

JANUSZ PIOTROWSKI

Katedra Miernictwa Przemysłowego

O KONWEKCJI TERMOMAGNETYCZNEJ  
W ANALIZATORACH TLENU<sup>\*)</sup>

Streszczenie: Zjawisko konwekcji termomagnetycznej jest praktycznie wykorzystane do pomiaru stężenia tlenu. Wykorzystuje się zależność strat cieplnych od stężenia tlenu. Przedstawiono interpretację zjawiska i sposób obliczenia strat cieplnych przez konwekcję termomagnetyczną stosowane dotychczas, przeanalizowano je oraz przeprowadzono badania doświadczalne sprawdzając ich słuszność i praktyczną przydatność. Podano nową interpretację i sposób wyznaczenia tych strat bez założeń upraszczających, których stosowanie prowadziło do niewłaściwych wyników i błędnej oceny własności pomiarowych analizatorów tlenu.

## 1. CHARAKTERYSTYKA ZJAWISKA

Konwekcja termomagnetyczna może powstać w ośrodku paramagnetycznym o niejednakowej temperaturze w niejednorodnym polu magnetycznym. Są to przede wszystkim ośrodki gazowe zawierające tlen, który wyróżnia się spośród gazów własnościami paramagnetycznymi. Podatność magnetyczna pozostałych gazów jest wielokrotnie mniejsza i praktycznie jednakowa. Podatność magnetyczna mieszaniny gazów jest określona podatnością tlenu i jego udziałem objętościowym, gdyż wpływ pozostałych składników na właściwości mieszaniny jest stały i można go pominąć.

<sup>\*)</sup> Artykuł jest fragmentem pracy doktorskiej pt. "Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjnych na własności miernicze termomagnetycznego analizatora tlenu". Promotorem pracy był doc. dr inż. Eugeniusz Romer.

Według prawa Curie podatność magnetyczna właściwa tlenu zmienia się z temperaturą wg zależności:

$$\chi = \frac{C_1}{T} \quad (1)$$

przy czym  $C_1$  jest stałą Curie. Podatność magnetyczna objętościowa wynosi:

$$\kappa = \chi \cdot \varrho_{O_2} \quad (2)$$

Podstawiająco

$$\varrho_{O_2} = \frac{p_{O_2} M_{O_2}}{R T} = \frac{p \varphi M_{O_2}}{R T}, \quad (3)$$

gdzie:

$$\varphi = \frac{V_{O_2}}{V} \approx \frac{p_{O_2}}{p} \quad (4)$$

oznacza udział objętościowy tlenu w gazie, uzyskuje się:

$$\kappa \approx \frac{C_1 M_{O_2}}{R} \frac{p}{T^2} \varphi = C_2 \frac{p}{T^2} \varphi. \quad (5)$$

Gdy ośrodek znajdujący się w polu magnetycznym o natężeniu  $H$  jest jednorodny tzn. posiada jednakową przenikalność magnetyczną  $\mu$ , to energia magnetyczna zmagazynowana w objętości  $V$  jest równa:

$$E_M = \frac{1}{8\pi} \int_{(V)} \mu H^2 dV \quad (6)$$

Podgrzanie tlenu z temperatury  $T_1$  do temperatury  $T_2$  powoduje zmianę jego podatności magnetycznej, a tym samym przenikalności z  $\mu_1$  do wartości  $\mu_2$ . Powoduje to zmianę energii

ośrodka o wartość  $\Delta E_M$ , przy czym

$$\Delta E_M = \frac{1}{8\pi} \int_{(V)} (\mu_1 - \mu_2) H^2 dV = \frac{1}{2} \int_{(V)} (\mathcal{H}_1 - \mathcal{H}_2) H^2 dV \quad (7)$$

Ubytek energii objawia się powstaniem siły wyporu magnetycznego  $F_M$ , która zdolna jest na odcinku  $dx$  wykonać pracę równą utraconej energii

$$F_M = \frac{dE_M}{dx} = \frac{1}{2} \int_{(V)} (\mathcal{H}_1 - \mathcal{H}_2) H \frac{\partial H}{\partial x} dV. \quad (8)$$

Konwekcja termomagnetyczna jest wynikiem działania elementarnych sił wyporu magnetycznego w całym obszarze niejednorodnego pola magnetycznego i gradientu temperatury gazu.

Zjawisko konwekcji termomagnetycznej znalazło praktyczne zastosowanie do pomiaru stężenia tlenu w mieszaninach gazowych. Do skonstruowania analizatora tlenu i oceny jego własności pomiarowych trzeba znać zależność strat cieplnych przez konwekcję termomagnetyczną od stężenia tlenu i warunków w jakich odbywa się zjawisko. Punktem wyjścia do wyznaczenia tej zależności są następujące równania:

### 1. Równania ruchu gazu

$$\rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} + \rho (\bar{w} \nabla) \bar{w} = - \text{grad } \bar{p} + \eta \nabla^2 \bar{w} + \bar{F} \quad (9)$$

### 2. Równanie przewodności ciepła

$$\rho c_p \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \bar{w} \text{grad } \theta \right) = \lambda \nabla^2 \theta \quad (10)$$

### 3. Równanie ciągłości ruchu

$$\text{div } \bar{w} = 0 \quad (11)$$

W powyższych równaniach oznaczają:  $\tau$  - czas,  $w$  - prędkość ruchu gazu,  $\Theta$  - różnica temperatur, temperatury  $T$  w danym punkcie pola i temperatury poza rozpatrywanym obszarem  $V$ .

W równaniu ruchu siła  $\bar{F}$  jest wektorową sumą sił działających na jednostkę objętości gazu: siły wyporu termicznego i siły wyporu magnetycznego

$$\bar{F} = \bar{F}_T + \bar{F}_M, \quad (12)$$

przy czym

$$\bar{F}_T = g \varrho \beta \Theta \quad (13)$$

oraz

$$F_M = \mathcal{H} \beta \Theta \text{ H grad H.} \quad (14)$$

Siła wyporu termicznego  $F_T$  skierowana jest pionowo do góry, a siła wyporu magnetycznego  $F_M$  w kierunku gradientu pola magnetycznego.

Powyżej wprowadzono powszechnie stosowane uproszczenia. Dokładne obliczenie sił daje wynik następujący:

$$F_T = g \varrho_0 T_0 \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = g \varrho_0 T_0 \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} = g \beta \Theta \frac{T_m^2}{T_1 T_2} \quad (13a)$$

oraz

$$F_M = \frac{1}{2} C_2 p^{\varphi H} \text{ grad H} \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) = \frac{1}{2} C_2 p^{\varphi H} \text{ grad H} \frac{(T_2 - T_1)(T_2 + T_1)}{T_1^2 T_2^2} \quad (14a)$$

Temperatury  $T_1, T_2$  są temperaturami charakterystycznymi układu wymiany ciepła tzn. ciał między którymi zachodzi wymiana ciepła:  $T_1$  - komory,  $T_2$  - grzejnika. Temperatura średnia jest równa

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2},$$

a rozszerzalność objętościową gazu charakteryzuje

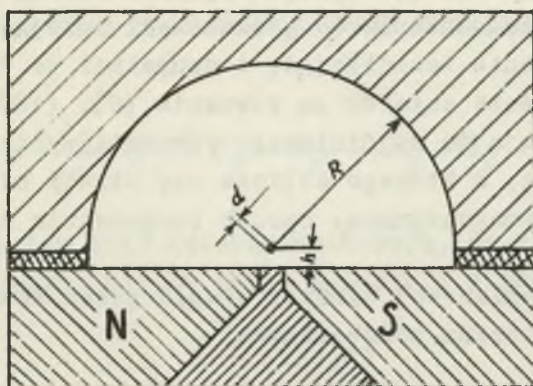
$$\beta = \frac{1}{T_m}.$$

Po uwzględnieniu równania (5), zamiast (14a) otrzymuje się:

$$F_M = \mathcal{K} H \text{ grad } H \beta \theta \frac{T_m^4}{T_1^2 T_2^2}. \quad (14b)$$

We wzorach (13), (14) uproszczenie polega na założeniu  $\frac{T_m^2}{T_1 T_2} = 1$ .  
Parametry gazu  $\rho, \mathcal{K}$  obliczone są dla temperatury średniej.

Przedmiotem opracowania jest układ cieplny pokazany na rys. 1, w którym powstaje konwekcja termomagnetyczna. Rysunek przedstawia przekrój przez komorę pomiarową analizatora tlenu typu KTM<sup>\*)</sup>, przy czym kształt komory jest nieco uproszczony.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez komorę pomiarową analizatora

\*) Analizatory typu KTM-6 oraz KTM-7 opracowane przez Katedrę Miernictwa Przemysłowego Politechniki Śląskiej. Symbol typu podaje zasadę pomiaru: K(onwekcja) T(ermo) M(agnetyczna)

Układ wymiany ciepła składa się z grzejnika cylindrycznego o średnicy  $d$ , długości  $L = 20$  mm umieszczonego w komorze analizatora ograniczonej od dołu nabiegownikami, a z boku i od góry półokrągłą komorą o średnicy  $2R$ . Odległość osi grzejnika od nadbiegunników wynosi  $h$ . Całkowita wysokość komory jest równa  $h+R$ . Komora u dołu ma długość  $L+2R$ . Natężenie pola magnetycznego w szczelinie między nabiegownikami wynosi  $H_{\max}$ . Grzejnik umieszczony jest w polu rozproszonym. Gradient pola magnetycznego skierowany jest pionowo do góry.

Rozwiązanie równań różniczkowych wymiany ciepła i ruchu gazu (9), (10), (11) dla omawianego układu jest bardzo skomplikowane i próby takiej nie podejmowano. Ograniczono się do określenia strat ciepłych przez konwekcję termomagnetyczną w oparciu o teorię podobieństwa i niezbędne badania doświadczalne.

## 2. METODY WYZNACZANIA STRAT PRZEZ KONWEKCJE TERMOMAGNETYCZNĄ

Ilościowe wyznaczenie strat ciepła przez konwekcję termomagnetyczną opiera się na analogii zjawisk konwekcji. Najbardziej ogólnie zagadnienie to przedstawił Agiejkin [1], [2] dając uzasadnienie teoretyczne, a uzupełnił je Worobiew [3].

Punktem wyjścia autorów są równania (9), (10), (11), a wynik sprowadzają do uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcję, z którego oblicza się straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną. Sposób rozumowania Agiejkina jest następujący:

Z analizy wymiarowej wymiany ciepła przez konwekcję wynika uogólnione kryterium podobieństwa

$$W = \frac{l^3 g}{\eta^2} F. \quad (15)$$

Siła  $F$  wywołująca konwekcję określona jest w przypadku konwekcji naturalnej wzorem (13), konwekcji termomagnetycznej wzorem (14), a dla konwekcji wymuszonej przez siły zewnętrzne

$$F_W = \frac{w\eta}{l^2}. \quad (16)$$

Wielkość  $l$  jest wymiarem charakterystycznym grzejnika. Po wstawieniu wartości siły do uogólnionego kryterium otrzymuje się w przypadku konwekcji naturalnej liczbę Grashofa

$$W_T = \frac{l^3 g}{\eta^2} F_M = \frac{l^3 g^2}{\eta^2} \beta \theta = Gr, \quad (17)$$

w przypadku konwekcji termomagnetycznej nową liczbę  $W_M$  bez nazwy

$$W_M = \frac{l^3 g}{\eta^2} F_M = \frac{l^3 g}{\eta^2} \kappa \beta \theta H \text{ grad } H \quad (18)$$

lub konwekcji wymuszonej liczbę Reynoldsa

$$W_W = \frac{l^3 g}{\eta^2} \frac{w\eta}{l^2} = Re. \quad (19)$$

Przy równoczesnym działaniu sił konwekcji następuje ich sumowanie wektorowe, przy czym analogicznie sumuje się liczby podobieństwa:

$$\bar{W} = \frac{l^3 g}{\eta^2} (\bar{F}_T + \bar{F}_M + \bar{F}_W) = \bar{W}_T + \bar{W}_M + \bar{W}_W. \quad (20)$$

W związku z tym obaj autorzy wnioskujeją, że winno istnieć jedno prawo wymiany ciepła przez konwekcję w postaci:

$$Nu = f(Pr, W) \quad (21)$$

które pozwoli na uogólnienie wyników badań eksperymentalnych. Zarówno Worobiew jak i Agiejkin nie przedstawiają materiału doświadczalnego, który uzasadniałby takie uogólnienie. Worobiew [3] zwraca uwagę na przypadek  $\sum \bar{W} = 0$  tzn. stan równo-

wagi sił napędowych konwekcji. Wówczas

$$\text{Nu} = K_W, \quad (22)$$

co wskazuje, że zależność (21) ma postać

$$\text{Nu} = K_W + f(\text{Pr}, W). \quad (23)$$

Worobiew powyższej zależności nie interpretuje.

