

УДК 621.318.23, 621.3.084.2, 543.27.08

О.В. Борисов, канд. техн. наук, І.С. Дейнека, Б.І. Лупина, Р.М. Чобік

Експериментальне дослідження термомагнітного аналізатора процентного вмісту кисню в повітряній суміші

Приведено вираження залежності со-
противлення чутливого елемента
первичного преобразователя от концен-
трації кисню. Описана структура и про-
граммное забезпечення створеної експери-
ментальної установки. Проаналізовані
експериментальні результати дослідова-
ння залежності со-
противлення чутливого елемента термомагнітного датчика
кисню від концентрації O_2 в газовій
сміші для різних значень напруженості
магнітного поля і потужності, розсіяваної
на чутливому елементі.

The expression for primary transformer's
resistance in dependence of oxygen con-
centration is proposed. The structure and soft-
ware of the experimental plant is described.
Experimental dependences are obtained and
analyzed for different values of heterogeneous
magnetic field intensity and power, which was
dispersed on a sensing element.

Ключевые слова: термомагнітна кон-
векція, датчик кисню.

Вступ

Термомагнітний метод аналізу складу газо-
вої суміші оснований на явищі термомагнітної
конвекції в неоднорідному магнітному полі за
наявності в ньому градієнту температури. Під
термомагнітною конвекцією розуміють конвекцію
газу, який оточує розігріте тіло, розміщене в не-
однорідному магнітному полі. Кисень
вирізняється з-поміж інших газів своїми яскраво
вираженими парамагнітними властивостями.
Його об'ємна магнітна сприйнятливості за нор-
мальних умов має значення $1,78 \cdot 10^{-6}$, у той час
як об'ємна магнітна сприйнятливості азоту ста-
новить $-6,3 \cdot 10^{-9}$, аргону – $-1 \cdot 10^{-8}$, вуглекислого
газу – $-1,1 \cdot 10^{-8}$ [1]. Аналіз літературних джерел
[2, 3] показує, що термомагнітні датчики концен-
трації кисню знаходять сьогодні широке за-
стосування у медицині та промисловості, проте
залишаються актуальними питання покращення
їх метро-логічних характеристик та підвищення
чутливості первинного перетворювача. Акту-
альним також є питання розробки теоретичної
моделі, яка описувала б залежність опору чу-
тливого елемента термомагнітного датчика від
концентрації кисню в газовій суміші. Метою да-

ної роботи є експериментальне дослідження
термомагнітного аналізатора процентного
вмісту кисню в повітряній суміші за допомогою
апаратного комплексу «NI Elvis II» з використан-
ням програмного забезпечення «LabVIEW 8.6».

Теоретична залежність опору чутливого елемента термомагнітного датчика від кон- центрації кисню в газовій суміші

Широко розповсюджені термомагнітні датчи-
ки концентрації кисню на основі вимірювального
мосту Уїтстона (рис. 1, а).

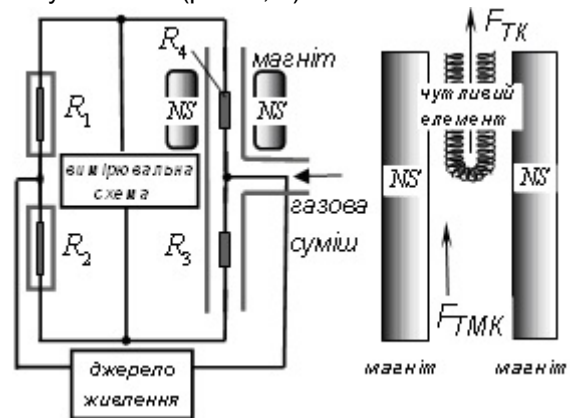


Рис. 1. Термомагнітний датчик концентрації кисню
на основі мосту Уїтстона (а); сили, які діють на
газову суміш у неоднорідному магнітному полі
поблизу чутливого елемента (б)

Аналізована газова суміш прокачується че-
рез вимірювальний канал, в якому розміщено
чутливі елементи R_3 та R_4 (платинові або
вольфрамові спіралі). Чутливий елемент R_4
знаходиться у неоднорідному магнітному полі,
яке створюється постійними магнітами. Чим ви-
ще концентрація кисню в аналізованій суміші,
тим активніше обдуватиметься чутливий еле-
мент R_4 у порівнянні з R_3 , що спричинить
розбаланс мосту.

