

Ewald WYSTĘP

Instytut Techniki Ciepłej

Bronisław SIKORA

Instytut Fizyki

WYZNACZANIE CZASU POMIARU WILGOTNOŚCI GAZÓW W HIGROMETRZE IZOCHORYCZNYM
Z ZASTOSOWANIEM TERMOELEKTRYCZNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Streszczenie. W artykule wykazano możliwość wykorzystania termoelektrycznego wymiennika ciepła w higrometrze izochorycznym do ogrzewania i chłodzenia badanego gazu. Przytoczono również przykład ilustrując prostotę i niezawodność działania proponowanego wymiennika.

1. WSTĘP

Gazy wilgotne są mieszaniną gazu suchego i pary wodnej. Stężenie pary wodnej w gazach jest parametrem zmiennym, który można mierzyć różnymi metodami. Jeden ze sposobów pomiaru stopnia zawilżenia gazów, wykorzystujący zjawisko izochorycznego wykrapalania pary wodnej, opracowano w Instytucie Techniki Ciepłej (rys. 1) [1].

Przy obniżaniu temperatury próby badanego gazu wilgotnego (zawartego w komorze o objętości V) poniżej temperatury nasycenia, część pary wodnej wykropli się. Zmierzony U - rurką spadek ciśnienia, spowodowany obniżeniem temperatury gazu i kondensacją pary wodnej wyraża się wzorem

$$p = p_1 - p_2, \quad (1.1)$$

gdzie:

p_1 jest ciśnieniem gazu w temperaturze T_1 ,

p_2 jest ciśnieniem gazu w temperaturze T_2 .

Ciśnienie początkowe p_1 najczęściej będzie równe ciśnieniu otoczenia ($p_1 = p_{ot}$). Zmierzony spadek ciśnienia Δp przyjmie postać sumy dwóch różnic

$$\Delta p = \Delta p_{\Delta T} + \Delta p_{H_2O}. \quad (1.2)$$

We wzorze tym przez $\Delta p_{\Delta T}$ oznaczono spadek ciśnienia gazu spowodowany obniżeniem jego temperatury. Natomiast Δp_{H_2O} jest różnicą ciśnienia, spowodowaną częściowym wykropleniem się pary wodnej.

Molowy stopień zawilżenia gazu oblicza się ze wzoru

$$x_z = \frac{n_{H_2O}}{n_{gs}}, \quad (1.3)$$

w którym n_{H_2O} jest całkowitą ilością pary wodnej, obliczonej z następującego wzoru

$$n_{H_2O} = \frac{V}{(MR)} \cdot \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} + \frac{p_{s2}}{T_2} \right), \quad (1.4)$$

gdzie p_{s2} jest ciśnieniem nasycenia pary wodnej w temperaturze T_2 .

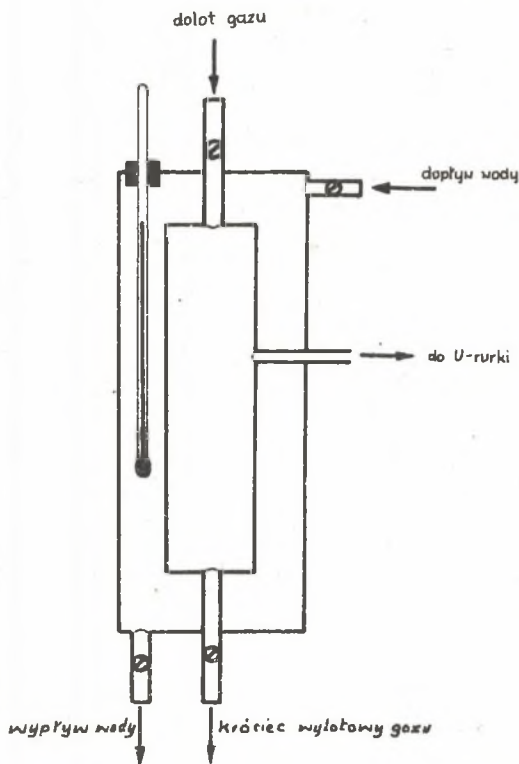
Liczbę moli gazu suchego można obliczyć z zależności

$$n_{gs} = \frac{V}{(MR)} \cdot \frac{p_2 - p_{s2}}{T_2}, \quad (1.5)$$

gdzie iloczyn (MR) stanowi uniwersalną stałą gazową niezależną od rodzaju gazu.