Z uogólnionego równania wymiany ciepła wynika sposób obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną, podany przez Agiejkina [2]. Agiejkin zakłada, że uogólnione równanie (21) ma postać analogiczną do równania wymiany ciepła przez konwekcję naturalną w przestrzeni nieograniczonej

$$\text{Nu} = c_1 (\text{Gr Pr})^{n_1}, \quad (24)$$

przy czym  $c_1 = 1,18$ ;  $n_1 = \frac{1}{8}$ . Wymiarem charakterystycznym w liczbie Grashofa jest średnica grzejnika. Jest to przybliżenie, które pomija wpływ nabiegowników i komory o niewielkich wymiarach [7]. Przy takim założeniu (wzór (24)), straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną podane w postaci bezwymiarowej wynoszą

$$\text{Nu}_M = c_1 \text{Pr}^{n_1} (W_T + W_M)^{n_1} - c_1 (\text{Pr} W_T)^{n_1} \quad (25)$$

Dla przypadku, gdy  $\frac{F_M}{F_T} \ll 1$  można zastosować przybliżenie rachunku i doprowadzić równanie (25) do postaci:

$$\text{Nu}_M \approx c_1 (\text{Gr Pr})^{n_1} n_1 \frac{F_M}{F_T}. \quad (26)$$

Przybliżenie (26) jest słuszne, gdy siły  $F_T$ ,  $F_M$  są zgodnie skierowane, ponieważ w równaniu (25) liczby  $W_T$ ,  $W_M$  sumuje się wektorowo.



W podobny sposób straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną obliczają Krupp [4] i Mironow [5].

Krupp [4] zakłada analogię konwekcji naturalnej i termomagnetycznej stosując równanie (24). Z iloczynu liczb Grashofa i Prandtla wyodrębnia czynnik posiadający wymiar prędkości, oznaczając go symbolem  $w_T$ . Krupp utożsamia tę wielkość z prędkością konwekcji naturalnej, przy czym

$$w_T = \frac{d^2 g \rho}{\eta} \quad (27)$$

Prędkość konwekcji termomagnetycznej Krupp definiuje następująco:

$$w_M = \frac{\Delta p_M}{\eta} C_3 = C_3 C_4 \frac{\rho \varphi}{\eta} \int \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T^2} \right) H \operatorname{grad} H \, dx \, dy \quad (28)$$

Różnica ciśnień  $\Delta p_M$  jest źródłem konwekcji termomagnetycznej, które jest sumą elementarnych źródeł określonych wyrażeniem pod całką w równaniu (28);  $C_3, C_4$  - są współczynnikami proporcjonalności. Po założeniu, że prędkości  $w_M, w_T$  sumują się wektorowo Krupp dochodzi do związku

$$\operatorname{Nu}_M = o_1 (\operatorname{Gr} \operatorname{Pr})^{n_1} \left( 1 + \frac{w_M}{w_T} \right)^{n_1} - o_1 (\operatorname{Gr} \operatorname{Pr})^{n_1}, \quad (29)$$

który określa straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną. Zapis równania (28) ma tutaj znaczenie formalne, gdyż całki w tym równaniu nie można obliczyć. Z pomiarów zależności

$\frac{w_M}{w_T} = f(\varphi)$  Krupp wyznacza wartość współczynnika  $C_3$  w równaniu (28). Wartość  $C_3$  wyznaczona dla mieszaniny  $N_2 + O_2$  jest taka sama jak dla gazu  $20\% CO_2 + N_2 + O_2$ , co autor interpretuje jako zgodność wyników obliczenia i pomiaru.

Krupp badał układ, w którym kierunki sił konwekcji naturalnej i termomagnetycznej są prostopadłe, a wyniki badań

rozszerzył na dowolny układ. Stałą  $C_3$  wyznaczał z pomiaru kierunku prędkości wypadkowej w pobliżu grzejnika. Metoda pomiaru wskazuje, że Krupp wyznacza w otoczeniu grzejnika stosunek sił a nie prędkości, przez co sposób obliczenia srowadza się do równania (25) lub (26).

Mironow [5] przyjmuje, że ruch wskutek konwekcji naturalnej i termomagnetycznej ma charakter wymuszony, przez co zamiast (24) obowiązuje równanie

$$Nu = c_2 (Re Pr)^{n_2} \quad (30)$$

w którym  $n_2 = \frac{1}{4}$ . Prędkość występująca w liczbie Reynoldsa jest wektorową sumą prędkości  $w_T$ ,  $w_M$ . Prędkość  $w_T$  wyznacza Mironow z warunków cieplnych grzejnika określonych równaniem (24) dla przestrzeni nieograniczonej przez porównanie równań (24) i (30), skąd

$$w_T = \frac{\eta}{d g Pr} \left[ \frac{c_1}{c_2} (Gr Pr)^{n_1} \right]^{\frac{1}{n_2}} \quad (31)$$

Siłę wywołującą konwekcję termomagnetyczną, a następnie prędkość  $w_M$  Mironow definiuje następująco:

$$F_M = C_5 p \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T^2} \right) H \text{ grad } H, \quad (32)$$

$$w_M = C_6 \frac{F_M}{\eta} = C_7 \frac{p \varphi}{\eta} H^2 \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T^2} \right). \quad (33)$$

Strata ciepła przez konwekcję termomagnetyczną Mironow oblicza z równania (30) jako różnicę

$$Nu_M = c_2 (Re Pr)^{n_2} \left( 1 + \frac{w_M}{w_T} \right)^{n_2} - c_2 (Re Pr)^{n_2}, \quad (34)$$

przy czym podano wynik w postaci bezwymiarowej. Stałą  $C_7$  w równaniu (33) wyznacza się doświadczalnie.

Interpretacja Mironowa oparta jest na wielkościach charakterystycznych  $w_T$ ,  $w_M$  i innym niż u Agiejkina lub Kruppa algorytmie oraz założeniu analogii zjawisk konwekcji naturalnej i termomagnetycznej. Spełnienie analogii autor uzyskuje przez ustalenie zależności (33), która daje wyniki zgodne z doświadczeniem. Pamiętając o różnicach, można powiedzieć, że sposób Mironowa jest podobny do metody Agiejkina.

Przytoczone metody obliczania strat przez konwekcję termomagnetyczną są przede wszystkim interpretacją zasady działania analizatorów tlenu oraz ich własności pomiarowych. Jedynym sprawdzeniem podanych koncepcji jest zgodność obliczonych i zmierzonych własności pomiarowych analizatorów badanych przez poszczególnych autorów.

Próba zastosowania interpretacji Kruppa [4] lub Mironowa [5] do analizatora KTM wg rys. 1 dała wyniki niezgodne z rzeczywistością. Wystąpiły znaczne rozbieżności między wynikami obliczeń i pomiarów własności pomiarowych [5]. Powstała potrzeba wyjaśnienia tych rozbieżności, a wyniki prac w tym kierunku podano poniżej.

### 3. ZAKRES STOSOWALNOŚCI UOGÓLNIENEGO RÓWNANIA WYMIANY CIEPŁA PRZEZ KONWEKCJE

Uogólnione równanie wymiany ciepła przez konwekcję w postaci podanej przez Agiejkina i Worobiewa (20), (21) jest wynikiem uzyskanym na podstawie teorii podobieństwa. Dlatego przed zastosowaniem tego równania do konkretnego przypadku należy sprawdzić czy warunki podobieństwa są spełnione.

Warunkiem zastosowania wektorowego sumowania liczb  $w_T$ ,  $w_M$  lub sił  $F_T$ ,  $F_M$ , które wchodzi do równania ruchu gazu (9) jest podobieństwo pól sił  $F_T$  oraz  $F_M$ . W układzie przedstawionym na rys. 1 podobieństwo to nie zachodzi. Siły konwekcji naturalnej działają w obszarze  $\Theta \neq 0$ , natomiast siły konwekcji termomagnetycznej w obszarze  $\Theta \neq \text{grad } H \neq 0$ , przy czym ten ostatni obszar jest znacznie mniejszy. Ponadto pole

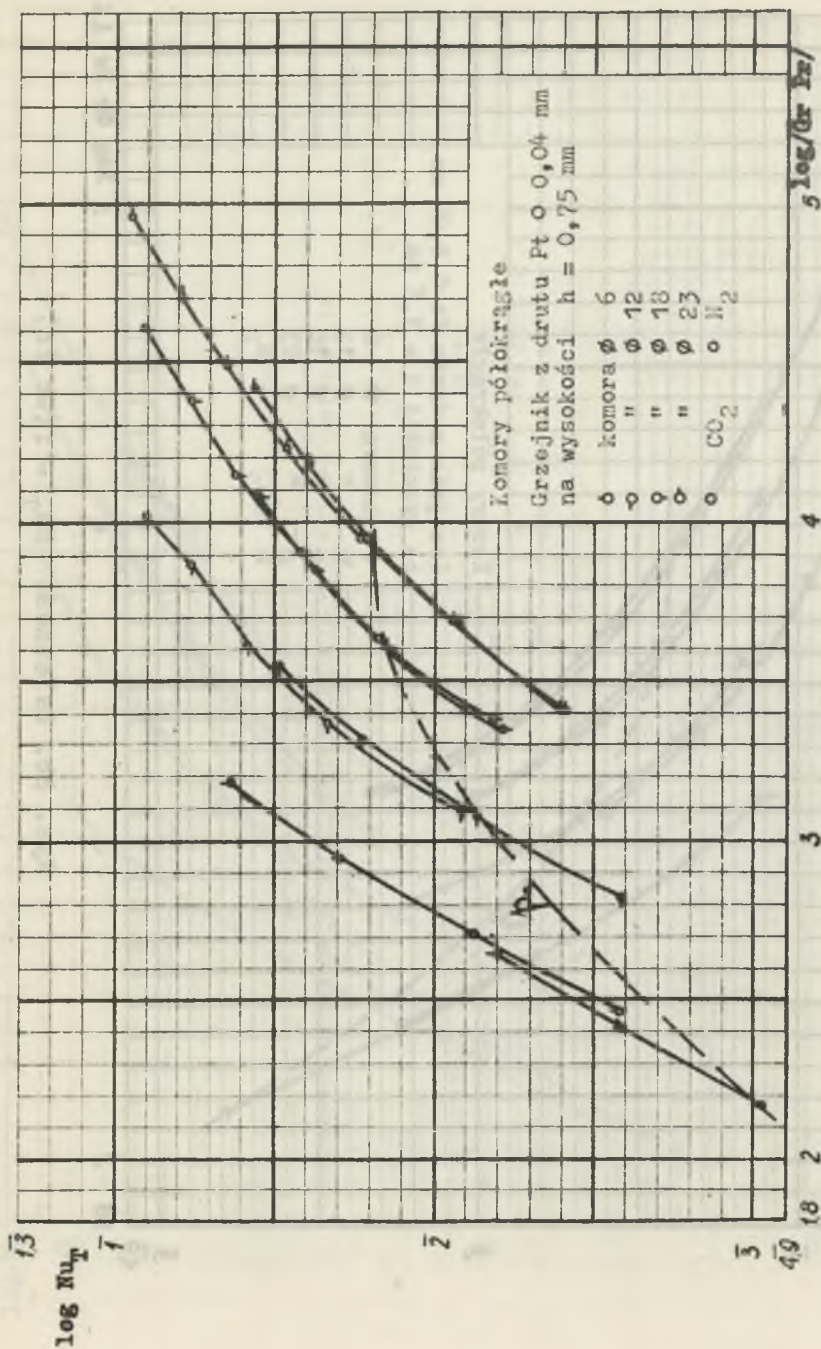
magnetyczne nie spełnia na ogół warunku  $H \text{ grad } H = \text{const.}$  Analogia konwekcji naturalnej i termomagnetycznej polega jedynie na jednakowej przyczynie ich istnienia, na istnieniu gradientu temperatury w gazie. Do pełnego podobieństwa obu zjawisk brak jest podobieństwa geometrycznego. Można się więc spodziewać, że proponowane przez Agiejkina i Worobiewa uogólnione równanie wymiany ciepła przez konwekcję w postaci (20), (21) nie jest słuszne. Czy równanie to można potraktować jako rozwiązanie dostatecznie przybliżone - ostateczną odpowiedź może dać doświadczenie.