Традиційно в якості термомагнітного датчика
кисню використовують окремий чутливий еле-
мент, поміщений у неоднорідне магнітне поле.
Через чутливий елемент пропускається елек-
тричний струм, що викликає нагрівання елемен-
ту та спричиняє виникнення теплової конвекції.
Магнітне поле обумовлює виникнення термо-
магнітної конвекції. На об'єм газу, який знахо-
диться біля чутливого елемента в магнітному
полі, діють чотири сили: гравітаційна сила та

сила в'язкості, які в рамках наведеної нижче моделі не враховувались, сила теплової конвекції F_{TK} та сила термомагнітної конвекції $F_{ТМК}$ (рис. 1, б). Газова суміш, яка включає в себе діа- та парамагнітні гази, при контакті з розігрітим чутливим елементом змінює свою температуру від T_0 до T . Для суміші газів, частина якої – парамагнітні гази з магнітною сприйнятливістю за нормальних умов $\chi_{об}^n$ та концентрацією q , а інша частина – діамагнітні гази з магнітною сприйнятливістю за нормальних умов $\chi_{об}^d$, на основі викладеного у [4], можемо записати вираз для сили, яка діє на одиницю об'єму суміші V з боку неоднорідного магнітного поля (рис. 1, б):

$$F_{ТМК} = T_0 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \cdot \left[q T_0 \chi_{об}^n \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T} \right) + (1-q) \chi_{об}^d \right] \cdot V \cdot H \frac{dH}{dx}, \quad (1)$$

де H - напруженість магнітного поля між магнітами, $\frac{dH}{dx}$ - похідна напруженості магнітного поля по відстані від краю магніту до його центру.

У відповідності до викладеного у [4] сила теплової конвекції F_{TK} , що діє на одиницю об'єму газової суміші V , нагріту відносно температури оточуючого середовища, густина якої за нормальних умов становить ρ_0 за прискорення сили тяжіння $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$ дорівнює:

$$F_{TK} = \rho_0 T_0 g \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \cdot V. \quad (2)$$

З урахуванням викладеного у [4], аналітичний вираз для залежності опору чутливого елемента від концентрації кисню q в газовій суміші, отриманий авторами, має вигляд:

$$R = \frac{1}{2} R_0 (1 + \alpha T_0) \times \left[1 + \frac{4\alpha U^2}{R_0 (1 + \alpha T_0)^2} \left(\frac{1}{1+n} \left[\frac{q T_0 \chi_{об}^n \left(\frac{1}{T_0} + \frac{1}{T} \right) + (1-q) \chi_{об}^d}{\rho_0 g} \right] H \frac{dH}{dx} \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

де: $R_0 [Ом]$ - опір чутливого елемента за кімнатної температури, $\alpha \left[\frac{1}{\text{C}} \right]$ - температурний коефіцієнт опору (ТКО) чутливого елемента, $U [В]$ - напруга на чутливому елементі, n - коефіцієнт пропорційності, який за результатами експериментів [4] для діапазону темпе-

ратур нагрівача $0...400^\circ\text{C}$ та вмісту кисню в газовій суміші $0...90\%$: $n = (5...8) \cdot 10^{-4}$, $A_0 \left[\frac{Вм}{\text{C}} \right]$ - тепловіддача нагрівача (або питомий тепловий потік) за об'ємної концентрації кисню в суміші 21%.

Експериментальна установка для дослідження термомагнітного датчика концентрації кисню

Схему експериментальної установки наведено на рис. 2. Скляна камера циліндричної форми (1) закріплена на пластиковій основі (2) за допомогою герметичних силіконових прокладок (3). На дні камери розташований алюмінієвий каркас (4) з регулюючим стрижнем (5), за допомогою якого можна змінювати відстань між постійними неодимовими магнітами NdFeB (6). Вольфрамова спіраль (7), яка виконує роль чутливого елемента експериментального зразка, розміщена між магнітами, як це показано на рис. 1, б. Всередині камери за допомогою алюмінієвих балок (8) закріплені датчик вологості (9) "Honeywell ННН-4010", датчик температури (10) типу "Pt-100", датчик напруженості магнітного поля (11) "Philips КМЗ10С". У верхній частині скляної камери закріплено датчик концентрації кисню (12). Датчик концентрації кисню виробництва японської фірми "Figaro Engineering Inc" (модель KE-50) представляє собою свинцевий гальванічний елемент, який включає свинцевий анод, золотий катод та кислотний електроліт (рис. 3). Основні параметри датчика: діапазон об'ємних концентрацій кисню: $0...100\%$, точність $\pm 1\%$, час відгуку 60 секунд, діапазон робочих температур: $+5^\circ\text{C}...+40^\circ\text{C}$, чутливість $2,5 \text{ мВ}/\%$. В пластиковій основі (2) вирізано 4 отвори діаметром 6 мм, в яких закріплено алюмінієві трубки (13) з зовнішнім діаметром 5 мм, внутрішнім діаметром 3 мм. Зазор між трубками та стінками отворів герметизований силіконовою замазкою (14). На зовнішню частину алюмінієвих трубок надіті поліетиленові трубки (15) з внутрішнім діаметром 3 мм, зовнішнім діаметром 6 мм. Фотознімок установки наведено на рис. 4.

