист відбудеться “27” \_\_01\_\_ 2005 р. о \_\_14<sup>00</sup>\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “15” \_\_12\_\_ 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Павлов С.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Автоматичні методи аналізу газів засновані на використанні тих чи інших унікальних властивостей компонентів газової суміші. Вони повинні забезпечувати високу вибірковість і чутливість. Також бажано, щоби прилади були придатними для створення інформаційно вимірювальних систем і комплексів, а їх статична характеристика була лінійною.

Для контролю за вмістом кисню в газових сумішах цим умовам найбільш повно відповідає магнітний метод вимірювання, який заснований на парамагнітних властивостях молекул кисню, магнітна сприйнятливості яких значно вища, ніж молекул інших газів.

Серед магнітних методів, які використовуються для побудови автоматичних газоаналізаторів, найбільш широке розповсюдження знайшов термомагнітний метод. Він заснований на здатності молекул кисню змінювати свою магнітну сприйнятливості під дією температурного градієнту. Термомагнітні газоаналізатори володіють високою чутливістю, простотою конструкції, високою надійністю і точністю, прості в експлуатації і налагоджуванні. Вони можуть бути одно або багатодіапазонними з автоматичним переходом з одного діапазону на інший. Ці прилади використовуються в різних галузях промисловості, у тому числі в хімічній промисловості (виробництві аміаку, метанолу, азотної, сірчаної кислот та оцтової кислоти), в яких від вмісту кисню у відходячих газах залежить якість готової продукції; теплоенергетиці (топки, печі, парокотельні установки), оптимальний режим роботи яких залежить від вмісту кисню в димових газах; медицині; космічній промисловості та багатьох інших.

У більшості наукових праць, присвячених дослідженню термомагнітного методу, приймалося, що газові потоки в термомагнітному полі мають ламінарний характер, а нелінійність статичної характеристики обумовлена тільки зміщенням фронту нагрітого газу в напрямку зменшення напруженості магнітного поля та небажаним розподілом температур між нагрівачами термоанемометра і нелінійністю електричної незрівноваженої мостової схеми, а похибки, викликані зміною складу та фізичних параметрів неокисневої частини газової суміші. При вивченні задач, пов'язаних з тепловими процесами чутливого елемента термомагнітного газоаналізатора, не враховувалися особливості руху газу і конвективно-кондуктивного переносу тепла в термомагнітному полі.

Без урахування цих особливостей методу не можливе подальше покращення його метрологічних характеристик. До основних з них відносяться: зменшення нелінійності статичних характеристик, підвищення чутливості, точності та стабільності вимірювання, зменшення залежності результатів вимірювання від зміни зовнішніх впливаючих факторів (температури, атмосферного тиску), складу неокисневих компонентів АГС, а також створення універсального термомагнітного газоаналізатора, незалежного від діапазону вимірювання тощо.

У цьому аспекті перспективними є роботи, які проводяться на кафедрі “Автоматизації технологічних процесів” (АТП) СТІ СНУ під керівництвом д.т.н., проф. Стенцеля Й.І. щодо створення високоточних приладів для визначення складу речовин.

У зв'язку з наведеним вище задачею роботи є розробка газоаналізатора для визначення концентрації кисню в АГС, що базується на термомагнітному методі і забезпечує високу селективність та точність вимірювання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалась згідно з планами наукових досліджень Східноукраїнського національного університету та Міністерства освіти та науки України за тематикою В - 26 - 03 - СТІ “Теоретичні та експериментальні дослідження термомагнітних та фотоколориметричних методів вимірювання речовин”.

Крім того протягом 1999-2003 виконувався цілий ряд дипломних та магістерських науково-дослідних робіт за цією тематикою.

**Мета та задачі досліджень.** *Мета дисертаційної роботи* – підвищення чутливості та розширення діапазону вимірювань термомагнітного газоаналізатора на основі використання “роторного” ефекту в неоднорідному термомагнітному полі.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Теоретичне та експериментальне дослідження теплофізичних процесів, які мають місце в термомагнітному полі газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією.
2. Розробка і дослідження способів зменшення “роторного” ефекту в термомагнітному полі.
3. Розробка математичних моделей температурного поля термоанемометра зі зменшеним “роторним” ефектом.
4. Розробка термомагнітного газоаналізатора з корекцією “роторного” ефекту.
5. Розробка математичних моделей для термомагнітного перетворювача та функцій оптимальних співвідношень між основними параметрами термомагнітного газоаналізатора.
6. Експериментальне підтвердження одержаних результатів.

**Об’єкт дослідження** - процес вимірювання концентрації кисню термомагнітним методом.

**Предмет дослідження** – метрологічні характеристики універсального термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією.