Na układzie pokazanym na rys. 1 wykonano pomiary zależności  $Nu_T = f(W_T \text{ Pr})$  oraz  $Nu_{T+M} = f[(W_T + W_M)\text{Pr}]$ . Wielkości  $Nu_T$  oraz  $Nu_{T+M}$  odpowiednio charakteryzują straty przez konwekcję naturalną oraz konwekcje: naturalną i termomagnetyczną. Zasadę wyodrębnienia tych strat przedstawiono oddzielnie [7] oraz poniżej w części 5.

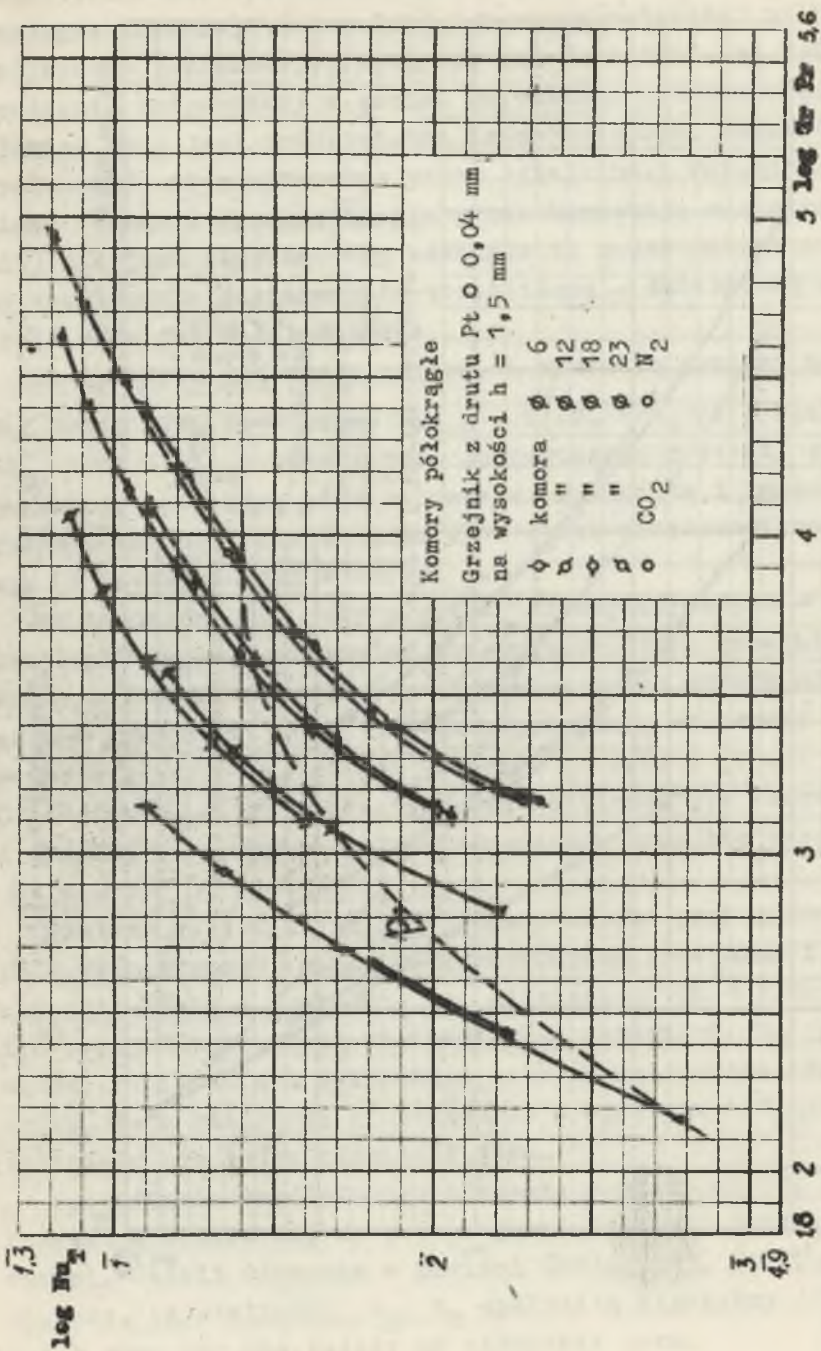
Do pomiarów  $Nu_T$  użyto gazów diamagnetycznych - azotu i dwutlenku węgla, utrzymując stałe temperatury grzejnika i komory. Zmianę wartości  $W_T$  uzyskano przez zmianę ciśnienia gazu w granicach  $100 \div 1300 \text{ Tr}$ . Wyznaczoną zależność dla komór o różnych średnicach pokazano na rys. 2 [7]. W liczbie Grashofa ( $W_T = \text{Gr}$ ) parametry gazu obliczono dla temperatury średniej, a za wymiar charakterystyczny przyjęto szczelinę  $\delta = R - r$ .

Pomiary wartości  $Nu_{T+M}$  przeprowadzono przy jednakowym polu magnetycznym, stałych temperaturach grzejnika i komory, używając tlenu i powietrza pod ciśnieniem  $100 \div 1300 \text{ Tr}$ . W tym przypadku znane są wartości  $W_T$ , natomiast  $W_M$  nie jest znane, ponieważ nie wyznaczono pola magnetycznego. Wiadomo tylko, że z wielkości wychodzących w wyrażeniu  $W_M$  (wzór (18)) zmieniało się tylko ciśnienie gazu.

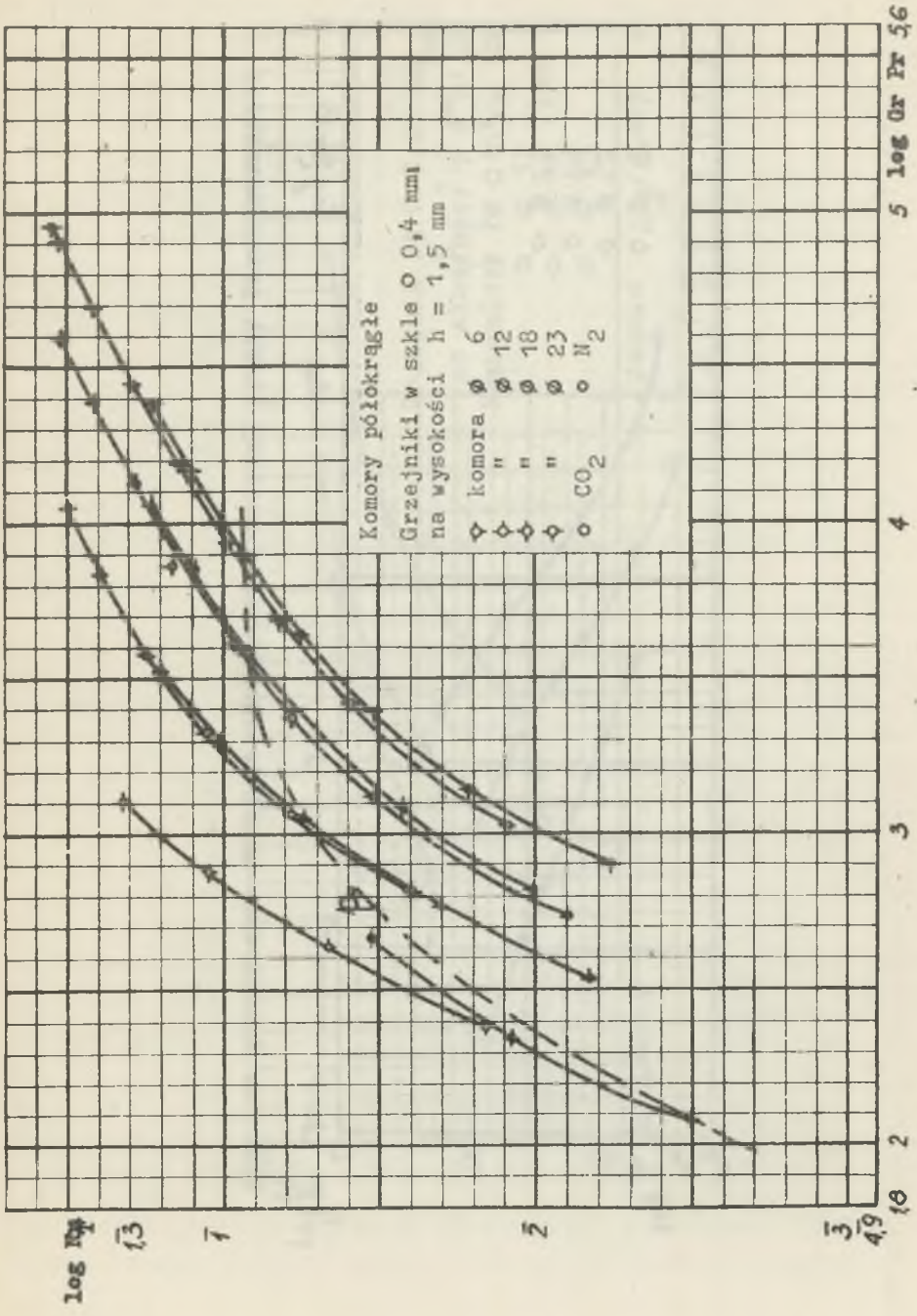
Sprawdzenie uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcję opiera się na następującym dowodzie metodą nie wprost. Jeżeli równanie w postaci (20), (21), (17), (18) jest słuszne, to wielkości  $W_T$ ,  $W_M$  spełniają algorytmy (17), (18), a ich stosunek nie zależy od ciśnienia gazu.