За допомогою компресора, який складається з двигуна постійного струму (16) та передавального механізму (17) об'єм камери відкачується до заданого значення (мінімальне значення тиску в камері обмежено потужністю компресора та становить 90 кПа). Різниця між атмосферним тиском та поточним значенням тиску в камері

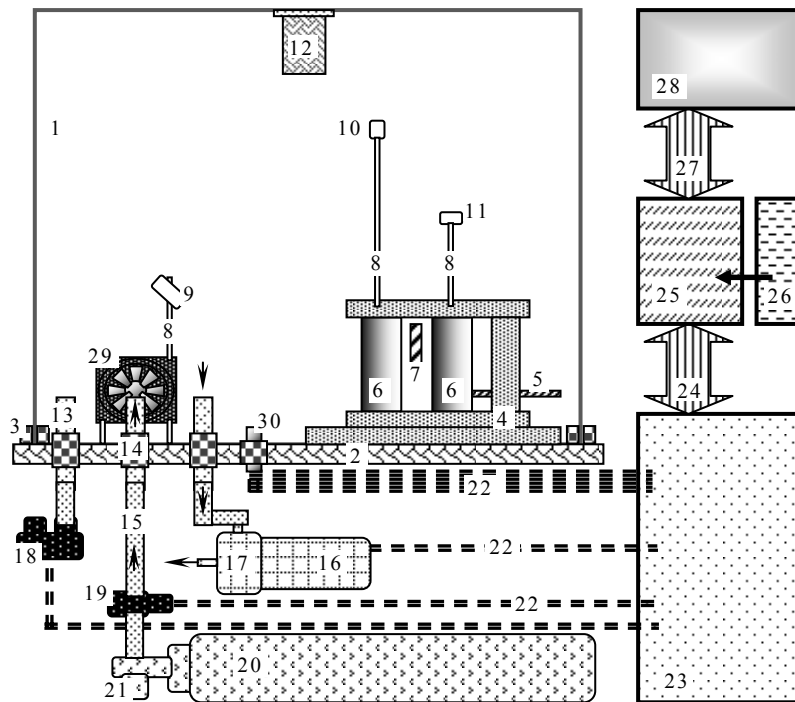


Рис. 2. Схема експериментальної установки. Стрілками показано напрями переміщення газової суміші

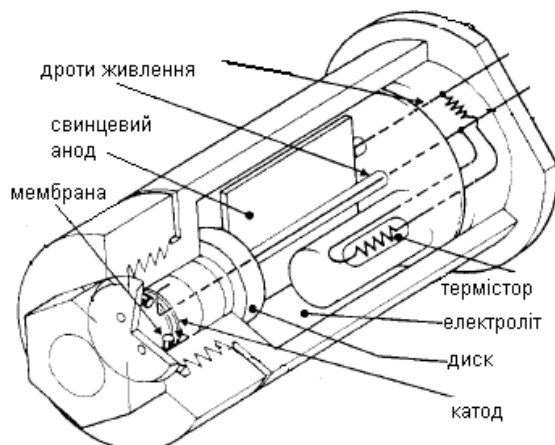


Рис. 3. Внутрішня структура датчика концентрації кисню KE-50

вимірюється датчиком тиску "Motorola DP-5010" (18). Як тільки тиск в камері досягає заданого значення, компресор переходить в режим підтримання постійного тиску в камері за рахунок зменшення напруги на обмотці двигуна постійного струму.

Напуск кисню в камеру відбувається за рахунок відкриття клапану (19). Кисень з балону (20) через редуктор (21) поступає в об'єм камери. Після вирівнювання тисків всередині та ззовні камери клапан автоматично закривається, після чого компресор переходить в режим відкачування. В результаті описаної послідовності дій концентрація кисню в камері збільшується, її постійний контроль забезпечується датчиком (12). Всередині камери поруч з отворами розміщено вентилятор (29), який забезпечує примусове перемішування газової суміші всередині камери для забезпечення

рівномірного розподілу концентрації кисню по робочому об'єму установки, а також для підтримання рівномірного температурного поля в камері. Сигнальні дроти датчиків та дроти живлення всередині камери на рис.2 не показані. Їх виведення за межі камери виконано герметично за рахунок використання термоусадкової трубки (30), заповненої силіконом.

Датчики, компресор та клапан за допомогою сигнальних дротів (22) під'єднані до макетної плати "NI Protoboard" (23), яка через PCI-роз'єм (24) підключена до програмно-апаратного комплексу "NI Elvis II" (25). Живлення комплексу забезпечується мережевим блоком (26). Програмно-апаратний комплекс "NI Elvis II" через USB-інтерфейс (27) підключено до персонального комп'ютера (28) з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW 8.6.