**Методи дослідження:**

- Моделі руху газової суміші, які містять парамагнітний газ, було розроблено за допомогою методів математичної фізики, теорії неоднорідних газів.
- Для обробки вихідних сигналів первинного перетворювача термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом використано сумарно-різницевий метод.
- Оптимізація статичних характеристик виконана методом найменших квадратів.
- Для дослідження похибок термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом використано варіаційний метод.
- Під час обробки експериментальних даних було використано методи математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розв'язано за допомогою методу нульового градієнта та функції Дірака систему рівнянь Больцмана, яка описує процес руху парамагнітного газу в термомагнітному полі. Це підтвердило, що незважаючи на незначну швидкість переміщення газової суміші, характер її руху не є ламінарним та дозволило зробити висновок, що основною причиною виникнення нелінійності статичної характеристики термомагнітного газоаналізатора є “роторний” ефект.

2. Вперше розроблено математичну модель чутливого елементу термомагнітного газоаналізатора з урахуванням “роторного” ефекту, що дозволило запропонувати сумарно-різницевий метод обробки вимірювальних сигналів, який суттєво розширив діапазон вимірювання інформаційного параметра.

3. Вперше досліджено вплив конструктивних параметрів перегородок, що розташовано у зоні максимального термомагнітного поля, на зменшення “роторного” ефекту, що дозволило суттєво зменшити нелінійність статичної характеристики термомагнітного газоаналізатора.

4. За рахунок використання двоканальної вимірювальної схеми модифіковано термомагнітний метод контролю концентрації кисню в АГС, що дозволило у два рази підвищити чутливість, на 60% зменшити похибку вимірювання та підвищити вірогідність контролю.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що розроблений універсально термомагнітний газоаналізатор. Цей прилад характеризується:

- удвічі вищою чутливістю в порівнянні з прототипами;
- незалежністю показань від зміни неокисневої частини АГС;
- в 1.6 рази більш високою точністю у порівнянні з існуючими термомагнітними газоаналізаторами;
- практично лінійною статичною характеристикою в діапазоні від 0 до 100 % кисню в АГС.

Теоретичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі АТП СТІ СНУ у рамках спеціалізації “Автоматизація технологічних процесів” при викладенні таких дисциплін, як: “Спеціальні засоби автоматизації”, “Технологічні вимірювання та прилади”.

**Впровадження результатів роботи** Результати дисертаційної роботи впроваджено на Сєверодонецькому науково-виробничому підприємстві АНТЕКС ”Аналіт - Прилад” та на Сєверодонецькому ДВП “Об’єднання Азот”, що підтверджується відповідними актами.

#### **Особистий внесок здобувача**

Усі основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто.

У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: узагальнене моделювання теплофізичних процесів, що мають місце в неоднорідному терромагнітному полі [1, 2], розробка математичної моделі універсального терромагнітного газоаналізатора [3], питання технології та виготовлення первинних вимірювальних перетворювачів і терромагнітного газоаналізатора [4] та оптимізація статичної характеристики приладу [5].

#### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та окремі результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях і семінарах. Дисертаційна робота в цілому та окремими розділами доповідалася на науково-технічних семінарах Сєверодонецького технологічного інституту (1999 - 2002 р.р.), на IX і X Міжнародних науково-технічних конференціях “Обчислювальна та вимірювальна техніка в технологічних процесах” (Хмельницький, 2002, 2003 р.р.), науково-технічній конференції “Університет і регіон” (Луганськ, 2002, 2003 р. р.), науково-практичних конференціях “Технологія-2000”, “Технологія-2001”, “Технологія-2002” (доповідь зайняла друге місце), “Технологія-2003”(доповідь зайняла перше місце) та “Технологія-2004” (м. Сєверодонецьк).

#### **Публікації**

Результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 друкованих наукових роботах, з яких 3 статті у наукових журналах, 1 стаття в збірнику наукових праць, 8 тез доповідей конференцій, 1 патент України на корисну модель.

#### **Об’єм та структура дисертації**

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та одинадцяти додатків. Загальний обсяг дисертації 176 сторінок, з яких основний зміст викладено на 129 сторінках друкованого тексту, містить 63 рисунка. Перелік використаної літератури складається з 87 найменувань. Додатки містять результати моделювання, програми для дослідження похибок терромагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом, результати експериментальних досліджень та матеріали щодо впровадження результатів роботи.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, вказано зв’язок роботи з науковими програмами, планами та темами наукового напрямку “Прилади та методи контролю”. Вказано мету та задачі досліджень. Приведено характеристику наукової новизни та практичного значення отриманих результатів, а також їх апробації, публікації та впровадження.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючих методів визначення концентрації кисню в газових сумішах з метою виявлення доцільності застосування кожного з них для розробки універсального газоаналізатора.

Основна увага приділена магнітним методам визначення концентрації кисню в газових сумішах. Проведений аналіз методів та приладів контролю кисню в газових сумішах показав, що найдоцільніше використовувати термомагнітний метод для побудови універсального газоаналізатора. Також було досліджено методи зменшення нелінійності статичної характеристики термомагнітних газоаналізаторів.