Podstawiając zależności (1.4) i (1.5) do wzoru (1.3), otrzymamy następujący wzór

$$x_z = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{p_1}{p_1 - \Delta p - p_{s2}} - 1. \quad (1.6)$$



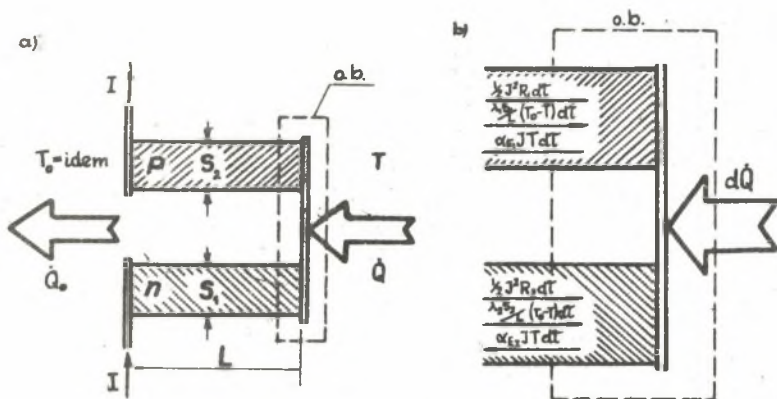
Rys. 1. Schemat higrometru izochorycznego

Aby zapewnić dobrą dyspozycyjność higrometru do pomiarów na obiektach rzeczywistych, w których stopień zawilżenia i temperatura gazu zmieniają się w szerokich granicach, wymiennik ciepła musi zagwarantować zmianę temperatury gazu w komorze pomiarowej od 0° do 100°C . W istniejącym higrometrze grzanie - względnie schładzanie - próbki gazu realizowane jest za pomocą strumienia wody, z czym związane są pewne niedogodności. Na przykład, ze względu na to, że temperatura wody w instalacjach wodociągowych zależy od pory roku i waha się od 12° do 20°C , nie można badać stopnia zawilżenia gazów, których temperatury są niższe od temperatury wody chłodzącej. Do wad zaliczyć należy też konieczność instalowania higrometru w pobliżu instalacji wodociągowej. Te niedogodności można ominąć przez zasto-

sowanie w higrometrze wymiennika ciepła opartego na działaniu złącza termoelektrycznego zasilanego prądem stałym.

2. OGÓLNE RÓWNANIE BILANSU ENERGII ZŁĄCZA TERMOELEKTRYCZNEGO

Przepływający przez termoelement prąd stały wywołuje na jego złączach różnicę temperatur, którą można wyznaczyć z równania bilansu energii.



Rys. 2. Schemat elementarnego termoelektrycznego wymiennika ciepła

Bilans energii złącza, posiadającego temperaturę T , dla dowolnie małego interwału czasu dt ma następującą postać

$$dQ = \left[\alpha_E \cdot T \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - \frac{\lambda \cdot S}{L} \cdot (T_0 - T) \right] \cdot dt + m_z \cdot c_z \cdot dT. \quad (2.1)$$

Pierwszy człon w klamrze prawej strony równania (2.1) określa dodatnią wartość wydajności cieplnej (rys. 2) złącza, przy zastosowaniu materiałów idealnych. Kierunek przepływającego prądu elektrycznego, powodującego ten efekt chłodzenia gazu, również przyjęto za dodatni $I_{ch} > 0$ (rys. 2a). Gdy kierunek prądu elektrycznego będzie przeciwny $I_g < 0$, to efekt Peltiera również zmieni swój zwrot i gaz (w komorze) będzie ogrzewany [3], [4], [7]. Występująca tu wielkość α_E jest zastępczą względną siłą termoelektryczną, wyrażoną w $\frac{V}{K}$, którą oblicza się ze wzoru

$$\alpha_E = \alpha_{E1} - \alpha_{E2} \quad (2.2)$$

gdzie α_{E1} i α_{E2} są współczynnikami siły termoelektrycznej elektrod. Drugi wyraz natomiast stanowi ciepło (połowa wydzielonego w elektrodach ciepła Joule'a [2], [3], [5], [6] i [7]), które dopływa do złącza (rys. 2) o temperaturze T . Występujący w tym wyrażeniu opór R można wyznaczyć ze wzoru

$$R = R_1 + R_2 = \left(\frac{\rho_1}{s_1} + \frac{\rho_2}{s_2} \right) \cdot L, \quad (2.3)$$

w którym ρ_1 i ρ_2 są opornościami właściwymi materiałów elektrod, zaś L oznacza długość elektrod. Trzeci człon w równaniu (2.1) jest ciepłem przewodzone od złącza cieplejszego (T_0) do zimniejszego (T). Ułamek $\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)$ przedstawia pewną wartość zastępczą, którą można obliczyć z zależności

$$\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) = (\lambda_1 \cdot s_1 + \lambda_2 \cdot s_2) \cdot \frac{1}{L}. \quad (2.4)$$

Występujące tu wielkości λ_1 i λ_2 są przewodnościami cieplnymi elektrod. Ostatni człon prawej strony omawianego równania wyraża przyrost energii układu.