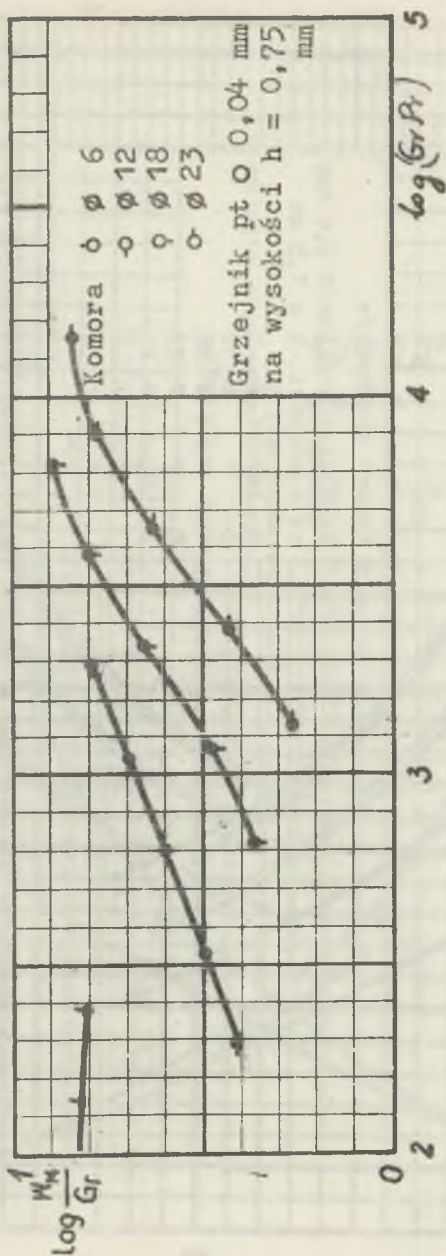
Rys. 2a. Zależność  $Nu_T = f(G, Pr)$



Rys. 2b. Zależność  $Nu_T = f(Gr Pr)$

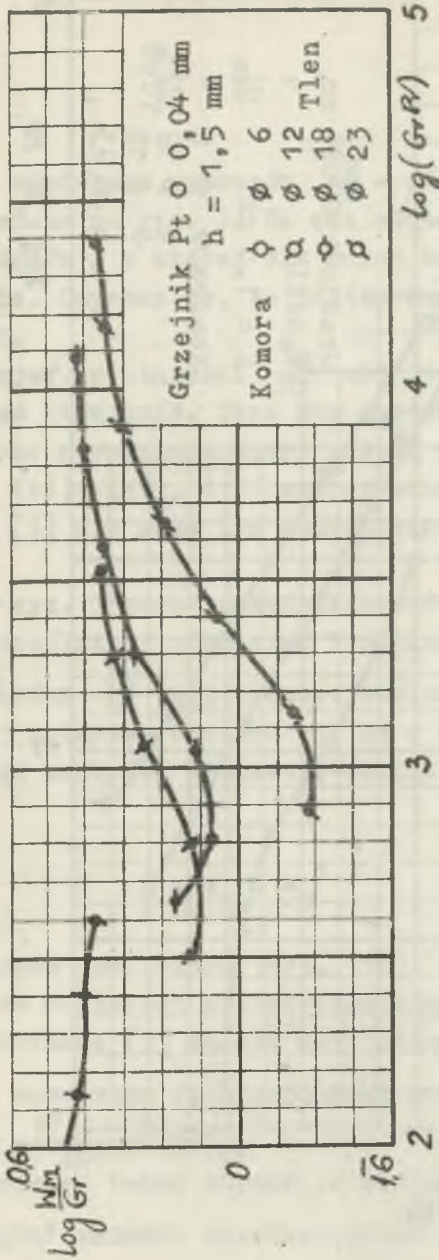


Rys. 2c. Zależność  $Nu_T = f(Gr Pr)$

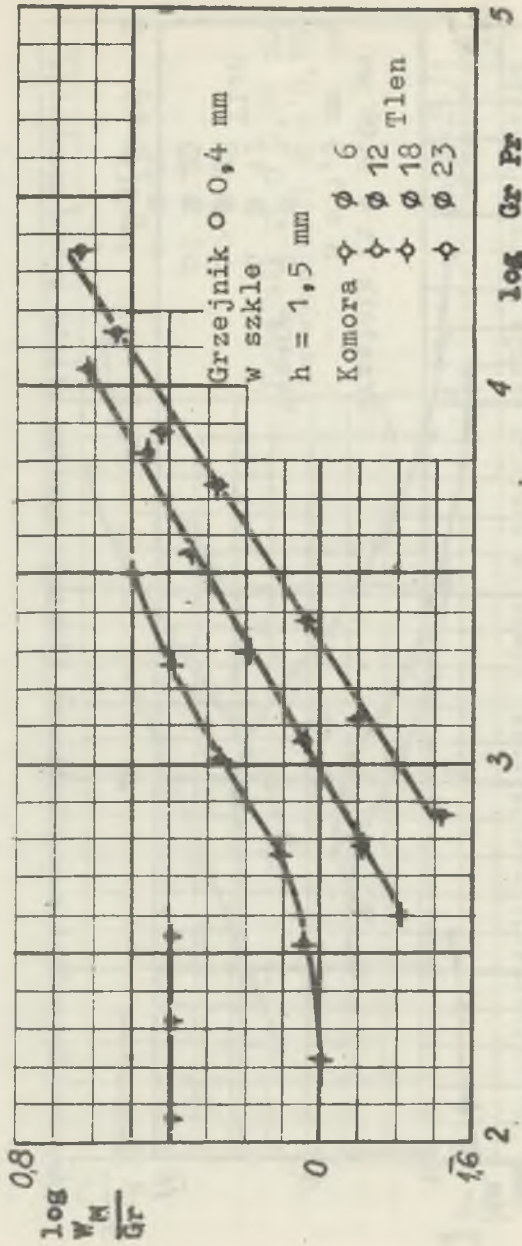


Rys. 3a. Sprawdzenie uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcje





Rys. 3b. Sprawdzenie uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcje



Rys. 30. Sprawdzenie uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcje

Wychodząc z danych  $Nu_T = f(Gr Pr)$  oraz  $Nu_{T+M}$ , wyznaczono wartości  $W = W_T + W_M$ , po czym obliczono stosunek

$$\frac{W_M}{Gr} = \frac{W}{Gr} - 1. \quad (35)$$

Uzyskane wyniki w postaci wykresów  $\frac{W_M}{Gr} = f(Gr Pr)$  dla poszczególnych komór podano na rys. 3. Na osi odciętych odłożono wielkości  $\log(Gr Pr)$ , w której dla danej komory zmienia się jedynie ciśnienie. Oznacza to, że  $\log(Gr Pr) = A + 2 \log p$ , gdzie  $A = \text{const}$ .

Rys. 3 pokazuje, że stosunek  $\frac{W_M}{Gr}$  nie jest wielkością stałą, niezależną od ciśnienia. Teza nie została potwierdzona. Dlatego uogólnione równanie wymiany ciepła przez konwekcję w postaci (20), (21), (17), (18) proponowanej przez Agiejkina [2] i Worobiewa [3] nie może być zastosowane do omawianego przypadku.

Na podstawie rys. 3 można przedyskutować jaki algorytm  $W_M$  spełniałby uogólnione równanie. W większości badanych przypadków wielkości  $\frac{W_M}{Gr}$  jest proporcjonalna do ciśnienia gazu w pierwszej potęgze. Oznacza to, że w obszarze, gdzie taka prawidłowość zachodzi zamiast równania (20) obowiązuje relacja

$$W = W_T + W_M^{1,5} \quad (36)$$

przy niezmiennych związkach (17), (18), (21). Należy również zauważyć, że wielkości charakterystyczne  $w_T$ ,  $w_M$  wprowadzone przez Mironowa [5] są tak zdefiniowane, że

$\frac{w_M}{w_T} = C_B p$ . Przy sumowaniu tych prędkości zachodzi taka sama proporcja jak w równaniu (36).

Ponieważ istnieje także obszar, w którym  $\frac{w_M}{w_T} = \text{const}$  nie można wyciągnąć wniosku uogólniającego wyniki doświadczenia. Można jedynie powiedzieć, że doświadczenie wskazuje

obszar, w którym uogólnione równanie wymiany ciepła w postaci proponowanej przez Agiejkina może być zastosowane oraz obszar, gdzie nie może być stosowane. Proponowane równanie jest szczególnym przypadkiem, a nie uogólnieniem zjawisk konwekcji naturalnej i termomagnetycznej jakie zachodzą w termomagnetycznych analizatorach tlenu.

#### 4. WPLYW WYMIARÓW UKŁADU NA KONWEKCJĘ TERMOMAGNETYCZNĄ

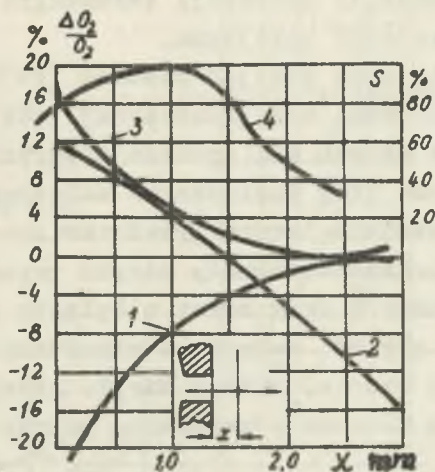
W dotychczasowych opracowaniach o konwekcji termomagnetycznej w analizatorach tlenu [2], [4], [5] powtarza się założenie przestrzeni nieograniczonej wokół grzejnika. Jako podstawę obliczenia strat ciepłych przez konwekcję autorzy przyjmują równanie (24) oraz analogię konwekcji naturalnej i termomagnetycznej. W wyniku tych założeń dochodzi się do wyniku:

$$\text{Nu}_M \approx C_1 (\text{Gr Pr})^{n_1} n_1 \frac{W_M}{G_T} \quad (37)$$

Intensywność konwekcji termomagnetycznej określona wykładnikiem  $n_1$  wynosi 0,125 w zakresie  $\text{GrPr} = 10^{-3} \text{ } \ddot{\text{v}} \text{ } 10^2$ . Związek (37) prowadzi do wniosku, że wskazania analizatora tlenu proporcjonalne w pierwszym przybliżeniu do wielkości  $\text{Nu}_M$  zależą od ciśnienia gazu w potęgze  $2n_1$  [6].

Wyniki badań analizatora tlenu typu KTM-7 [6] oraz dane literaturowe [2], [4], [5] mówią o proporcjonalności wskazań do ciśnienia w potęgze 0,8  $\ddot{\text{v}} \text{ } 2,5$ . Na tej podstawie można stwierdzić, że intensywność konwekcji termomagnetycznej w równaniu (37) jest za mała i prowadzi do niewłaściwej oceny własności pomiarowych analizatorów. Ponadto nasuwa to błędne wnioski, jakoby własności pomiarowe analizatora nie zależały od parametrów konstrukcyjnych układu grzejnik - komora. Wnioski takie są szkodliwe, bo wykluczają możliwość poprawy własności pomiarowych tych analizatorów. Ich niesłuszność potwierdzają fakty zaobserwowane przy opracowaniu analizatora KTM-7 oraz wyniki badań Chołowa [8] przedstawione na rys. 4.

Chołow nie interpretuje swoich wyników, a interpretacja przeprowadzona przez Agiejkina [2] jest nieprzekonywująca.\*)



Rys. 4. Zależność wpływów składu gazu i ciśnienia od położenia grzejnika względem nabiegunków [8]

1 - domieszka 2% H<sub>2</sub>; 2 - domieszka 40% CO<sub>2</sub>; 3 - zmiana ciśnienia o + 0,1 kg/cm<sup>2</sup>; 4 - czułość analizatora

Poniżej przedstawiono własną koncepcję wyznaczenia strat przez konwekcję termomagnetyzną. W proponowanej metodzie zastosowano dwa nowe elementy:

1<sup>o</sup> - nie zakłada się przestrzeni nieograniczonej wokół grzejnika,

2<sup>o</sup> - podstawą obliczenia jest wyodrębnienie strat przez konwekcję w oparciu o wyniki badań doświadczalnych [7]

Pierwszy z w/w eliminuje założenie upraszczające zjawisko, a więc zbliża wynik obliczenia do wartości prawdziwej. Drugi natomiast wprowadza nowe związki i wielkości charakteryzujące wymianę ciepła, przez co zmienia wynik obliczenia w sposób zasadniczy.

\*) S. 94-95.

### 5. INTERPRETACJA ZJAWISK W PRZYPADKU PODOBIENSTWA KONWEKCJI

W przypadku podobieństwa pól sił wyporu magnetycznego i termicznego, wzory (17), (18), (20) zachowują swoją ważność. Zachodzi wówczas analogia konwekcji termomagnetycznej i naturalnej wg interpretacji Agiejkina.