На підставі проведеного аналізу зроблено такі висновки:

1. Є доцільною розробка універсального газоаналізатора, здатного вимірювати концентрацію кисню в діапазоні від 0 до 100 %, який має високу чутливість перетворення, а його показання не залежать від зміни складу некісневої частини аналізованої газової суміші. Перевагою даного приладу є універсальність, що дозволяє спростити процес виготовлення, налаштування, перевірки, експлуатації та ремонту приладу.

2. Для реалізації універсального газоаналізатора для визначення концентрації кисню в газових сумішах доцільно використовувати термомагнітний метод вимірювання, який заснований на парамагнітних властивостях кисню. Це дозволить отримати прилад з високою селективністю. Але вплив невимірних компонентів газової суміші на результати вимірювань роблять таке застосування не досить ефективним.

3. Актуальною залишається проблема покращення лінійності, підвищення чутливості та уніфікація технологічних параметрів термомагнітних газоаналізаторів.

За результатами проведеного аналізу сформульована мета та задачі досліджень.

**Другий розділ** присвячено розробці математичних моделей термомагнітного методу визначення концентрації кисню в газових сумішах.

Для моделювання процесів теплофізичних перетворень у термомагнітному полі використана система рівнянь Больцмана, для розв'язання якої вперше застосовано метод нульового градієнту та функція Дірака. На підставі цього розроблено математична модель руху парамагнітного газу в неоднорідному термомагнітному полі.

Швидкість руху газової суміші в термомагнітному полі можна визначити як:

$$v_{\Sigma} = v_H + v_k, \quad (1)$$

де  $v_H$  - швидкість некісневої частини газу відповідно,  $v_k$  - швидкість кисневої частини газу відповідно.

Рис. 1. Фізична модель перетворень в термомагнітному полі АГС

швидкість некісневої та кисневої частини газу відповідно.

З урахуванням цих особливостей руху газової суміші в неоднорідному термомагнітному полі, математична модель термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією має такий вигляд:

$$U_{вих} = U_0 A_4 Q [1 + A_2 k_H (1 - Q)^2], \quad (2)$$

де  $U_0$  - напруга живлення;  $A_4$  - коефіцієнт температуропровідності;  $\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_H$ ;  $\Delta\rho = \rho_k - \rho_H$ ;  $\Delta c_p = c_{pk} - c_{pH}$  - зміна теплопровідності, густини та теплоємності газової суміші;  $\beta$  - температурний коефіцієнт платинового опору;  $R_y$  - постійний опір у вимірювальній діагоналі електричного моста;  $R_0$  - номінальний опір плечей вимірювального моста;  $\lambda, c_p, \rho$  - коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина газової суміші;  $L_T$  - довжина термоанемометра;  $D$  - внутрішній діаметр трубки термоанемометра;  $\eta_H, \eta_k$  - динамічна в'язкість кисню та некісневої частини газу;  $\rho_1, \rho_2$  - парціальні густини некісневої частини газу при температурі  $T_1$  і  $T_2$ ;  $\bar{\rho}_H$  - середнє значення густини

некисневої частини;  $T_1$  та  $T_2$  - температура газу на вході термоанемометра та температура газу в області максимального термомагнітного поля відповідно;  $k_n$  - коефіцієнт коригування, який залежить від властивостей невимірювального компоненту;  $\nu_0$  - магнітна сприйнятливність кисню;  $P$  - тиск газу в термоанемометрі;  $H_{\max}$  - напруженість магнітного поля.

Рис. 2. Статичні характеристики термомагнітного газоаналізатора для газових сумішей: 1 –  $O_2 - N_2$ ; 2 –  $O_2 - He$ ; 3 –  $O_2 - CO_2$ ; 4 –  $O_2 - N_2$

Відносне відхилення між теоретичними та експериментальними характеристиками термомагнітного газоаналізатора не перевищує 5 %, що дозволяє заключити, що розроблена математична модель термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією є адекватною.

При аналізі розроблених математичних моделей удосконалено, що основною причиною нелінійності статичної характеристики приладу є неламинарний характер руху газової суміші в термомагнітному полі (наявність “роторного” ефекту).

Для зменшення “роторного” ефекту використано ламінеризуючу перегородку зі слюди. Враховуючи те, що використання перегородок не дозволяє повністю лінеаризувати статичну характеристику газоаналізатора, було запропоновано двоканальну схему вимірювання та сумарно-різницевий метод обробки сигналів.

Розроблена математична модель термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом, яка має такий вигляд:

$$, \quad (3)$$

де  $K_{opt}$  - коефіцієнт оптимізації статичної характеристики.

Значення коефіцієнта оптимізації статичної характеристики знайдено методом найменших квадратів. При цьому встановлено, що коефіцієнт  $K_{opt}$  практично лінійно залежить від молекулярної маси невимірювального компонента газової суміші (кисень – двоокис вуглецю  $K_{opt}=2.251$ , кисень – азот  $K_{opt}=1.752$ , кисень – гелій  $K_{opt}=1.051$  та кисень – водень  $K_{opt}=0.057$ ).