Należy nadmienić, że w równości (2.1) pominięto straty ciepła na rzecz otoczenia oraz efekt cieplny Thomsona [2] i [7]. Występujące w równaniu wielkości α_E , R i λ w ścisłym ujęciu są funkcjami temperatury. Przy rozwiązywaniu równania zrezygnowano z tych zależności, ponieważ zmiany ich wartości w omawianym przedziale temperatur są niewielkie.

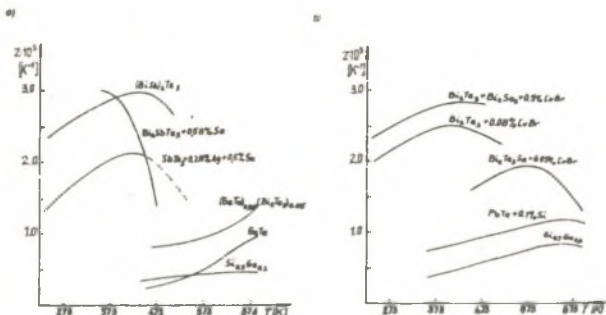
3. MATERIAŁY UŻYWANE DO BUDOWY ELEKTROD TERMIELEKTRYCZNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Z przytoczonych zależności (2.3) i (2.4) wynika, że doniosłą rolę przy konstrukcji złącza termoelektrycznego odgrywa materiał, z którego wykonane są elektrody. Materiał ten jest charakteryzowany za pomocą tzw. parametru dobroci z . Parametr dobroci z określa wzór Joffe'a [3] i [4]

$$z = \frac{\alpha_E^2}{\rho \cdot \lambda}. \quad (3.1)$$

który służy również do ekonomicznej oceny użytych materiałów, zastosowanych do budowy termoelementów.

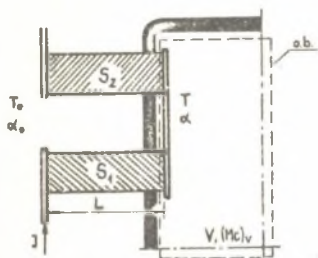
Obecnie znamy wiele materiałów posiadających dobre właściwości termoelektryczne [6] (Tablica 1). Najlepszymi jednak materiałami są półprzewodniki, dla których parametr dobroci przyjmuje wartości największe (rys. 3).



Rys. 3. Zależności współczynnika dobroci z od temperatury

Tablica 1

Materiał	Typ przewodnictwa	t °C	$\alpha_E \cdot 10^6 \frac{V}{K}$	$\rho \cdot 10^6 \Omega \text{ cm}$	$\lambda \cdot 10^3 \frac{W}{\text{cm K}}$	$z \cdot 10^3 (K)^{-1}$
Bi ₂ Te ₃ - Bi ₂ Se ₃	n	20	-170	1000	12	3,0
Bi ₂ Te ₃ - Sb ₂ Te ₃	p	20	160	670	14	2,8
Sb ₂ Te ₃	p	20	100	330	32	0,9
PbTe-PbSe	n	20	-160	1100	12	1,8
MnSi	p	20	102	260	42	0,96
PbTe	p	27-600	125	357	18-20	1,16
PbSe	n	20	-160	910	24	1,35
Konstantan	n	27-1000	-43	49	372	0,086
Fe	p	27	12,3	13,2	170	0,00007



Rys. 4. Schemat zabudowania elementu termoelektrycznego wmiennika ciepła w komorze higrometru

4. CZAS TRWANIA POMIARU DLA ZAŁOŻENIA, ŻE WSPÓŁCZYNNIKI WNIKANIA CIEPŁA SĄ NIESKOŃCZENIE WIELKIE

Istotnym zagadnieniem jest czas potrzebny na wykonanie pomiaru. W ogólności czas ten τ_{∞} jest określony przez sumę trzech czasów

$$\tau_{\infty} = \tau_{\eta\infty} + \tau_{ch\infty} + \tau_p \quad (4.1)$$

gdzie:

$\tau_{g\infty}$ - jest czasem ogrzania gazu do żądanej temperatury,

$\tau_{ch\infty}$ - jest czasem chłodzenia,

τ_p - jest czasem potrzebnym na pobranie próbki, jej ogrzanie do temperatury T_1 , pomiar ciśnienia i temperatury i inne czynności.