Równanie (21) nie może przyjąć postaci (24), gdyż odrzuca się założenie przestrzeni nieograniczonej jako niesłuszne. Wymiary i parametry układu nie spełniają warunku nieograniczoności [7]. Zamiast (21) zastosowano zależność  $Nu_T = f(Gr Pr)$  wyznaczoną doświadczalnie, która przedstawiona jest na rys. 2 [7]. Wielkość  $Nu_T$  oznacza straty ciepła przez konwekcję naturalną, wyodrębnione z sumy strat cieplnych grzejnika. Wyodrębnienie opiera się na związkach stosowanych dla układu zamkniętego wymiany ciepła. Straty ciepła grzejnika przez przewodzenie gazu i konwekcję naturalną potraktowano jako sumę

$$Nu = Nu_p + Nu_T \quad (38)$$

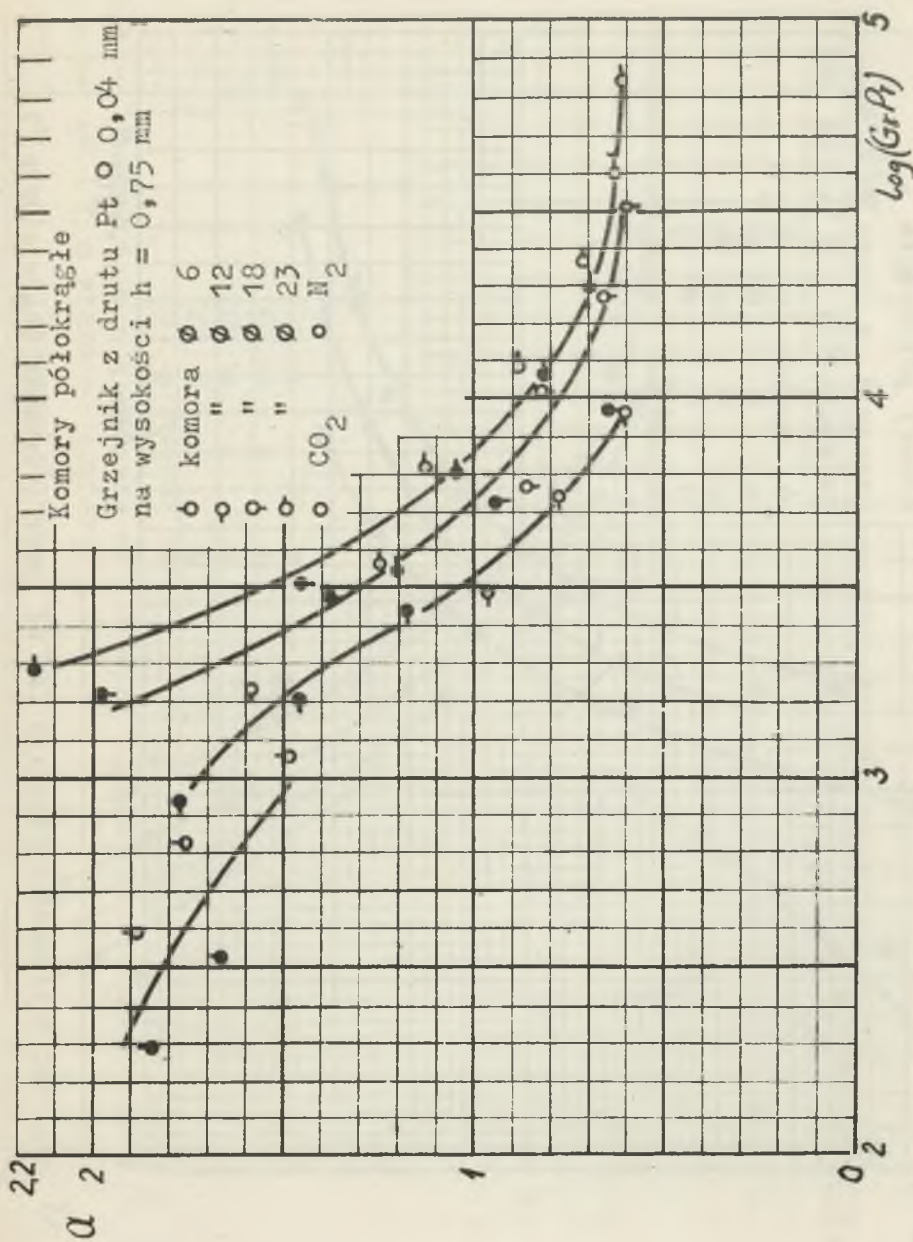
Dla danego układu zamkniętego wymiany ciepła straty przez przewodzenie gazu scharakteryzowane wielkością bezwymiarową są stałe i równe współczynnikowi kształtu układu

$$Nu_p = K_0 \quad (39)$$

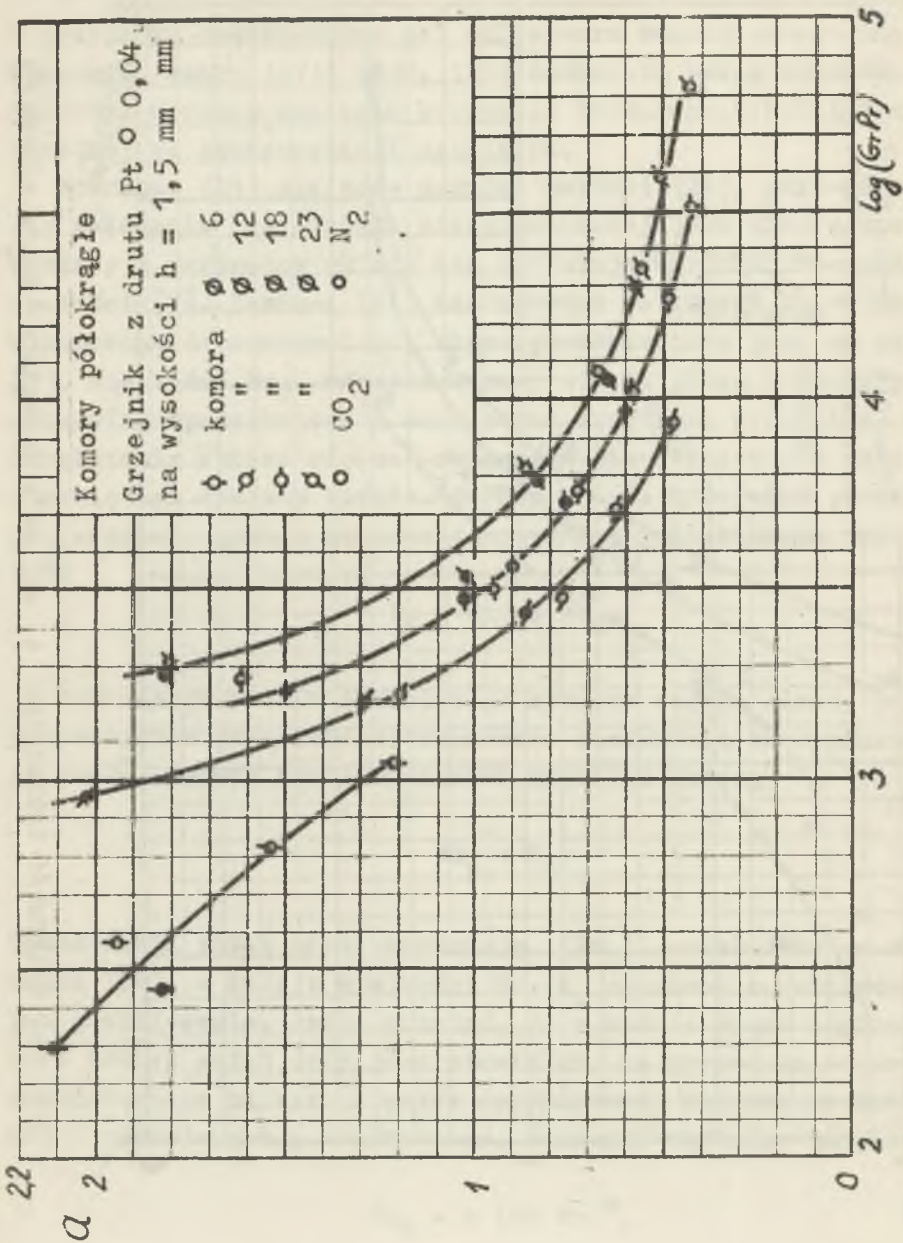
Wyznaczenie strat przez konwekcję ( $Nu_T$ ) opiera się na równaniu (38), w którym wielkości  $Nu$ ,  $K_0$  są znane z pomiarów lub z obliczenia. Jeśli przyjąć, że w czasie pracy analizatora zakres zmian  $GrPr$  jest niewielki, to krzywe  $Nu_T = f(Gr Pr)$  przedstawione na rys. 2 można aproksymować styczną do krzywej w punkcie pracy analizatora. Równanie stycznej ma postać:

$$Nu_T = c (Gr Pr)^a, \quad (40)$$

przy czym wielkości  $c$  oraz  $a$  mają wartość stałą.

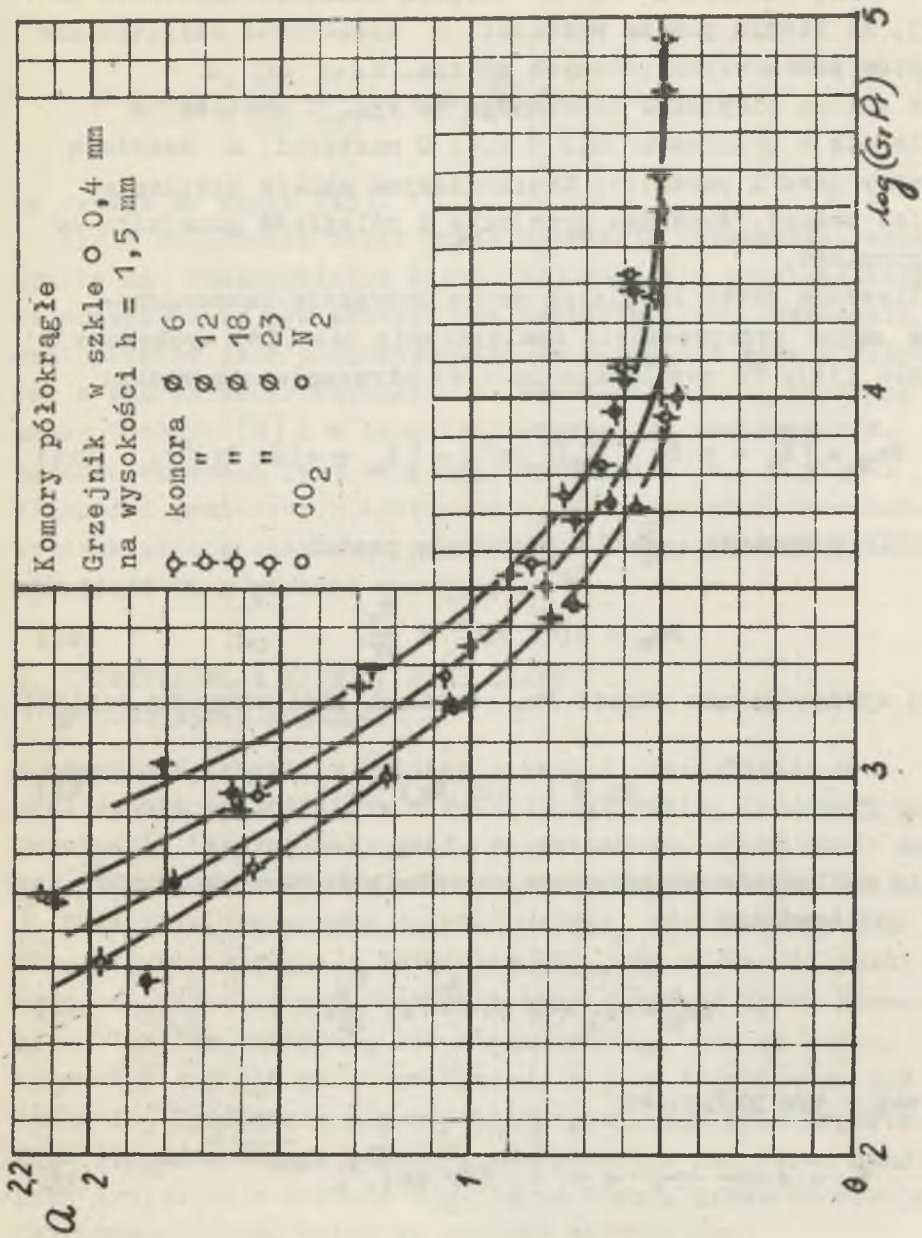


Rys. 5a. Zależność wykładnika a od GrPr (równanie  $Nu_T = a(GrPr)^b$ )



Rys. 5b. Zależność wykładnika  $a$  od  $Gr_{Pr}$  (równanie  $Nu_T = c(Gr_{Pr})^a$ )





Rys. 50. Zależność wykładnika  $a$  od  $GrPr$  (równanie  $Nu_T = a(GrPr)^b$ )

Zależnie od wyboru punktu pracy analizatora, a więc wartości  $GrPr$ , wielkości  $\alpha$ , a ulegają zmianie. Ilustruje to rys. 5, na którym podane wartości  $\alpha$  a wyznaczone analitycznie z punktów pomiarowych podanych na rys. 2.

Dla układu cieplnego pokazanego na rys. 1 wartość  $\alpha$  zmienia się w granicach  $0,5 \pm 2,0$ . O wartości  $\alpha$  decydują parametry gazu i parametry konstrukcyjne układu cieplnego: średnica komory, średnica grzejnika i odległość grzejnika od nabiegowników.