Статичні характеристики універсального термомагнітного газоаналізатора з корекцією

Рис. 3. Статичні характеристики термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним ефектом” для газових сумішей: 1 -  $O_2 - N_2$ ; 2 -  $O_2 - CO_2$ ; 3 -  $O_2 - H_2$ ; 4 -  $O_2 - He$

за “роторним” ефектом, що розраховано на підставі отриманої математичної моделі, є практично лінійними та характеризуються вдвічі більшою чутливістю.

Відхилення між характеристиками для різних газових сумішей суттєво зменшено. Це дозволяє зробити висновок, що вплив не-

міряного компонента на характеристику приладу практично відсутній.

Крім того проведено аналіз вірогідності контролю концентрації кисню термомагнітним методом, що дозволило за результатами експерименту визначити вірогідність контролю за допомогою запропонованого газоаналізатора.

**У третьому розділі** приведено математичні моделі термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом і результати метрологічного аналізу приладу.

Для дослідження похибок приладу використано варіаційний метод. Це дозволило оцінити вплив зміни того чи іншого збурюючого фактора на статичну характеристику теоретичним шляхом ще на етапі проектування приладу. Відхилення вихідного сигналу приладу можна привести у вигляді функціоналу, який є функцією вхідного параметра і впливаючих величин.

Так наприклад, похибка приладу від зміни температури АГС або температури навколишнього середовища має вигляд:

$$, \quad (4)$$

де - мультиплікативна складова похибки;

- нелінійна квадратична складова похибки;

- нелінійна кубічна складова похибки.

Аналогічним чином було визначено похибки приладу від зміни інших впливаючих факторів (рис. 4).

температурна похибка

похибка від зміни барометричного тиску

похибка від зміни напруги живлення

похибки від зміни складу некісневої частини АГС



Рис. 4. Похибки термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “ротормим” ефектом для концентрацій кисню в газовій суміші  $O_2 + N_2$ : 1 - 20 %; 2- 50 %; 3- 80 %; 4- 95 %

Це дозволило дослідити вплив зміни внутрішніх та зовнішніх факторів на процес перетворення. На підставі досліджень зроблено висновок, що найбільший вплив на похибку вимірювання термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “ротормим” ефектом чинять: зміна барометричного тиску  $P$ ; установки нуля (відхилення термоанемометра від горизонтального стану), зміна напруги  $U$  живлення мостової електричної схеми; зміна температури  $T_1$  газу на вході вимірювальної камери або зміна температури навколишнього середовища (похибка запропонованого приладу практично на 30 % менша, ніж у звичайного приладу, крім того залежність температурної похибки від зміни температури є практично лінійною на відміну від звичайного термомагнітного газоаналізатора).

Використання сумарно-різницевого методу дозволило практично повністю виключити вплив зміни складу некісневої частини АГС (похибка від зміни складу некісневої частини газової суміші не перевищує 1 %).

Аналізуючи результати досліджень, зроблено такі рекомендації:

- для стабілізації напруги живлення слід використовувати стабілізоване джерело живлення;
- для стабілізації температури газу на вході термоанемометра слід використовувати пристрій стабілізації витрати АГС, що подається на аналіз, тому що температура газу на вході термоанемометра визначається інтенсивністю процесу теплообміну, який має місце при протіканні АГС по внутрішньому теплообміннику приладу;
- для врахування температурної похибки доцільно відмовитися від термостатування датчика і використати компенсуючі терморезистори, що дозволить збільшити точність та надійність вимірювань концентрації кисню;
- при експлуатації приладу слід систематично перевіряти барометричний нуль за рахунок рівня, який вмонтовано в корпус первинного вимірювального перетворювача.

У четвертому розділі наведено результати практичної реалізації термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “ротормим” ефектом. Розроблено вимірювальний перетворювач, який дозволяє впровадити отримані наукові результати (рис. 5).

Рис. 5. Термомагнітний газоаналізатор з корекцією за “ротормим” ефектом

З теоретичних та експериментальних досліджень випливає, що кінетична дія молекул кисню в різних газових сумішах залежить від фізичних параметрів невимірювального компоненту, тому характер нелінійності різний для різних АГС. Запропонована конструкція вимірювальної камери з двома термоанемометрами. При цьому вони встановлюються таким чином, щоб для них співпадав максимум термомагнітного поля. В одному з термоанемометрів в області максимального термомагнітного поля встановлюється ламінеризуюча перегородка.