Zatem $\tau_p > \tau_{g\infty}$. W celu określenia poszczególnych czasów przyjmuje się, że w czasie pomiaru w komorze higrometru znajduje się n moli gazu. Ilość ciepła odprowadzoną od gazu przy zmianie jego temperatury o dT_g określa wzór

$$dQ = -n \cdot (M c_v) \cdot dT_g. \quad (4.2)$$

Przy założeniu nieskończenie wielkich współczynników wnikańia ciepła zachodzi równość temperatur gazu i złącza, $T = T_g$.

Rozpatrując proces ogrzewania gazu w komorze, w której umieszczono "i" złącz termoelektrycznych, równanie bilansu będzie miało postać

$$\begin{aligned} -\left[n \cdot (M c_v) + m_z \cdot c_z \cdot i \right] \cdot dT = \left[\alpha_E \cdot T \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \right. \\ \left. - \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot (T_0 - T) \right] \cdot i \cdot dt. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Drugi człon w nawiasie lewej strony równania (4.3) stanowi pojemność cieplną elementów konstrukcyjnych układu (rys. 4 - elektrod, złącza, obudowy komory i części izolacji). Całkując to równanie w granicach $(0; \tau_{kg\infty})$ i $(T_1; T_{kg})$, dla czasu $\tau_{kg\infty}$, otrzymamy zależność

$$\tau_{kg\infty} = \frac{n \cdot (M c_v) + m_z \cdot c_z \cdot i}{i \cdot \left[\alpha_E \cdot I_g + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \right]} \cdot \ln \frac{T_1 - \frac{\frac{1}{2} \cdot I_g^2 \cdot R + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot T_0}{\alpha_E \cdot I_g + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}}{T_{kg} - \frac{\frac{1}{2} \cdot I_g^2 \cdot R + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot T_0}{\alpha_E \cdot I_g + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}} \quad (4.4)$$

Dla przypadku chłodzenia, równanie (4.3) należy całkować w granicach $(0; \tau_{kch\infty})$ i $(T_{kg}; T_{kch})$, a zatem

$$\tau_{kch\infty} = \frac{n \cdot (M c_v) + m_z \cdot c_z \cdot i}{i \cdot \left[\alpha_E \cdot I_{ch} + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \right]} \cdot \ln \frac{T_{kg} - \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{ch}^2 \cdot R + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot T_0}{\alpha_E \cdot I_{ch} + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}}{T_{kch} - \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{ch}^2 \cdot R + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot T_0}{\alpha_E \cdot I_{ch} + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}} \quad (4.5)$$

Czas jednego pomiaru można więc obliczyć ze wzoru (4.1), po oznaczeniu τ_p oraz po wykorzystaniu ostatnich dwóch równań.

5. RZECZYWISTY CZAS POMIARU

W celu ustalenia rzeczywistego czasu pomiaru

$$\tau_{rz} = \tau_{chrz} + \tau_{grz} + \tau_p \quad (5.1)$$

należy znaleźć związek łączący temperaturę gazu i czas. Pamiętając, że i tutaj zachodzi nierówność $\tau_p > \tau_{grz}$, podobnie jak w równaniu (4.1).

Zależność czasu od temperatury można ustalić za pomocą bilansu energii. Energię gazu zamkniętego w komorze higrometru określa równanie (4.2). Ciepło to w całości dopływa (lub odpływa) do powierzchni złącza elektrod termoelementów. Zatem równanie bilansu przyjmie następującą postać

$$\begin{aligned} -n \cdot (Mc_V) \cdot dT_g - m_z \cdot c_z \cdot i \cdot dT = & \left[\alpha_E \cdot T \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \right. \\ & \left. - \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot (T_0 - T) \right] \cdot i \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Również prawdziwa jest zależność (5.3)

$$-n \cdot (Mc_V) \cdot dT_g = i \cdot s \cdot \alpha \cdot (T_g - T) \cdot d\tau. \quad (5.3)$$

Symbol s oznacza sumę powierzchni przekrojów poprzecznych elektrod, zaś α jest współczynnikiem wnikania ciepła od gazu badanego do złącza elektrod.

W rzeczywistym układzie współczynniki wnikania ciepła nie są nieskończenie wielkie, a zatem od strony temperatury T_0 (rys. 2) wystąpi różnica temperatur $(T_0 - T_{\infty})$, gdzie T_{∞} jest temperaturą czynnika chłodzącego złącze o temperaturze T_0 . Ciepło przekazane chłodziwu o temperaturze T_{∞} określa zależność

$$\alpha_0 \cdot s \cdot (T_0 - T_{\infty}) \cdot d\tau = \left[\alpha_E \cdot I \cdot T_0 + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot (T_0 - T) \right] \cdot d\tau - m_z \cdot c_z \cdot dT_0, \quad (5.4)$$

gdzie:

T_{∞} = idem,

α_0 - jest współczynnikiem wnikania ciepła ze złącza o temperaturze T_0 do czynnika chłodzącego o temperaturze T_{∞} .