Obliczenie strat cieplnych przez konwekcję termomagnetyczną można przeprowadzić analogicznie jak (25) wychodząc z równania (38). Po uwzględnieniu (39) otrzymuje się wynik:

$$Nu_M = \left[ K_0 + \alpha (Gr + W_M)^{\alpha} Pr^{\alpha} \right] - \left[ K_0 + \alpha (Gr Pr)^{\alpha} \right], \quad (41)$$

który dla przypadku  $\frac{W_M}{Gr} \ll 1$  przyjmuje postać

$$Nu_M \approx \alpha (Gr Pr)^{\alpha} \alpha \frac{W_M}{Gr}. \quad (42)$$

Bez wyodrębnienia strat  $Nu_T$  zamiast (38) można by napisać

$$Nu \approx \alpha_3 (Gr Pr)^{\alpha_3}, \quad (43)$$

a wynik obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną byłby następujący:

$$Nu_M \approx \alpha_3 (Gr Pr)^{\alpha_3} \alpha_3 \frac{W_M}{Gr}. \quad (44)$$

Ponieważ w tym przypadku

$$\alpha \alpha (Gr Pr)^{\alpha} = \alpha_3 \alpha_3 (Gr Pr)^{\alpha_3}, \quad (45)$$

ilościowy wynik obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną wyrażony wzorami (42) i (44) jest jednakowy. Intensywność konwekcji termomagnetycznej wyrażonej wzorem (42) jest

znacznie większa ( $a > n_3$ ), ponieważ

$$a = n_3 \frac{(Gr Pr)^{n_3}}{(Gr Pr)^a} = n_3 \frac{Nu}{Nu_T}, \quad (46)$$

co wynika ze wzoru (45).

Wynik obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną oparty na wyodrębnieniu strat (42) znajduje potwierdzenie we własnościach pomiarowych analizatorów tlenu. Wskazanie analizatorów jest proporcjonalne do ciśnienia gazu w potęgę  $2a$ , a zakres zmian wartości  $a$  uzasadnia wyniki uzyskane przez Chełowa [8] i w innych konstrukcjach analizatorów. Ponadto wykazana jest zależność wykładnika  $a$ , a więc i własności pomiarowych analizatora, od parametrów konstrukcyjnych układu cieplnego grzejnik - komora. W rzeczywistości zależność taka również występuje.

## 6. INTERPRETACJA ZJAWISK PRZY BRAKU PODOBIENSTWA KONWEKЦИИ

W omawianym przypadku wymiany ciepła - przedstawionym na rys. 1, nie są spełnione warunki podobieństwa konwekcji naturalnej i termomagnetycznej. Do obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną nie można wykorzystać wzoru (42).

Straty te wyznaczono doświadczalnie, analogicznie jak straty przez konwekcję naturalną [7]. Gdy w komorze analizatora znajduje się gaz diamagnetyczny istnieje tylko konwekcja naturalna. Stan ten nie ulega zmianie, gdy do komory wprowadzi się gaz paramagnetyczny, a pole magnetyczne nie istnieje. Pojawienie się w pobliżu grzejnika pola magnetycznego niejednorodnego powoduje powiększenie się strat cieplnych grzejnika o wartość  $Nu_M$ . Są to straty przez konwekcję termomagnetyczną. Można je zapisać następująco:

$$Nu_M = Nu_{T+M} - Nu_T, \quad (47)$$

przy czym wartość strat przez przewodzenie gazu jest stała i równa  $K_0$ . Pozostaje do ustalenia zespół wielkości, od których zależą straty przez konwekcję termomagnetyczną.

Wielkość  $Nu_T$  jest funkcją  $GrPr$  oraz wymiarów grzejnika, komory i ich wzajemnego położenia. Oznaczając kształt układu oleplnego symbolem  $K$ , można napisać, że

$$Nu_T = f_T (Gr Pr, K) \quad (48)$$

Wyniki sprawdzenia uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcję przedstawione na rys. 3 mówią, że między  $W_M$  a  $Gr$  zachodzi związek:

$$W_M = Gr M Z, \quad (49)$$

gdzie:  $M$  wynika ze wzorów (17), (18).

$$M = \frac{W_M}{Gr} = \frac{\kappa}{g} \frac{H \text{ grad } H}{g}, \quad (50)$$

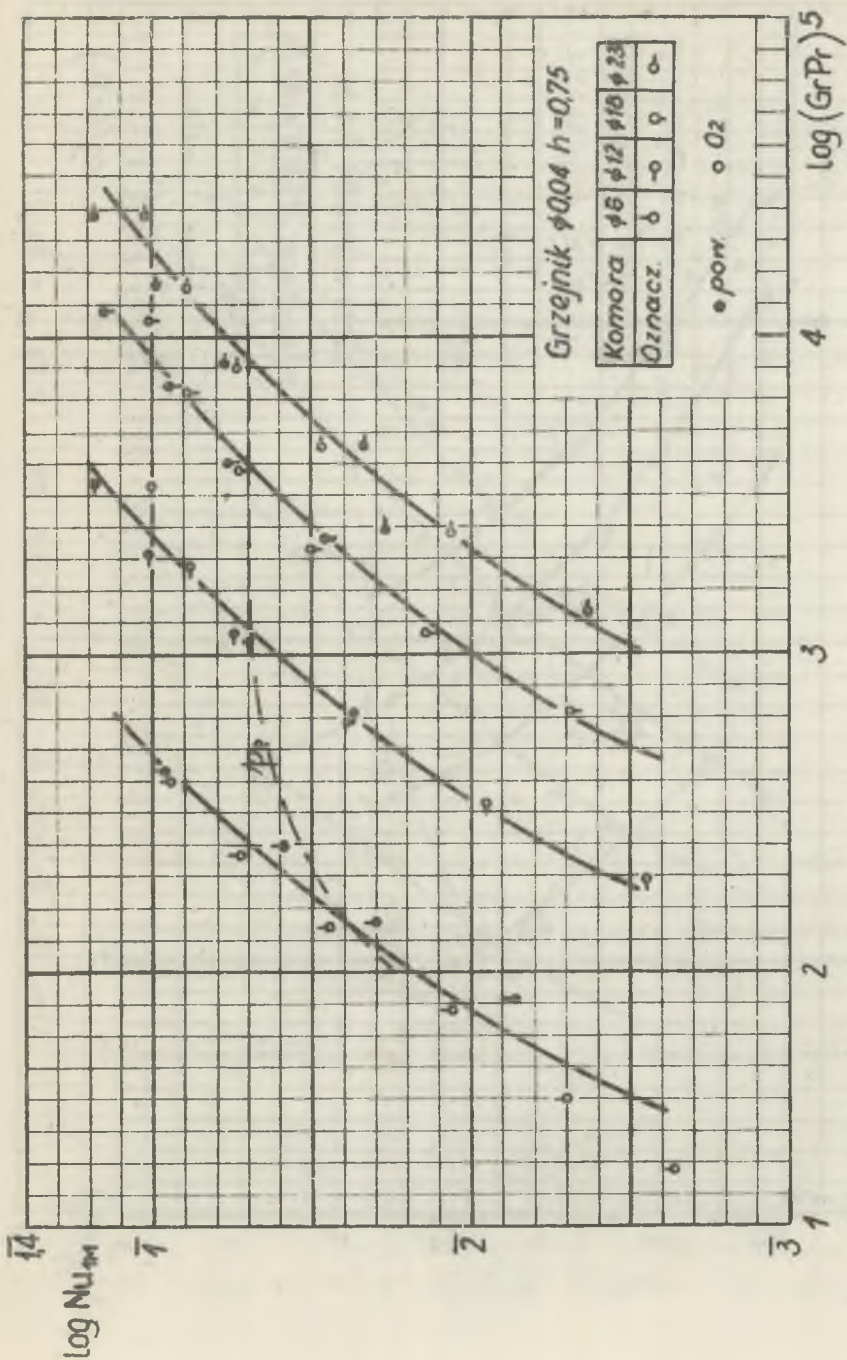
a wielkość  $Z$  jest poprawką tak korygującą algorytm  $W_M$  wyrażony wzorem (18) by uogólnione równanie Agiejkina było spełnione. Z rys. 3 wynika, że w części obszaru  $Z$  jest proporcjonalne do ciśnienia gazu. Ponieważ  $Z$  jest wielkością bezwymiarową, więc wchodzi doń inne wielkości, których na podstawie przeprowadzonych badań nie udało się zidentyfikować.

Ogólnie po uwzględnieniu związku (49) można napisać, że

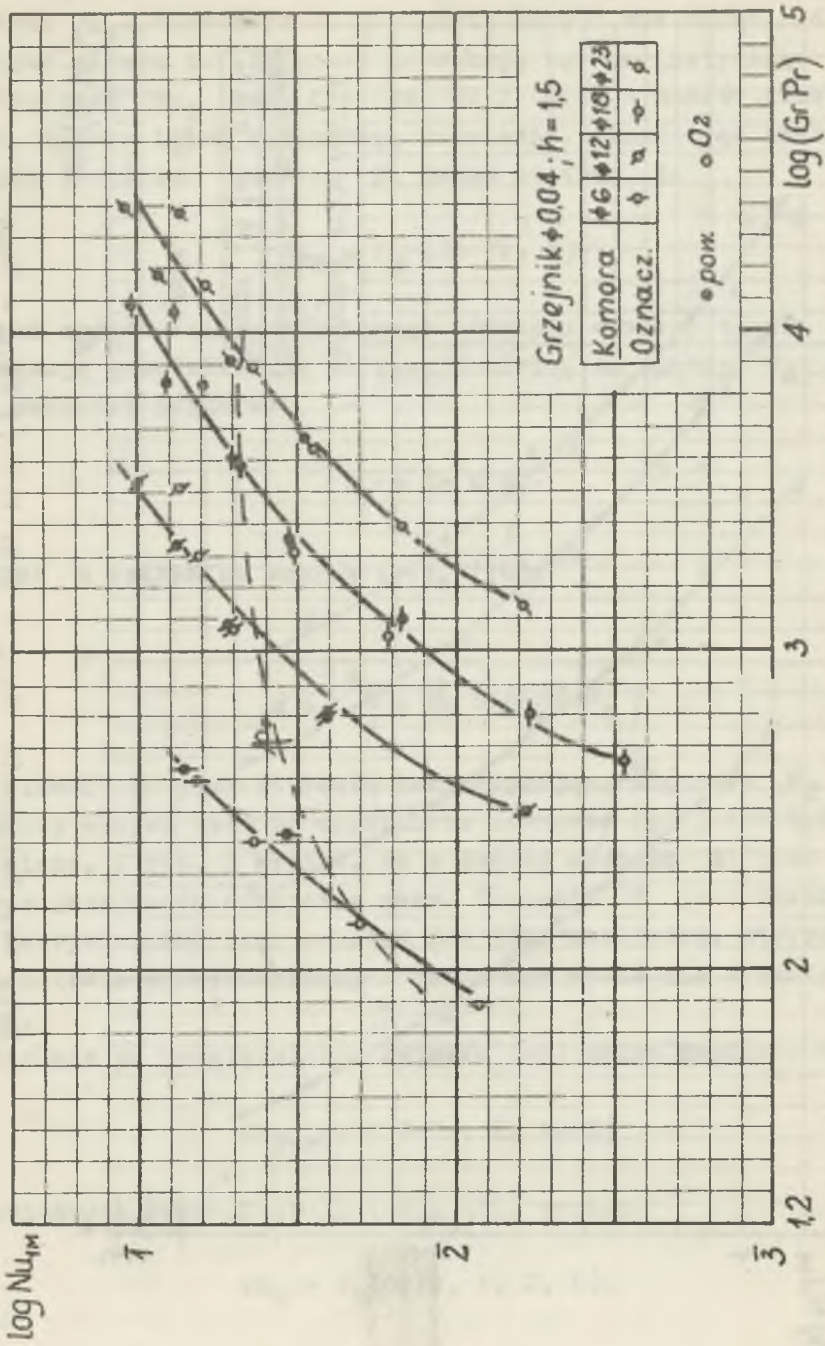
$$Nu_{T+M} = f(GrPr, K, M, Z) \quad (51)$$