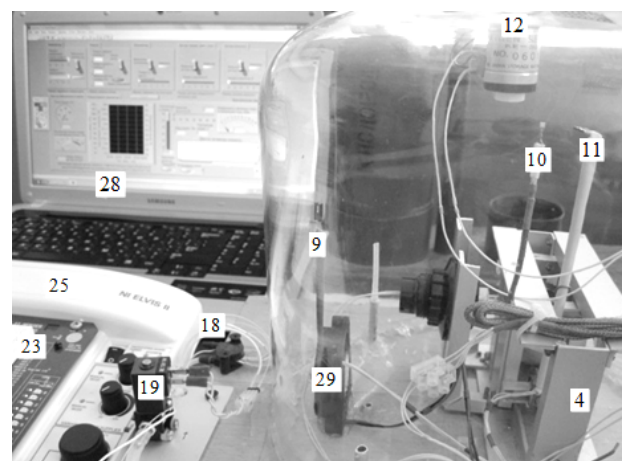


Рис.4. Фотознімок експериментальної установки

Опис програмного забезпечення експериментальної установки

Для відображення інформації, яка поступає на комп'ютер, авторами створено програму у пакеті LabVIEW 8.6, код якої наведено на рис. 5.

Програмний код містить декілька блоків, кожен з яких виконує свою функцію. Блок управління клапаном та компресором забезпечує цикл «відкачування – напуск газової суміші в камеру» та містить елементи управління та індикації роботи компресора і повітряного клапану. Блок контролю тиску в камері дозволяє встановлювати значення тиску, до якого відкачується повітряна суміш, та зчитувати показання

датчика тиску. Блок вимірювання температури в камері є стандартним елементом з вбудованих бібліотек “LabVIEW 8.6”, він реалізує підключення до програмно-апаратного комплексу “NI Elvis II” термометра опору Pt-100. Управління вентилятором забезпечується відповідним блоком, який дозволяє регулювати швидкість обертання вентилятора за рахунок зміни напруги на його двигуні. Вимірювання напруженості магнітного поля в контрольній точці забезпечується блоком датчика магнітного поля, а контроль відносної вологості в камері відбувається за рахунок блока датчика вологості. Визначення поточної концентрації кисню в камері реалізується блоком «Розрахунок концентрації кисню в камері».