Po obliczeniu z równania (5.2) temperatury T i podstawieniu jej do równania (5.3) i (5.4) oraz uporządkowaniu składników, otrzymamy następujący układ równań różniczkowych niejednorodnych

$$\frac{d^2 T_g}{dt^2} + A \cdot \frac{dT_g}{dt} + B \cdot T_g + C \cdot T_0 = D \quad (5.5)$$

i

$$\frac{dT_g}{dt} + E \cdot T_g + F \cdot \frac{dT_0}{dt} + G \cdot T_0 = H, \quad (5.6)$$

w których współczynniki stałe dla zadanej wartości natężenia prądu oblicza się z następujących wzorów

$$a) \quad A = \frac{n \cdot (Mc)_v + m_z \cdot c_z \cdot i + \left[\alpha_E \cdot I + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \right] \cdot \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}}{m_z \cdot c_z + \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}}$$

$$b) \quad B = \frac{\alpha_E \cdot I + \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}{m_z \cdot c_z + \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \cdot i,$$

$$c) \quad C = - \frac{\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right)}{m_z \cdot c_z + \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \cdot i,$$

$$d) \quad D = \frac{\frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R}{m_z \cdot c_z + \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \cdot i,$$

$$e) \quad E = \frac{s \cdot \alpha}{n \cdot (Mc)_v} \cdot i,$$

$$f) \quad F = - \frac{m_z \cdot c_z}{\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \cdot i,$$

$$g) \quad G = \frac{\alpha_E \cdot I - \left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) - \alpha_0 \cdot s}{\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \cdot i$$

i

$$h) \quad H = - \frac{\alpha_0 \cdot s \cdot T_0 + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R}{\left(\frac{\lambda \cdot s}{L} \right) \cdot \frac{n \cdot (Mc)_v}{s \cdot \alpha}} \quad i$$

Przekształcając dalej układ równań (5.5) i (5.6), otrzymamy jedno równanie różniczkowe liniowe trzeciego rzędu ze względu na temperaturę T_g .

$$\frac{d^3 T_g}{d\tau^3} + \beta \cdot \frac{d^2 T_g}{d\tau^2} + \gamma \cdot \frac{dT_g}{d\tau} + \mu \cdot T_g = \nu. \quad (5.8)$$

Całkę ogólną tego równania można przedstawić w postaci sumy

$$T_g = T_{gL} + T_{gP}, \quad (5.9)$$

gdzie T_{gL} jest całką ogólną równania jednorodnego, a T_{gP} całką szczególną równania (5.8). Współczynniki β , γ , μ i ν wyznaczają się z następujących wyrażen

$$a) \quad \beta = A + \frac{G}{F},$$

$$b) \quad \gamma = B + \frac{A \cdot G - C}{F} \quad (5.10)$$

$$c) \quad \mu = \frac{B \cdot G - C \cdot E}{F}$$

oraz

$$d) \quad \nu = \frac{G \cdot D - C \cdot H}{F}$$

Przewidując, że całka równania jednorodnego (5.8) będzie miała postać

$$T_{gL} = k \cdot e^{\varphi \cdot \tau}, \quad (5.11)$$

można napisać równanie charakterystyczne

$$\varphi^3 + \beta \cdot \varphi^2 + \gamma \cdot \varphi + \mu = 0. \quad (5.12)$$

Na mocy wzoru Cardana pierwiastki równania (5.12) mają postać

$$a) \quad \varphi_1 = u + v - \frac{\beta}{3},$$

$$b) \quad \varphi_2 = \epsilon_1 \cdot u + \epsilon_2 \cdot v - \frac{\beta}{3}, \quad (5.13)$$

$$c) \quad \varphi_3 = \epsilon_2 \cdot u + \epsilon_1 \cdot v - \frac{\beta}{3}.$$

gdzie

$$d) \quad u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}, \quad v = \sqrt[3]{-1 - \sqrt{q^2 + p^3}}.$$

$$e) \quad p = \frac{1}{3} \cdot \gamma + \frac{1}{9} \cdot \beta^2, \quad q = \frac{1}{2} \cdot \mu - \frac{1}{3} \cdot \beta^2 - \frac{1}{6} \cdot \beta \cdot \gamma.$$