Прилад працює таким чином. АГС через вентиль 1, фільтр 2 і ротаметр 3 подається у вимірювальну камеру 4. Газова суміш на вході в камеру 4 розділяється на два потоки, які з двох сторін омивають торці термоанемометрів 5 та 6. При відсутності кисню в газовій суміші в термоанемо-

метрах рух газу відсутній, а опори секцій нагрівача термоанемометра  $R_{11} = R_{12}$  і  $R_{21} = R_{22}$ . Якщо газова суміш містить кисень, то АГС двома потоками потрапляє в термоанемометри рівними витратами. Відповідність витрат забезпечується тим, що термоанемометри за геометричними розмірами однакові, опори спіралей також є однакові й розташовані між одними й тими ж магнітними наконечниками.

Переміщуючись уздовж кільцевого каналу вимірювальної камери 4, АГС, за рахунок парамагнітних властивостей кисню, втягується у вимірювальні канали термоанемометрів 5 та 6. Опинившись в області максимального термомагнітного поля, АГС нагрівається. За рахунок цього, кисень, згідно закону Кюрі, дещо втрачає свої парамагнітні властивості та виштовхується з каналу термоанемометра більш холодним, тобто більш магнітним газом. При переміщенні АГС по каналах термоанемометрів спіраль з опором  $R_{11}$  охолоджується сильніше, ніж спіраль з опором  $R_{12}$ , а  $R_{21}$  більш ніж  $R_{22}$ . Внаслідок чого у вимірювальних діагоналях електричних мостів, які

складаються з спіралей  $R_{11}$  та  $R_{12}$  і  $R_{21}$  та  $R_{22}$ , а також з постійних опорів  $R_{13}$  та  $R_{14}$  (7 та 8) і  $R_{23}$  та  $R_{24}$  (9 та 10) відповідно, виникає різниця потенціалів, яка подається на пристрій обробки вимірювальної інформації 11, де обробляється за наведеним далі алгоритмом. Вихідний сигнал з блоку 11 подається на мілівольтметр 12, шкала якого проградуєвано в одиницях вмісту кисню в АГС. Живляча напруга до вимірювальних мостових електричних схем підводиться від джерела постійного струму 13.

Принцип вимірювання полягає в наступному. Вихідні напруги двох електричних мостів  $U_{1вих}$  і  $U_{2вих}$  складуються, в результаті чого одержується сумарний вихідний сигнал

Рис. 6. Принцип побудови статичної характеристики газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом для газової суміші  $N_2 + O_2$  німається від сумарного значення напруги  $U_{\Sigma}$  у результаті чого знаходимо вимірювальну напругу, яка є мірою концентрації кисню в газовій суміші:  $U_{0вих} = U_{\Sigma} - \Delta U_{вих}$ . Пояснення принципу вимірювання приводиться на рис. 6 для газової суміші кисень - азот. Крива 1 є сумарною статичною характеристикою для газоаналізатора з первинним перетворювачем без перегородки (крива 3) і з перегородкою (крива 4). Крива 5 уявляє собою різницю статичних характеристик цих газоаналізаторів, помножену на коефіцієнт корегування статичної характеристики, а крива 2 є статичною характеристикою запропонованого термомагнітного газоаналізатора. Так як принцип вимірювання побудований на характеристиках, що отримано експериментально, то можна сказати, що запропонований метод є достовірним.

Як слід з рис. 6, чутливість перетворення для такого газоаналізатора практично у два рази перевищує чутливість аналогічних приладів. Суттєво зменшилася і нелінійність статичної характеристики, а це свідчить про те, що зменшилася залежність результатів вимірювання від зміни складу неокисневої частини АГС.

Одним з найбільш важливих питань при розробці термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом є визначення оптимальної форми, розміру та просторового розташування ламінеризуючої перегородки в каналі термоанемометра. З метою розв’язання цього питання було дос-

Рис. 7. Статичні характеристики газоаналізатора з хрестоподібною перегородкою довжиною 7 мм в області максимального термомагнітного поля для газових сумішей: 1-  $O_2 - N_2$ ; 2 -  $O_2 - CO_2$ ; 3 -  $O_2 - He$

характеристики газоаналізатора зі зменшеним "роторним" ефектом для цих різних газових сумішей приведені на рис. 7.

З результатів досліджень було зроблено висновок, що найбільший вплив на статичну характеристику приладу чинить хрестоподібна перегородка, довжина якої співпадає з довжиною зони максимального термомагнітного поля (приблизно 7 мм), що розташована в області максимального термомагнітного поля, тобто між магнітними наконечниками в області першої спіралі термоанемометра.

З рис. 7 слід, що перегин статичних характеристик газоаналізатора для газової суміші  $He + O_2$  відсутній, а нелінійність статичних характеристик для газових сумішей  $N_2 + O_2$  і  $CO_2 + O_2$  суттєво зменшено (у порівнянні з аналогічними кривими рис. 2).

Як показують експериментальні дослідження, нелінійність статичних характеристик залежить і від температури нагріву термоанемометра. При цьому в газоаналізаторах без перегородки нелінійність збільшується, а при наявності перегородки – зменшується.