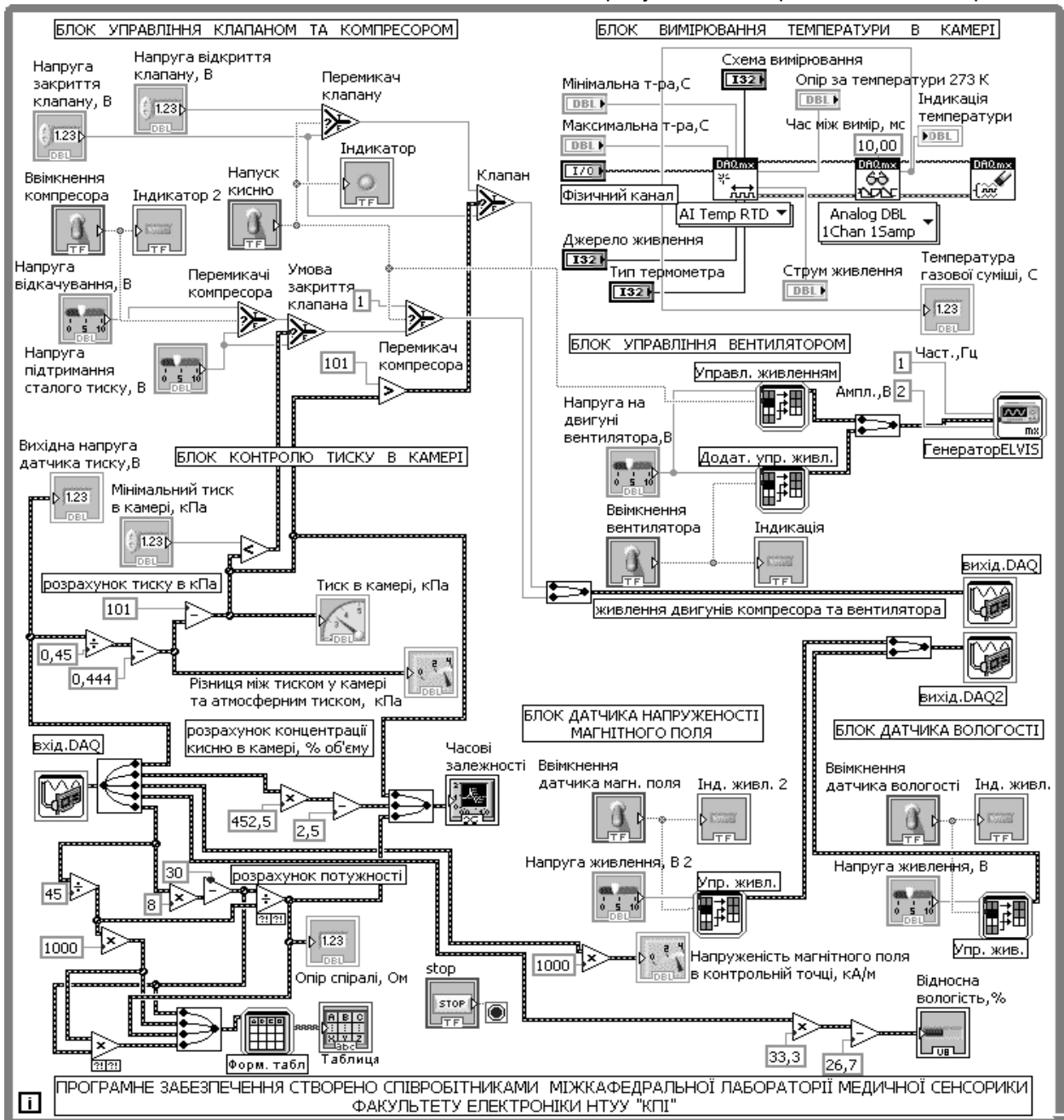


Рис.5. Код програмного забезпечення експериментальної установки

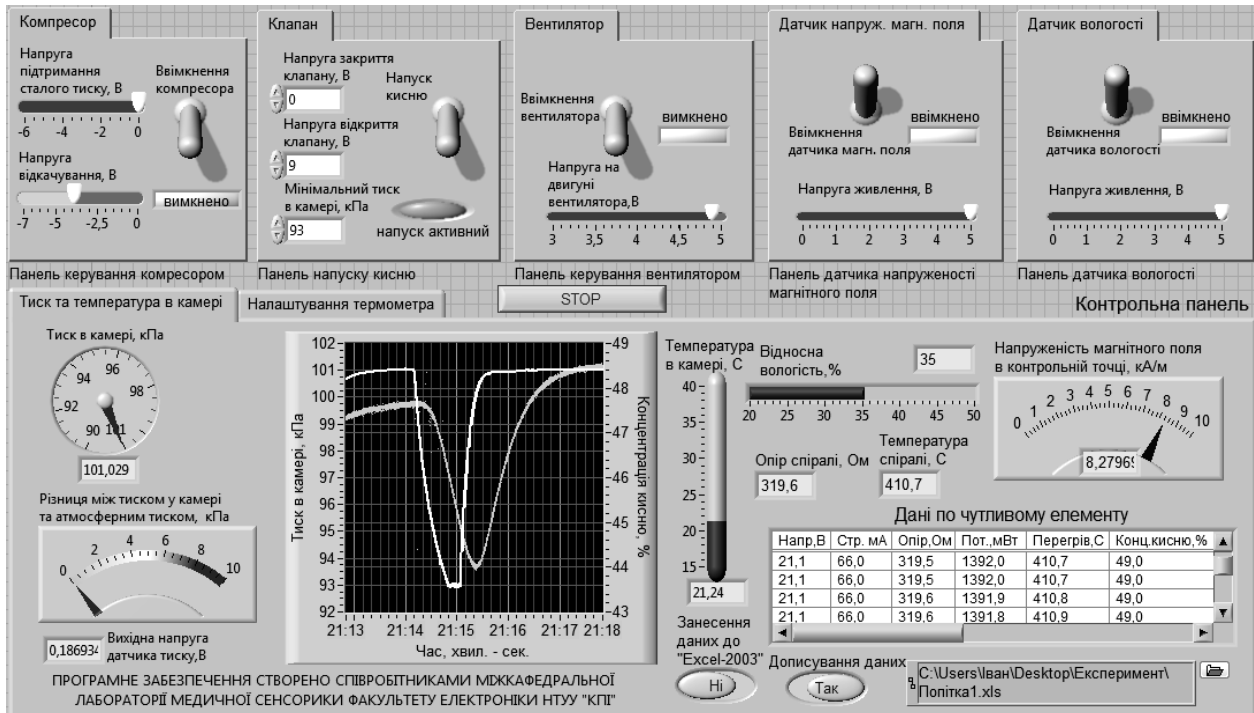


Рис. 6. Передня панель програмного забезпечення експериментальної установки

Підпрограми «Форм. таблиці» та «Часові залежності» дозволяють виводити на передню панель результати експерименту у формі графіків та таблиць відповідно. На рис.6 представлена передня панель програми. У верхній частині на окремих панелях розміщено елементи управління компонентами експериментальної установки, в нижній частині знаходяться елементи індикації, екран для виведення графічних залежностей і таблиці експериментальних даних.

Отримані експериментальні результати

На рис. 7 наведено графіки зміни тиску в камері, опору чутливого елемента експериментального зразка та концентрації кисню в робочому об'ємі у часі протягом трьох циклів відкачування камери. Потужність, що розсіюється на чутливому елементі, становить 1,38 Вт, напруга 21,2 В, температура чутливого елемента 419,8°C, напруженість магнітного поля в контрольній точці 8 кА/м, температура газової суміші 22°C, відносна вологість суміші 34%.