Czynniki ϵ_1 i ϵ_2 oblicza się ze wzorów

$$f) \quad \epsilon_1 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot j \sqrt{3}, \quad \epsilon_2 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot j \cdot \sqrt{3}.$$

Liczba pierwiastków rzeczywistych równania charakterystycznego zależy od znaku wyróżnika

$$W = q^2 + p^3. \quad (5.14)$$

W przypadku rozpatrywania chłodzenia i grzania gazu w zakresie zmienności natężenia prądu elektrycznego w granicach $0 \leq I_{ch} \leq 30 \text{ A}$, $-30 \text{ A} \leq I_g \leq 0$ można wykazać, że wyróżnik W równania charakterystycznego (5.12) jest mniejszy od zera. Zatem równanie (5.12) ma trzy pierwiastki rzeczywiste.

Przystępując do pomiaru stopnia zawilżenia gazu pobiera się gaz do ogrzanej komory higrometru i wyczekuje się, aż do chwili, gdy temperatura badanego gazu zrówna się z temperaturą ścian komory. Teraz można przystąpić do pomiaru ciśnienia p_1 i temperatury t_1 . W omawianym higrometrze przyjęto $t_1 = 100^\circ\text{C}$, a $t_2 = 0^\circ\text{C}$.

Warunki początkowe równania (5.8) w przypadku chłodzenia są następujące

$$a) \quad T_g(\tau = 0) = 373,15^\circ\text{K}; \quad T(\tau = 0) = 373,15^\circ\text{K},$$

$$b) \quad \left. \frac{dT_g}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad (5.15)$$

$$c) \quad \left. \frac{d^2 T_g}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} = D - B \cdot T_g(\tau = 0) - C \cdot T_o(\tau = 0),$$

z których wynika, że

$$T_{gp} = \frac{\gamma}{\mu}. \quad (5.16)$$

Zatem całkę ogólną można napisać w postaci

$$T_g = k_{1ch} \cdot e^{\varphi_1 \tau} + k_{2ch} \cdot e^{\varphi_2 \tau} + k_{3ch} \cdot e^{\varphi_3 \tau} + \frac{\gamma}{\mu}. \quad (5.17)$$

Korzystając z warunków początkowych można wypisać układ równań, z których wyznaczyć się stałe całkowania k_{1ch} , k_{2ch} , i k_{3ch}

$$k_{1ch} + k_{2ch} + k_{3ch} = 373,15 - \frac{p}{\mu}$$

$$\varphi_1 \cdot k_{1ch} + \varphi_2 \cdot k_{2ch} + \varphi_3 \cdot k_{3ch} = 0 \quad (5.18)$$

$$\varphi_1^2 \cdot k_{1ch} + \varphi_2^2 \cdot k_{2ch} + \varphi_3^2 \cdot k_{3ch} = D - B \cdot T_g(\tau = 0) - C \cdot T_0(\tau = 0).$$

Rzeczywisty czas chłodzenia τ_{chrz} można wyznaczyć metodą numeryczną lub odczytać z wykresu zależności $T_{gch}(\tau)$ dla przypadku $T_{gkch} = 273,15^\circ\text{K}$.

W celu uniknięcia częściowego wykroplenia wody z gazu, podczas przepływania higrometru należy ogrzać ścianki komory pomiarowej do temperatury równej lub wyższej od temperatury pobranego gazu, na przykład do 100°C . Stąd dla procesu ogrzewania gazu zamkniętego w komorze higrometru przyjmuje się następujące warunki

$$T_g(\tau = 0) = T_{g1};$$

a)

$$T(0 \leq \tau < \infty) = 373,15 \text{ K}$$

b)

$$\left. \frac{dT_g}{d\tau} \right|_{\tau=0} = - \frac{1 \cdot s \cdot \alpha}{n \cdot (Mc)_v} \cdot (T_{g1} - 373,15)$$

lub

(5.19)

c)

$$\left. \frac{dT_g}{d\tau} \right|_{\tau=0} = - E \cdot (T_{g1} - 373,15)$$

$$\left. \frac{d^2 T_g}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} = D + A \cdot E \cdot (T_{g1} - 373,15) - B \cdot T_{g1} - C \cdot T_0.$$

Zatem całka ogólna równania ma postać

$$T_g = k_{1g} \cdot e^{\varphi_1 \cdot \tau} + k_{2g} \cdot e^{\varphi_2 \cdot \tau} + k_{3g} \cdot e^{\varphi_3 \cdot \tau} + \frac{p}{\mu}. \quad (5.20)$$