Аналізуючи криві, що показано на рис. 7, бачимо, що наявність перегородки в максимальному термомагнітному полі призводить з однієї сторони до зменшення чутливості перетворення приблизно в 1,8 рази і зменшення впливу зміни складу некісневої частини газової суміші. З іншого боку суттєво зменшилася нелінійність статичних характеристик, що дає можливість вимірювати високі концентрації кисню в присутності легких газів таких як водень і гелій. Особливе значення має те, що статичні характеристики для газових сумішей  $N_2 + O_2$  і  $H_2 + O_2$  близькі між собою, що дозволяє будувати автоматичні газоаналізатори для вимірювання кисню в азотно-водневих сумішах виробництва аміаку, метанолу, оцтової кислоти та інших.

Експериментальні статичні характеристики термомагнітного газоаналізатора з корекцією за "роторним" ефектом наведено на рис. 8. Для їх побудови використано сумарно - різницевий метод і коефіцієнти корегування статичних характеристик

(кисень – двоокис вуглецю  $K_{opt}=2.251$ , кисень – азот  $K_{opt}=1.752$ , кисень – гелій  $K_{opt}=1.051$ ). Внаслідок цього отримано статичну характеристику термомагнітного газоаналізатора, відхилення якої від лінійної буде мінімальним. Слід підкреслити, що характеристика отримана таким шляхом, лінійна на всьому діапазоні вимірювання концентрацій кисню від 0 до 100 %, а прилад, що побудовано за таким принципом, має вдвічі більшу чутливість до зміни концентрації кисню в АГС.

Рис. 8. Експериментальні статичні характеристики термомагнітного газоаналізатора з корекцією за "роторним" ефектом:  
1 -  $O_2 - N_2$ ; 2-  $O_2 - CO_2$ ; 3-  $O_2 - H_2$ ; 4-  $O_2 - He$

Механізм отримання лінійної статичної характеристики термомагнітного газоаналізатора з корекцією за "роторним" ефектом приведено раніше (див. рис. 6).

Так як експериментальні характеристики достатньо точно співпадають з характеристиками, які розраховані теоретично, то це дозволяє зробити висновок про те, що розроблені математичні моделі є адекватними і достатньо точно описують процес вимірювання концентрації кисню термомагнітним методом.

Аналізуючи характеристики, які наведено на рис. 8, слід підкреслити, що відхилення між ними суттєво зменшено (у порівнянні з кривими рис.2). Це свідчить про те, що для термомагнітного га-

зоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом суттєво зменшено вплив зміни складу некісневої частини АГС на показання приладу, тобто за допомогою одного приладу можна вимірювати концентрацію кисню від 0 до 100% в різних газових сумішах. Крім того, похибка визначення концентрації кисню запропонованим газоаналізатором на 60% менша у порівнянні з похибкою звичайного термомагнітного газоаналізатора. Вірогідність контролю концентрації кисню в газових сумішах запропонованим приладом досягає значення  $D = 0.943$ .

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі обґрунтовано та теоретично проаналізовано явище “роторного” ефекту, що має місце у неоднорідному термомагнітному полі термомагнітного газоаналізатора і є причиною виникнення нелінійності статичної характеристики приладу.

З метою покращення метрологічних характеристик термомагнітного газоаналізатора, а саме збільшення чутливості та розширення діапазону вимірювання, в роботі було вирішені такі питання:

1. Вивчено та описано за допомогою математичних рівнянь процес руху парамагнітного газу в термомагнітному полі з використанням системи рівнянь Больцмана, яка описує процеси, що мають місце в термомагнітному полі, методу нульового градієнту та функції Дірака. Це підтвердило, що характер руху парамагнітного газу в області максимального термомагнітного поля не є ламінарним, незважаючи на незначну швидкість руху газового потоку.

2. Досліджено вплив параметрів ламінеризуючої перегородки на статичну характеристику термомагнітного газоаналізатора, що дозволило на 50 % зменшити нелінійність статичної характеристики.

3. Розроблено математичну модель чутливого елемента термомагнітного газоаналізатора з “роторним” ефектом та без нього, що дозволило запропонувати нову конструкцію вимірювальної камери термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом.

4. Удосконалено коефіцієнти корегування статичних характеристик термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом для різних газових сумішей, що дозволило лінеаризувати статичну характеристику приладу та зменшити вплив невимірюваного компонента аналізованої газової суміші. Встановлено, що значення корегувального коефіцієнта залежить від молекулярної маси невимірюваного компонента.

5. Проведено аналіз метрологічних характеристик термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом варіаційним методом, на підставі якого було зроблено висновок, що, у порівнянні зі звичайним термомагнітним газоаналізатором з внутрішньою термомагнітною конвекцією, його похибка від зміни температури навколишнього середовища менша на 30%, крім того, температурна похибка запропонованого приладу практично лінійно залежить від зміни температури, тому в цьому приладі можна відмовитися від термостатування датчика, а використати компенсуючий термоопір; від зміни барометричного тиску на 20%, а похибка від зміни складу некісневої частини газової суміші є зовсім неістотною (не перевищує 1%), .