Відстань між магнітами експериментального зразка становила 15 мм, що відповідає напруженості магнітного поля 90 кА/м та градієнту напруженості 7000 кА/м². Різке зменшення опору чутливого елемента в момент часу $t = 18$ год. 22 хв. обумовлене ввімкненням вентилятора, що викликало виникнення додаткового масопереносу в камері. Зростання опору під час відка-

чування камери пояснюється погіршенням теплообміну чутливого елемента з оточуючим середовищем при зменшенні тиску в робочому об'ємі. Після першого циклу відкачування камери до 93 кПа концентрація кисню становила 24%, опір 324,8 Ом; після другого циклу відкачування концентрація кисню становила 27 %, опір 323,9 Ом; після третього циклу відкачування концентрація кисню становила 30%, опір 323,1 Ом. На рис.8 представлені часові залежності зміни тиску в камері, опору чутливого елемента експериментального зразка та концентрації кисню в робочому об'ємі за напруги на чутливому елементі $U = 11,2$ В.

Наведені залежності показують, що за вказаної потужності, яка розсіюється на чутливому елементі, чутливість експериментального зразка за концентрації кисню в робочому об'ємі 45% становила 0,15 Ом/%. Потужність, яка розсіюється на чутливому елементі, становить 0,585 Вт.

Наведені на рис. 9 дані свідчать про справедливість виразу (3) у випадку невисоких (до 90 кА/м) напруженостей магнітного поля. Відхилення експериментальних точок від теоретичної кривої за напруженості магнітного поля 200 кА/м можна пояснити тим, що зменшення відстані між магнітами до 10 мм призводить до їхнього перегрівання за рахунок розсіюваної на чутливому елементі потужності.

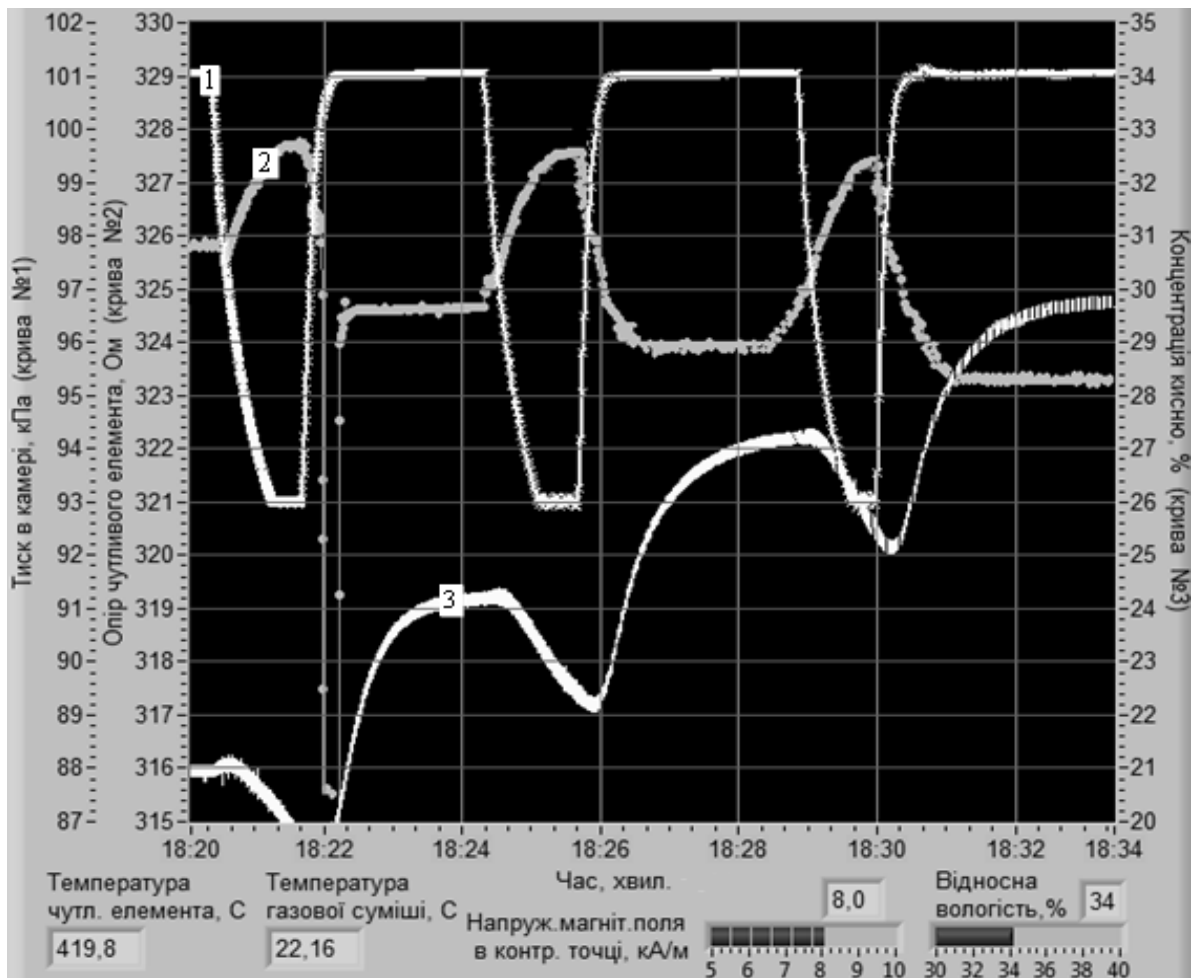


Рис.7. Часові залежності тиску в камері, опору чутливого елемента експериментального зразка та концентрації кисню за три цикли відкачування камери до 93 кПа