Wykorzystując warunki początkowe, otrzymamy układ równań, z którego można obliczyć k_{1g} , k_{2g} , i k_{3g} . Zatem

$$k_{1g} + k_{2g} + k_{3g} = T_{g1} - 373,15$$

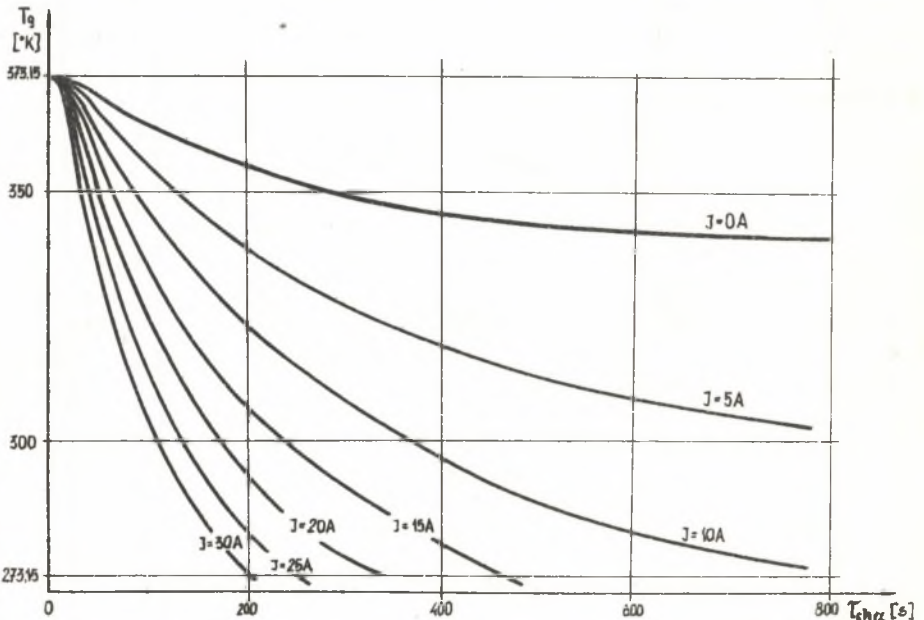
$$\varphi_1 \cdot k_{1g} + \varphi_2 \cdot k_{2g} + \varphi_3 \cdot k_{3g} = -E \cdot (T_{g1} - 373,15) \quad (5.21)$$

$$\varphi_1^2 \cdot k_{1g} + \varphi_2^2 \cdot k_{2g} + \varphi_3^2 \cdot k_{3g} = D + A \cdot E \cdot (T_{g1} - 373,15) - B \cdot T_{g1} - C \cdot T_0$$

Rzeczywisty czas ogrzewania τ_{grz} można obliczyć podobnie, jak rzeczywisty czas chłodzenia. Najwygodniej będzie sporządzić wykres $(T_g; \tau)$ i dla przypadku T_{g1} odczytać rzeczywisty czas ogrzewania gazu τ_{grz} .

6. PRZYKŁAD OBLICZENIA CZASÓW SCHŁADZANIA PRÓBKII GAZU

Dla porównania czasów schładzania próbki gazu ($\tau_{ch\infty}$ i τ_{chrz}) od 100° do 0°C przytoczono wyniki obliczeń (zawarte w tabelicy 2 i na wykresach nr 5 i 6) dla różnych wartości natężenia prądu elektrycznego.

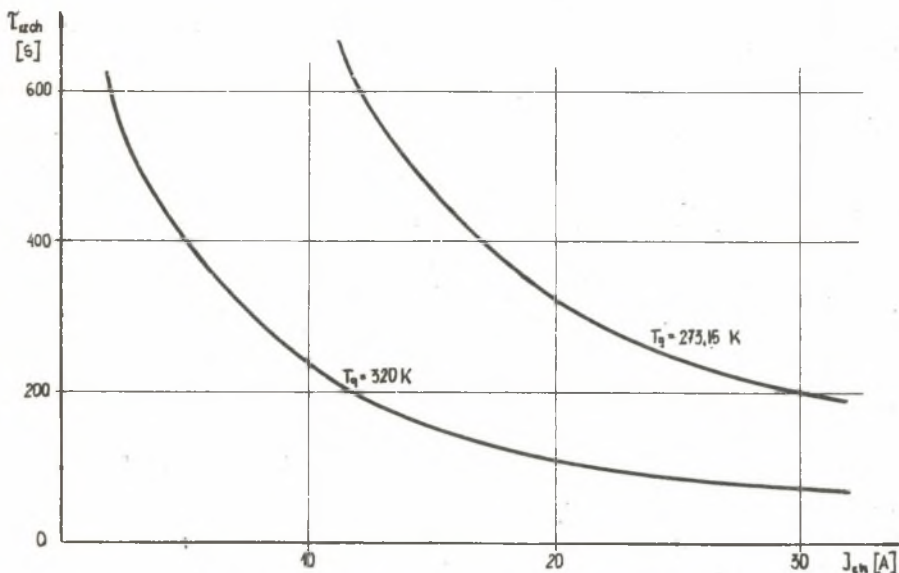


Rys. 5. Zależność temperatury próbki badanego gazu od czasu, przy różnych wartościach I_{ch}