Z powyższych relacji (47), (48), (51) wynika

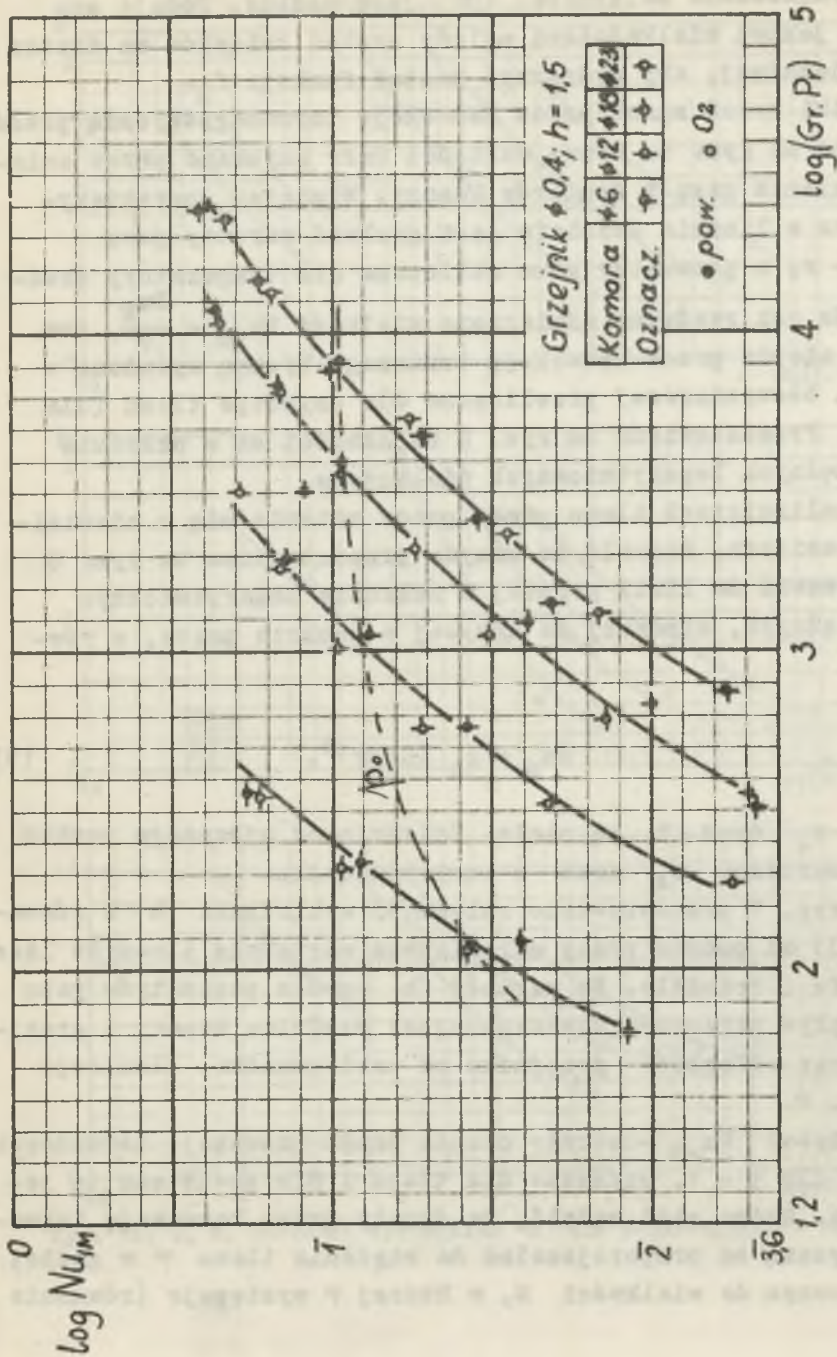
$$Nu_M = f_M(GrPr, K, Z, M). \quad (52)$$



Kys. 6a. Zależność  $Nu_{1M} = f(GrPr)$  ( $\varphi Nu_{1M} = Nu_M$ )



Rys. 6b. Zależność  $Nu_{1M} = f(Gr Pr)$  ( $\varphi Nu_{1M} = Nu_{1M}$ )



Rys. 6c. Zależność  $Nu_{1M} = f(Gr.Pr)$  ( $\varphi Nu_{1M} = Nu_M$ )

Sformułowanie zależności (52) jest ogólne. Podaje ono między jakimi wielkościami należy szukać związków na drodze doświadczalnej, aby wyznaczyć postać funkcji  $f_M$ .

Wyniki badań strat przez konwekcję termomagnetyczną przedstawiono na rys. 6. Różne wartości GrPr uzyskano przez zmianę ciśnienia gazu i wymiarów komory. Wymiarem charakterystycznym w liczbie Grashofa jest grubość warstwy gazu  $\delta = R - r$ , a parametry gazu obliczone dla temperatury średniej. Na osi rzędnych odmierzone wielkość  $Nu_{1M} = \frac{Nu_M}{\varphi}$ , tzn. straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną wyrażone w postaci bezwymiarowej przeliczone dla czystego tlenu (dla  $\varphi = 1$ ). Przedstawione na rys. 6 zależności są w układzie współrzędnych logarytmicznych nieliniowe.

W analizatorach tlenu punkt pracy zmienia się w niewielkich granicach. Pozwala to krzywe przedstawione na rys. 6 aproksymować do linii prostej w układzie logarytmicznym współrzędnych, stycznej do krzywej w punkcie pracy, o równaniu

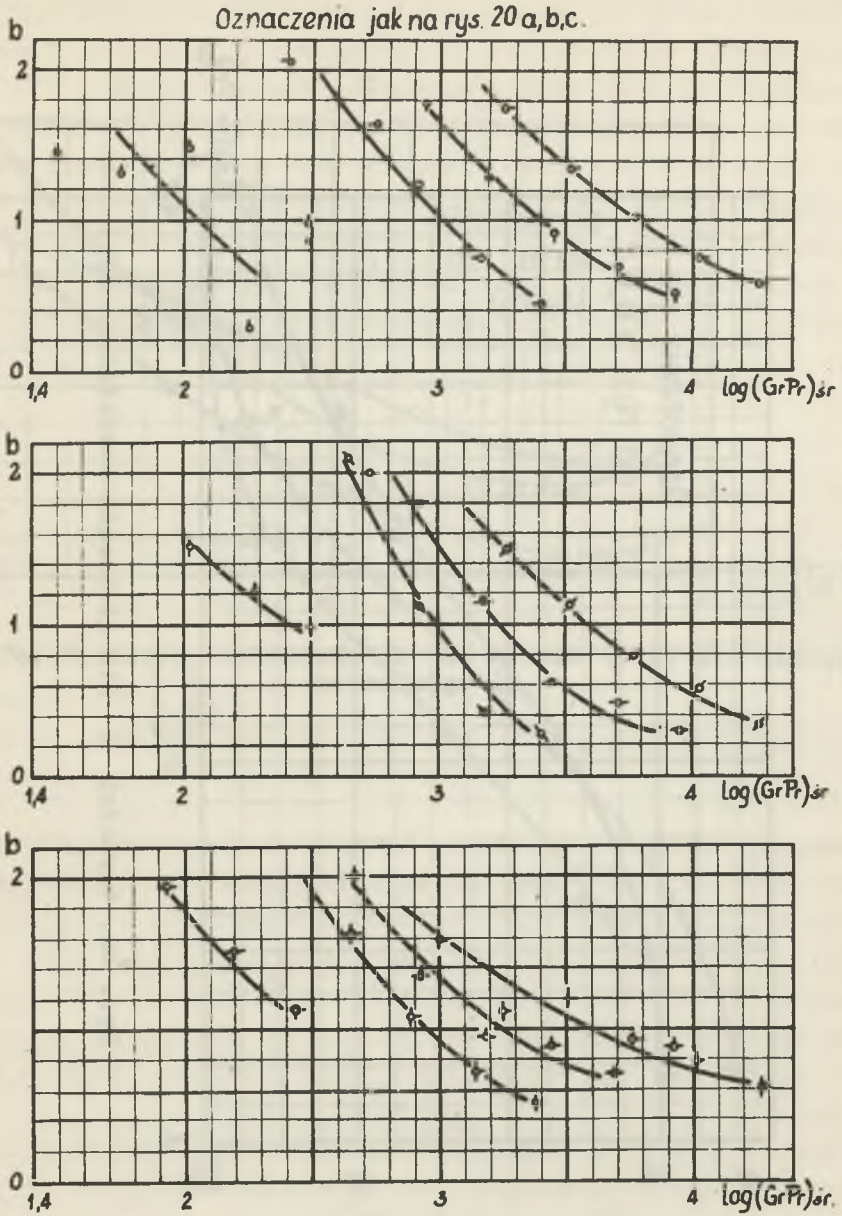
$$Nu_M = c_4 (GrPr)^b, \quad (53)$$

gdzie:  $c_4$  oraz  $b$  są stałe. Zależnie od wybranego punktu pracy wartości  $c_4$  oraz  $b$  zmieniają się.

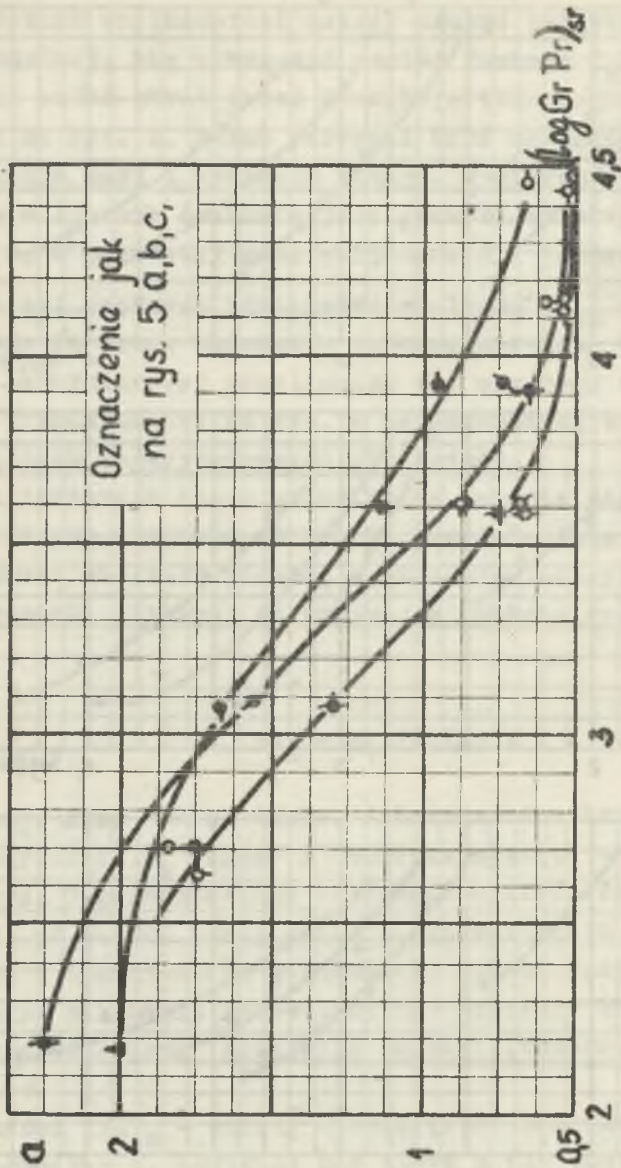
Na rys. 7 przedstawiono zależność wykładnika  $b$  w równaniu (53) od punktu pracy określonego wartością iloczynu liczby Grashofa i Prandtla. Na wartość  $b$  oprócz parametrów gazu mają wpływ parametry konstrukcyjne: średnice komory i grzejnika oraz odległość grzejnika od nabiegownika. Ilustruje to rys. 8.