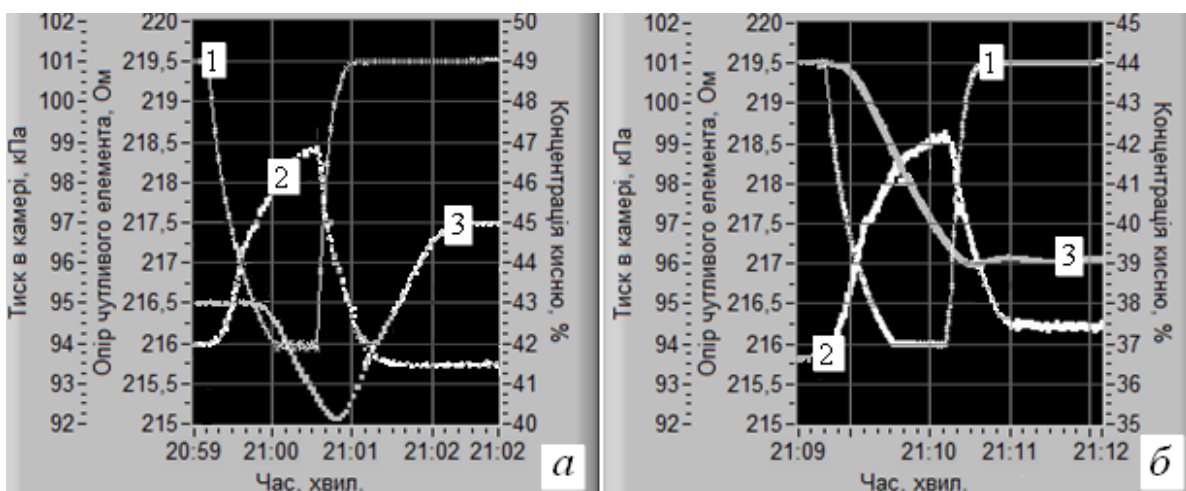


Рис.8. Часові залежності зміни тиску в камері, опору чутливого елемента експериментального зразка при збільшенні концентрації кисню від 43% до 45% (а); при зменшенні концентрації кисню від 44% до 39% (б)

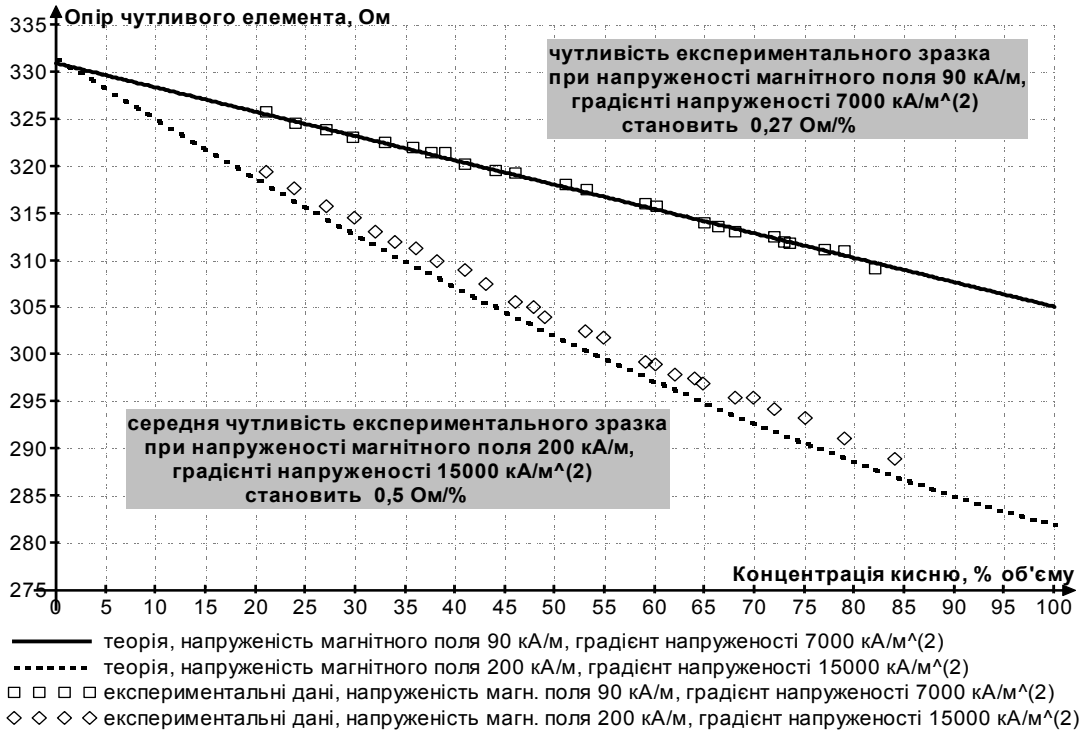


Рис. 9. Експериментальні та розрахункові залежності опору чутливого елемента від концентрації кисню в газовій суміші. Потужність, яка розсіюється на чутливому елементі, 1,38 Вт