(Wykres odnosi się do konkretnego higrometru)

Tabela 2

I_{ch}	A	5	10	15	20	25	30
$\tau_{ch\infty}$	s	1715	545	356	269	220	187



Rys. 6. Zależność czasu chłodzenia τ_{ch} od natężenia prądu elektrycznego

(Wykres odnosi się do konkretnego higrometru)

Obliczenia wykonano dla przyrządu o objętości komory pomiarowej $V = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ i termoelektrycznego wymiennika ciepła, zbudowanego z 16 termoelementów połączonych szeregowo. Jako próbkę gazu przyjęto spaliny o składzie: CO_2 , O_2 , i N_2 równym odpowiednio 15%, 6% i 79%, przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$.

Obliczona wartość zastępcza pojemności cieplnej elektrod, izolacji i ścianek komory wynosi $m_z \cdot c_z = 29,8 \frac{\text{J}}{\text{K}}$, a badanej próbki spalin $n \cdot (Mc)_V = 0,2 \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Elektrody wykonane są z materiałów półprzewodnikowych, na bazie Bi_2Te_3 (tablica 1). Jedna elektroda wykonana jest ze stopu $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$, a druga ze stopu $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$. Taki zestaw półprzewodników zapewnia, że w zakresie temperatur (0-100°C) współczynnik dobroci $Z_{\text{śred}} = 2,8 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$. Obliczone wartości współczynników wnikania ciepła wynoszą: $\alpha_0 = 4910 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ od strony złącza o temperaturze T_0 (rys. 2a) i $\alpha = 7560 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ od strony złącza o temperaturze T . Ponadto do obliczeń przyjęto, że $\tau_0 = \tau_\infty = 320 \text{ K}$, $\alpha_E = 330 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V}}{\text{K}}$, $R = 4,98 \cdot 10^{-3} \Omega$ i $(\frac{h \cdot s}{L}) = 8,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{K}}$ i $s = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Obliczenia czasów $\tau_{ch\infty}$ i τ_{chrz} wykonano dla różnych wartości natężenia prądu elektrycznego.

Z tablicy 2 wynika, że dla wzrastającego natężenia prądu elektrycznego do 30 A, czas $\tau_{ch\infty}$ maleje. Z wykresów nr 5 i 6 również wynika, że τ_{chrz} maleje w miarę wzrostu natężenia prądu elektrycznego. Na przykład dla $I_{ch} = 20 \text{ A}$ rzeczywisty czas chłodzenia próbki gazu wynosi (rys. 5) $\tau_{chrz} = 340 \text{ s}$.

LITERATURA

- [1] Folwarczny J., Szymczyk J.: Pomiar zawartości pary wodnej w gazach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 8, 1973.
- [2] Ochotin A.S., Efremv A.A., Ochotin B.C., Puškarskij A.S.: Termoélektričeskie generatory. Atomizat Moskva, 1971.
- [3] Kaganov M.A., Privin M.R.: Termoélektričeskie teplovye nasosy. Energija, Leningrad 1970.
- [4] Celiński L.: Nowe metody wytwarzania energii elektrycznej. WNT, Warszawa 1977.
- [5] Zorin I.V., Zorin Z.J.: Termoélektričeskie choolidil'niki i generatory. Energija, Leningrad 1973.
- [6] Pozdnjakov B.S., Koptelov E.A.: Termoélektričkaja energetika. Moskva 1974.
- [7] Joffe A.: Termoelementy półprzewodnikowe. PWN, Warszawa 1957.

ИЗОХОРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Р е з ю м е

В статье показана возможность использования термоэлектрического теплообменника для нагревания и охлаждения исследуемого газа. Приведён также пример, иллюстрирующий простоту и надёжность действия предлагаемого теплообменника.

AN ISOCHORIC METHOD FOR MEASUREMENT OF HUMIDITY OF GASES WITH THE
APPLICATION OF THERMOELECTRIC HEAT EXCHANGER

S u m m a r y

A possibility has been presented of applying thermoelectric heat exchangers for heating and cooling of an investigated gas. An example has been provided illustrating the simplicity and reliability of the exchanger proposed.