Wartości  $Nu_{1M}$  - straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną dla  $\varphi = 1$ , uzyskane dla tlenu i dla powietrza są jednakowe. Można stąd sądzić, że straty przez konwekcję termomagnetyczną są proporcjonalne do stężenia tlenu  $\varphi$  w gazie, a tym samym do wielkości  $M$ , w której  $\varphi$  występuje (równanie

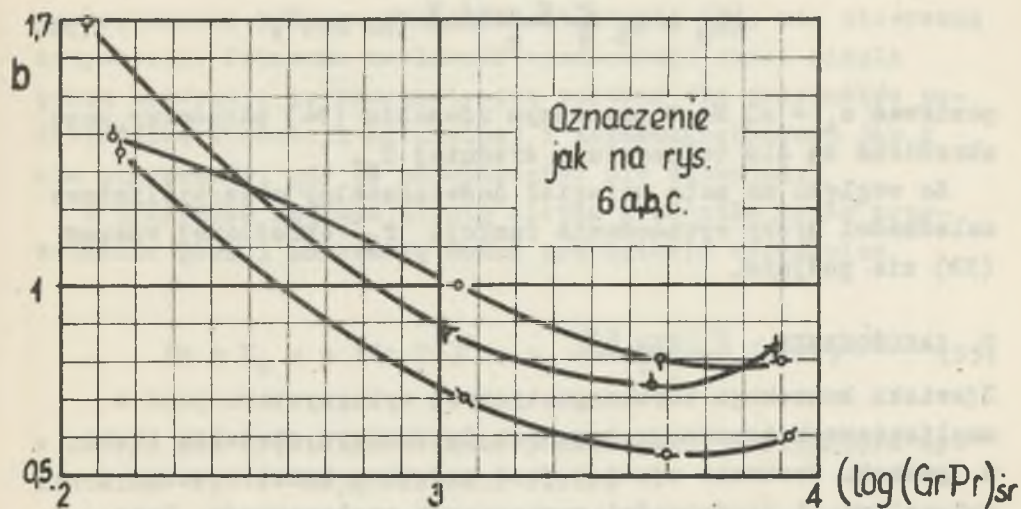




Rys. 7a, b, c. Wartości wykładnika  $b$  dla poszczególnych komór



Rys. 8a. Wartości  $a$  dla ciśnienia normalnego ( $p_0$ )



Rys. 8b. Wartości wykładnika  $b$  we wzorze (105) dla ciśnienia normalnego ( $p_0$ )

(50)). Po uwzględnieniu związków (50) oraz (53) uzyskuje się:

$$\text{Nu}_M = c_5 \frac{\lambda}{g} \frac{H \text{ grad } H}{g} (\text{Gr Pr})^b, \quad (54)$$

ponieważ  $c_4 = c_5$  M. W powyższym równaniu (54) parametry gazu określone są dla temperatury średniej  $T_m$ .

Ze względu na mały materiał doświadczalny oraz nieliniowe zależności próby wyznaczania funkcji  $f_M$  określonej wzorem (52) nie podjęto.

## 7. ZAKOŃCZENIE

Zjawisko konwekcji termomagnetycznej wykorzystane jest w analizatorach termomagnetycznych do pomiaru stężenia tlenu w gazach. Poznanie zjawisk jest podstawą konstruowania i optymalizacji właściwości pomiarowych analizatorów. Opis zjawisk zachodzących w analizatorze, jaki spotyka się w literaturze, jest wycinkowy a postawione hipotezy podające matematyczną interpretację są uproszczone i obejmują tylko określoną konstrukcję analizatora.

W zasadzie wszystkie znane teorie działania analizatorów termomagnetycznych sprowadzają się do uogólnionego równania wymiany ciepła przez konwekcję, sformułowanego przez Agiejkina [1], [2]. Stosowanie tego równania do obliczenia strat ciepła przez konwekcję termomagnetyczną w analizatorach tlenu opiera się na założeniach upraszczających, które wydawały się autorowi nie do przyjęcia.

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań zmierzające do wyjaśnienia, czy stosowane powszechnie założenia analogii konwekcji termomagnetycznej i naturalnej oraz równań wymiany ciepła dla przestrzeni nieograniczonej mogą być przyjęte do obliczenia strat przez konwekcję termomagnetyczną w analizatorach tlenu. Na podstawie badań przeprowadzonych na modelach zbliżonych do konstrukcji analizatora KTM-7 można stwierdzić, że przez stosowanie tych założeń zmienia się sens fizyczny zjawiska i zniekształca się wyniki liczbowe.

Przeprowadzono również analizę zjawiska bez stosowania założeń upraszczających, opartą na teorii podobieństwa i badaniach doświadczalnych. Do analizy zastosowano metodę wyodrębnienia poszczególnych strat ciepła [7], nie stosowaną dotychczas. Pokazano możliwość wyznaczania strat ciepła przez konwekcję termomagnetyczną zarówno dla przypadków podobieństwa konwekcji naturalnej i termomagnetycznej jak i dla przypadków, gdy te podobieństwo nie zachodzi.

W przypadku ogólnym straty ciepła grzejnika przez przewodzenie gazu i konwekcję można przedstawić wyrażeniem

$$Nu = K_0 + o (Gr Pr)^a + o_5 \frac{\partial H \text{ grad } H}{\rho g} (GrPr)^b \quad (55)$$

w którym dla niewielkich zmian punktu pracy analizatora wykładniki  $a$ ,  $b$  mają wartości stałe.

Na rys. 8 pokazano, że w zależności od wybranego punktu pracy analizatora, przy czym wybór zależy od parametrów konstrukcyjnych, wartości  $a$ ,  $b$  ulegają zmianie w granicach około  $0,5 \pm 2$ . Wykładniki te, głównie  $b$ , mają duży wpływ na właściwości pomiarowe analizatora. Prowadzi to do stwierdzenia, że właściwości pomiarowe zależą od parametrów konstrukcyjnych analizatora, czego dotychczas nie wskazywano, wskutek stosowania założeń upraszczających zjawisko konwekcji termomagnetycznej w analizatorach tlenu.

#### STOSOWANE SYMBOLE

|         |  |
|---------|--|
| $a, b$  | - wykładniki potęgowe,                   |
| $o$     | - współczynnik bezwymiarowy,             |
| $C$     | - wielkość stała (z indeksem liczbowym), |
| $c_p$   | - ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem, |
| $d$     | - średnica grzejnika,                    |
| $f ( )$ | - funkcja,                               |
| $E_M$   | - energia magnetyczna,                   |
| $F$     | - siła,                                  |

- $F_T, F_M, F_W$  - siła wyporu termicznego, magnetycznego i siła wywołująca konwekcję wymuszoną przez siłę zewnętrzną,  
 $g$  - przyspieszenie ziemskie,  
 $Gr$  - Liczba Grashofa,  
 $H$  - natężenie pola magnetycznego,  
 $K$  - liczba charakteryzująca podobieństwo geometryczne układu wymiany ciepła,  
 $K_0$  - współczynnik kształtu układu zamkniętego wymiany ciepła charakteryzujący straty przez przewodzenie gazu ( $K_0 = Nu_p$ ),  
 $K_w$  - wartość liczby Nusselta dla przypadku równowagi sił napędowych konwekcji,  
 $l$  - charakterystyczny wymiar geometryczny,  
 $L$  - długość grzejnika,  
 $M$  - liczba równa stosunkowi  $\frac{W_M}{Gr}$ ,  
 $M_{O_2}$  - masa drobinowa tlenu,  
 $n$  - wykładnik potęgowy,  
 $Nu$  - liczba Nusselta,  
 $Nu_M$  - liczba charakteryzująca straty ciepła przez konwekcję termomagnetyczną,  
 $Nu_p$  - liczba charakteryzująca straty przez przewodzenie gazu,  
 $Nu_T$  - liczba charakteryzująca straty przez konwekcję naturalną,  
 $Nu_{T+M}$  - liczba charakteryzująca straty przez konwekcję naturalną i termomagnetyczną,  
 $p$  - ciśnienie gazu,  
 $Pr$  - liczba Prandtla,  
 $r$  - promień grzejnika,  
 $R$  - promień komory oraz stała gazowa,  
 $Re$  - liczba Reynoldsa,  
 $t$  - temperatura,  
 $T$  - temperatura bezwzględna,

|               |  |
|---------------|--|
| $T_m$         | - temperatura średnia,   |
| $w$           | - prędkość,  |
| $w_M$         | - prędkość konwekcji termomagnetycznej,                              |
| $w_T$         | - prędkość konwekcji naturalnej,                                     |
| $w$           | - liczba charakteryzująca konwekcję,                                 |
| $w_M$         | - liczba charakteryzująca konwekcję termomagnetyczną,                |
| $w_T = Gr$    | - liczba charakteryzująca konwekcję naturalną,                       |
| $w_w = Re$    | - liczba charakteryzująca konwekcję wymuszoną,                       |
| $V$           | - objętość gazu,   |
| $V_{O_2}$     | - objętość tlenu w mieszaninie,                                      |
| $x$           | - współrzędna, odległość,  |
| $y$           | - współrzędna,   |
| $Z$           | - liczba korygująca algorytm $w_M$ ,                                 |
| $\delta$      | - wymiar charakterystyczny w liczbie Grashofa<br>$\delta = R-r$ ,    |
| $\beta$       | - $\frac{1}{T_m}$ , współczynnik rozszerzalności objętościowej gazu, |
| $\eta$        | - lepkość dynamiczna,  |
| $\lambda$     | - przewodność cieplna,   |
| $\mathcal{H}$ | - podatność magnetyczna objętościowa,                                |
| $\chi$        | - podatność magnetyczna właściwa,                                    |
| $\mu$         | - przenikalność magnetyczna ( $\mu = 1 + 4\pi\mathcal{H}$ ),         |
| $\varphi$     | - udział objętościowy tlenu w mieszaninie gazów,                     |
| $\Theta$      | - różnica temperatur,  |
| $\rho$        | - gęstość gazu.  |

## LITERATURA

- [1] Agiejkin D.I.: Opredielenie tepłootdaczi posriedstwom termomagnitnoj konwekcii. Dokłady Akademii Nauk ZSRR. T. 74, 1950, Nr 2, s.229.

- [2] Agiejkin D.I.: Magnitnyje gazoanalizatory. Gosenergoizdat 1963.
- [3] Worobiew I.N.: Niekotoryje woprosy teorii priborow osnovannyh na ispolzovanii jawlenija konwiewktivnoj tieplootdaczii. Sbornik rabot po awtomatike i tielemechanike Izd. Akad. Nauk ZSSR, 1956, s.94.
- [4] Krupp H.: Zur Theorie der thermomagnetischen Sauerstoffmessgeräte. Zeitschrift f. angew. Physik, 3/1954/12, s. 541-547. Lub  
Theorie der thermomagnetischen Sauerstoffmessung. Dissertation Technische Hochschule Karlsruhe.
- [5] Mironow W.D.: Magnitnyj kislorodomier. W zbiorze: Awtomatizacija tieplowych elektrostancji Gosenergoizdat 1959.
- [6] Frązcek J., Piotrowski J., Romer E.: Termomagnetyczny analizator tlenu KTM-7. Pomiary Automatyka Kontrola nr 10/11, 1963, 581-84.
- [7] Piotrowski J.: Heat Exchange by Natural Convection in a Closed Semicircular System. Archiwum Budowy Maszyn nr 2/1967.
- [8] Chołow F.M.: Ustranienije wlijanija niezmiarajemych komponentow i dawlenija analizirujemowo gaza na pokazanija tiermomagnitnyh gazoanalizatorow. W książce: Awtomatizieskije gazoanalizatory, CINTI EP i P - 1961, s.120.



## О ТЕРМОМАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ В ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ НА КИСЛОРОД

## Р е з ю м е

Явление термомангнитной конвекции практически используется для измерения концентрации кислорода. Используется зависимость тепловых потерь от концентрации кислорода. Показано интерпретацию явления и способ расчета тепловых потерь через термомангнитной конвекцию применяемые до сих пор, проанализировано эти и осуществлено экспериментальные исследования проверяющие их правильность и практической пригодность. Указано новой интерпретацию и способ определения этих потерь без сокращающих закладок, которых использование вело к несоответствующим результатам и ошибочной оценки измерительных свойств термомангнитных газоанализаторов.

## THERMOMAGNETIC CONVECTION IN OXYGEN ANALYSERS

## S u m m a r y

Practical use is made of thermomagnetic convection effect for determination of oxygen concentration. A relation between heat losses and oxygen concentration is utilized. An interpretation of the phenomenon is provided and the existing methods for calculation of thermomagnetic convection heat losses are discussed and checked experimentally. New interpretation and method for calculation of the losses is suggested without certain simplifications which let to unsatisfactory results and erroneous evaluation of measuring properties of oxygen analysers.