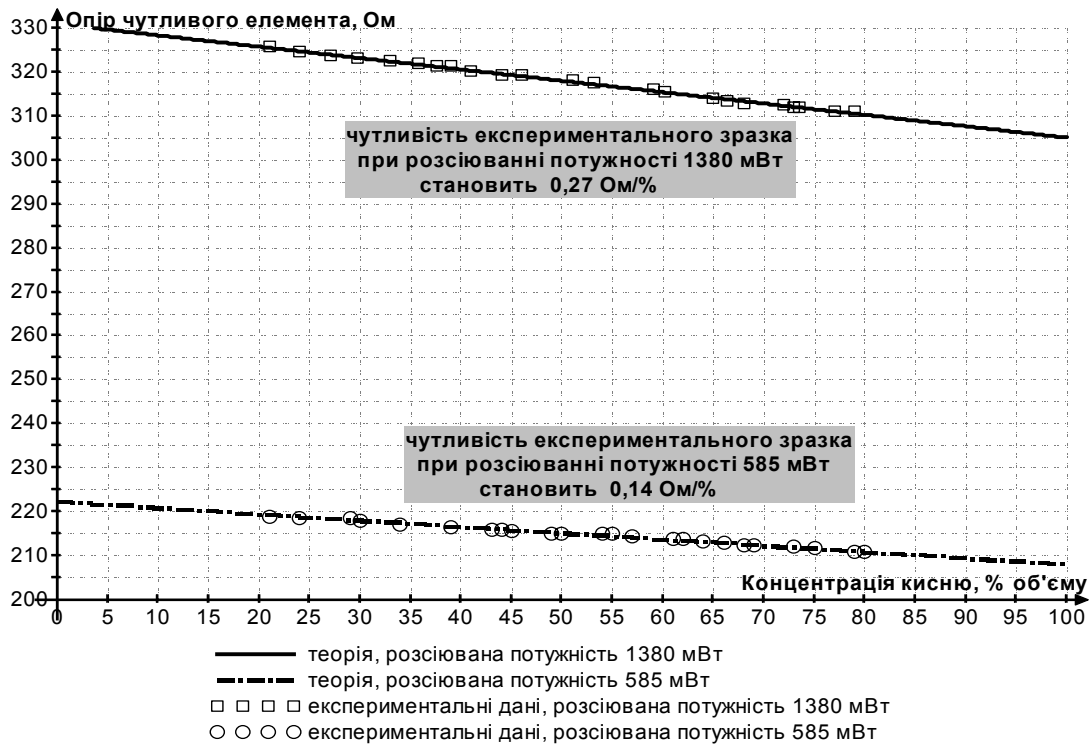


Рис. 10. Експериментальні та розрахункові залежності опору чутливого елемента від концентрації кисню в газовій суміші. Напруженість неоднорідного магнітного поля між магнітами 90 кА/м, градієнт 7000 кА/м

Середнє значення чутливості експериментального зразка термомагнітного датчика концентрації кисню становить 0,14 Ом/% для розсіюваної потужності 0,59 Вт та 0,26 Ом/% для потужності 1,38 Вт за напруженості магнітного поля 90 кА/м.

Висновки

1. Отримані експериментальні залежності опору чутливого елементу від концентрації кисню для різних значень напруженості магнітного поля показують, що характеристика перетворення термомагнітного датчика концентрації кисню є практично лінійною при напруженнях магнітного поля до 90 кА/м. У випадку збільшення напруженості до 200 кА/м характеристика втрачає лінійність при одночасному зростанні чутливості.

2. Зменшення відстані між магнітами до 10 мм, яке забезпечує зростання напруженості неоднорідного магнітного поля до 200 кА/м, є причиною їх небажаного перегрівання.

3. Збільшення потужності, яка розсіюється на чутливому елементі, збільшує чутливість датчика. Середнє значення чутливості за напруженості магнітного поля 90 кА/м для

Література

1. Никольский Б.П. Справочник химика, т. 4: Аналитическая химия, спектральный анализ, показатели преломления. / Никольский Б.П. – Л.: Химия, 1987. – 461 с.
2. Richard Paul Kovachich. Compact paramagnetic oxygen sensor / Richard Paul Kovachich, Colin Geoffrey Stocks, and others / UK Patent № 0821181.5, 19/11/2008.
3. Jun-Han Lee. Design of an Acousto-Magnetic Oxygen Sensor / Jun-Han Lee , Cheng-Lun Tsai, Chi-Shyan Fann, Shyh-Hau Wang // Journal of Medical and Biological Engineering, – 22(2002) – p. 193-198.
4. Агейкин Д.И. Магнитные газоанализаторы. / Агейкин Д.И. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 216 с.