6. Розроблено конструкцію вимірювальної камери термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом та вирішено ряд питань, що стосуються технології виготовлення запропонованого приладу.

7. Проведено експериментальні дослідження термомагнітного поля, які показали, що при наявності в газовій суміші кисню, виникає турбулізація газового потоку, яка має місце тільки в області максимальної напруженості магнітного поля. Причому характер турбулентного потоку залежить від фізичних властивостей невимірюваної частини газової суміші.

На підставі цього розроблено термомагнітний газоаналізатор з корекцією за “роторним” ефектом, що на відміну від звичайних термомагнітних газоаналізаторів, характеризується удвічі вищою чутливістю, на 60% більшою точністю, його показання практично не залежать від зміни складу некісневої частини АГС, а вірогідність контролю при цьому досягає  $D = 0.943$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стенцель Й. І., Целіщев О. Б., Єлисеєв П. Й. Теплофізичні моделі перетворень в термомагнітному полі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2003.- №1. - С. 26-29.
2. Стенцель Й. І., Целіщев О. Б., Єлисеєв П. Й. Розробка моделі руху парамагнітного газу в неоднорідному термомагнітному полі // Вісник Криворізького технічного університету: Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: КТУ (Криворізький технічний університет), 2003.- Випуск №2. - С. 101-103.
3. Целіщев О. Б. Математична модель термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2003.- №2. С 69-72.
4. Патент України на корисну модель 2941 МКВ G 01 N 27/72. Термомагнітний газоаналізатор / Целіщев О. Б., Стенцель Й. І.; Заявл. 09. 12. 03; Опубл. 15.09.2004. Бюл. 9.- 11 с.
5. Целіщев О. Б. Оптимізація статичних характеристик термомагнітного газоаналізатора // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск: УГХТУ, 2004.- №5. С. 223-225.
6. Стенцель Й. І., Целіщев О. Б. Термомагнітний газоаналізатор з лінійною статичною характеристикою // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП (Технологічний університет Поділля), 2002. Том 1.- С. 53-56.
7. Целіщев О.Б. Математична модель термомагнітного газоаналізатора з внутрішньою термомагнітною конвекцією // Тези доповідей X-ої міжнародної науково-технічної конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Хмельницький. – 2003. – С. 18.
8. Целіщев О.Б. Дослідження кінетичної дії термомагнітного поля на статичну характеристику термомагнітного газоаналізатора // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів , аспірантів та молодих вчених “Технологія 2001”. - м. Северодонецьк: Видання Северодонецького технологічного інституту. – 2001. – С. 97-98.
9. Целіщев О.Б. Математична модель термомагнітного газоаналізатора з лінійною статичною характеристикою // збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (на підставі матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції “Університет та регіон” 25-26 грудня 2002 року):науковці підприємствам і установам регіону // За заг. ред. проф. О.Л. Голубенка. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац ун-ту ім. В. Даля, 2002. –Частина перша. – С. 238 –239.
10. Стенцель Й.І., Целіщев О.Б., Єлисеєв П.Й. Теплофізичні моделі перетворень в термомагнітному полі // Тези доповідей X-ої міжнародної науково-технічної конференції “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Хмельницький. – 2003. – С. 17.
11. Целіщев О.Б., Стенцель И.И. Многопредельный термомагнитный газоанализатор // Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (на підставі матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції “Університет та регіон” 25-26 грудня 2002 року):науковці підприємствам і установам регіону // За заг. ред. проф. О.Л. Голубенка. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац ун-ту ім. В. Даля, 2002. –Частина перша. – С. 241 –242.
12. Целіщев О.Б. Фізичні моделі перетворень в термомагнітному полі // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів , аспірантів та молодих вчених “Технологія 2003”. - м. Северодонецьк: Видання Северодонецького технологічного інституту. – 2003. – С. 57-59.
13. Целіщев О.Б. Дослідження температурних похибок термомагнітних газоаналізаторів // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів , аспірантів та молодих вчених “Технологія 2004”. - м. Северодонецьк: Видання Северодонецького технологічного інституту. – 2004. – С. 6 - 8.

## АНОТАЦІЯ

**Целіщев О.Б. Термомагнітний газоаналізатор з корекцією за “роторним” ефектом. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2004.

Дисертацію присвячено дослідженню процесів теплофізичних перетворень у термомагнітному полі та розробці термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом. Розроблено математичні моделі термомагнітного газоаналізатора, які враховують неламинарний характер руху парамагнітного газу в неоднорідному термомагнітному полі, що дозволило запропонувати для обробки результатів вимірювань сумарно-різницевий метод. Знайдено значення оптимального коефіцієнта статичної характеристики для різних газових сумішей, який залежить від властивостей невимірюваного компонента АГС, що дозволило покращити метрологічні характеристики газоаналізатора.

Виконано метрологічний аналіз термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом на підставі варіаційного методу, що дозволило сформулювати вимоги на виготовлення приладу.

Розроблено нову конструкцію первинного вимірювального перетворювача термомагнітного газоаналізатора з корекцією за “роторним” ефектом. Проведено експериментальні дослідження запропонованого приладу, з яких зроблено висновок, що він характеризується практично лінійною статичною характеристикою в межах від 0 до 100% об. кисню в АГС, удвічі більшою чутливістю та практичною незалежністю показань від зміни складу некісневої частини АГС.

Ключові слова: кисень, магнітна сприйнятливність, термомагнітний метод вимірювань, неоднорідне термомагнітне поле, “роторний” ефект, математична модель, статична характеристика, метрологічний аналіз.

## АННОТАЦИЯ

**Целищев А.Б. Термомагнитный газоанализатор с коррекцией по “роторному” эффекту.**  
- Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2004.

Диссертация посвящена исследованию процессов теплофизических преобразований в термомагнитном поле и разработке термомагнитного газоанализатора с коррекцией по “роторному” эффекту. Разработаны математические модели термомагнитного газоанализатора, которые учитывают неламинарный характер движения парамагнитного газа в неоднородном термомагнитном поле, что позволило использовать для обработки результатов измерений суммарно-разностный метод. Найдены значения корректировочных коэффициентов статической характеристики для различных газовых смесей, которые зависят от особенностей неизмеряемого компонента АГС, что позволило улучшить метрологические характеристики газоанализатора.

Выполнен метрологический анализ термомагнитного газоанализатора с коррекцией по “роторному” эффекту на основе вариационного метода, что позволило сформулировать требования к изготовлению прибора.

Разработана новая конструкция первичного измерительного преобразователя термомагнитного газоанализатора с коррекцией по “роторному” эффекту. Проведены экспериментальные исследования предложенного прибора, на основании которых был сделан вывод о том, что он характеризуется практически линейной статической характеристикой в пределах от 0 до 100 % об. кислорода в АГС, вдвое большей чувствительностью, а его показания практически не зависят от изменения состава некислородной части АГС.

Ключевые слова: кислород, магнитная восприимчивость, термомагнитный метод измерений, неоднородное термомагнитное поле, “роторный” эффект, математическая модель, статическая характеристика, метрологический анализ.

**ABSTRACT**

**Tselishhev A. B. Thermo-magnetic gas analyzer with compensation of "rotor" effect.** - Manuscript.

Ph. D. thesis by subject field 05.11.13 - Methods and instrumentation for control and determination of substance formulation. – Vinnitsa national technical university. - Vinnitsa, 2004.

The thesis is dedicated to investigations of thermo-physical transformation processes within a magnetothermal field and a development of a thermo-magnetic gas analyzer with compensation of a "rotor" effect.

A study of methods used for oxygen determination in gas mixtures was carried out. The thermo-magnetic method was concluded to be the most promising one for development of the universal gas analyzer intended for the oxygen determination.

A flow of the gas mixture containing a paramagnetic gas component was shown to be not laminar within a nonuniform magnetothermal field in spite of the low flow velocity. Mathematical models for a thermo-magnetic gas analyzer were developed by taking into consideration the peculiarities of the thermo-magnetic method. The models allowed the conclusion to be reached that a nonlinearity of the instrument static characteristic is explained mainly by the nonlaminarity of the gas flow in maximum magnetothermal field zone (by a "rotor" effect).

There is proposed a measuring cell with two heat loss anemometers located parallel to each other between magnetic pole pieces, wherein one of the anemometers contains a cross-shaped mica baffle for flow laminarization. The output signals of two measuring circuits are processed by integral-and-differential method with a correction factor. The optimization of the static characteristic for the instrument proposed was carried out by the least-squares method. The value of the correction factor was shown to depend on properties of an immeasurable component of a gas mixture as measured.

There is improved a method used for the compensation of the "rotor" effect due to application of flow laminarization baffles. There is investigated an influence of the baffle shape, sizes and spatial location on the static characteristic of the gas analyzer.

A metrological analysis of the instrument is carried out by a variational method, which allows to show up the influence of measurement conditions on the result accuracy. The analysis enabled to formulate a few requirements and recommendations for production of the thermo-magnetic gas analyzer with compensation of the "rotor" effect.

Theoretical results were confirmed when experimental investigations of the gas analyzer by application of oxygen-nitrogen, oxygen-carbon dioxide, oxygen-helium and oxygen-hydrogen mixtures. The investigations showed that the instrument has a practically linear characteristic over the range 0 to 100 vol. % of oxygen content in the gas mixture as measured and two times higher sensitivity, more over, the reading does not practically depend on the content of nonoxygen components in the gas mixture as measured.

Key words: oxygen, magnetic susceptibility, thermo-magnetic measurement method, nonuniform magnetothermal field, "rotor" effect, mathematical model, static characteristic, metrological analysis.