

Edmund PIĘTKA

METODA POMIARU CIEPŁA UNOSZOWEGO STRUMIENIEM PARY AZOTU

Streszczenie. Przedstawiono sposób pomiaru strumienia masy pary azotu i unoszonego z nią ciepła za pomocą przepływomierzy Thomsona. Podano sposób cechowania przepływomierzy oraz określono uchyb graniczny pomiaru.

1. Wprowadzenie

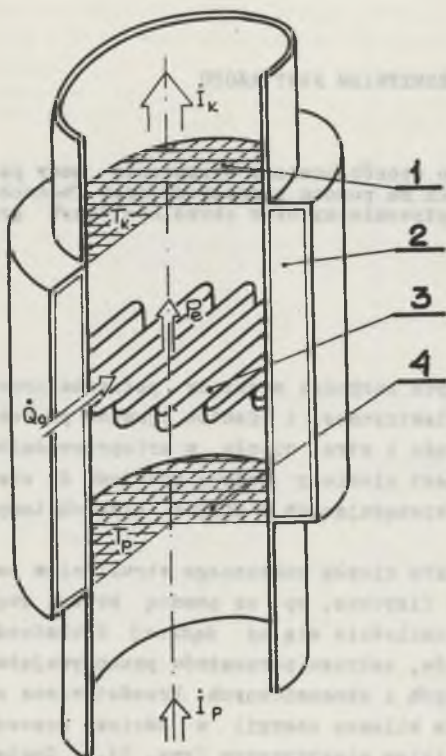
W badaniach krioelektrotechnicznych zachodzi niekiedy potrzeba określania korelacji strumieni energii elektrycznej i efektów zjawisk procesów termicznych. Zależność natężenia prądu i strat ciepła w krioprzewodniku jego ekranie i osłonie termicznej jest niekiedy jedyną podstawą do oceny efektów różnych jakościowo zjawisk występujących w fizyce niskich temperatur.

Znanych jest wiele sposobów pomiaru ciepła unoszonego strumieniem pary gazu, wykorzystujących różne efekty fizyczne, np. za pomocą kryzy, zwężki, rurki Pitota itp. Wybór metody uzależnia się od żądanej dokładności pomiaru, możliwości szybkich odczytów, zakresu parametrów przepływającego gazu oraz innych względów praktycznych i ekonomicznych. Przedstawiona metoda pomiaru oparta jest na równaniu bilansu energii w odcinku przewodu gazowego z zabudowanym w nim grzejnikiem elektrycznym (rys. 1). Została ona wykorzystana do pomiarów masy azotu oraz ciepła odprowadzanego z osłony termicznej kriotoru wielkoprądowego.

2. Zasada pomiaru

Strumień gazu podgrzewany jest na odcinku przewodu grzejnikiem elektrycznym, powodując wyraźny wzrost jego temperatury. Pomiar temperatury gazu wykonywany jest w dwóch przekrojach, wyznaczających odcinek pomiarowy przewodu (rys. 1). Urządzenie składające się z termometrów i grzejnika stanowi przepływomierz Thomsona. Strumień azotu w przepływomierzu jest proporcjonalny do energii doprowadzonej do gazu na odcinku pomiarowym i odwrotnie proporcjonalny do przyrostu entalpii właściwej gazu. Energia doprowadzona do gazu jest sumą energii elektrycznej dostarczonej przez grzejnik oraz energii, która w postaci ciepła wnika do gazu z otoczenia.

Dążąc do zminimalizowania wpływu ciepła z otoczenia na wynik pomiaru zastosowano próżniową osłonę termiczną izolującą odcinek pomiarowy przyrządu.



Rys. 1. Odcinek pomiarowy strumienia gazu w przepływomierzu Thomsona

Równanie bilansu energii dla odcinka pomiarowego przewodu ma postać:

$$\dot{P}_e + \dot{Q}_0 + \dot{I}_p = \dot{I}_k \quad (1)$$

gdzie:

\dot{P}_e - energia elektryczna doprowadzona do gazu,

\dot{Q}_0 - strumień ciepła wnikażącego do gazu z otoczenia,

\dot{I}_p, \dot{I}_k - entalpie gazu (początkowa i końcowa).

W oparciu o równanie (1) oraz definicję entalpii właściwej:

$$i = \frac{\dot{I}}{\dot{m}} \quad (2)$$

strumień przepływającego gazu określony jest zależnością:

$$\dot{m} = \frac{\dot{P}_e + \dot{Q}_0}{i_k - i_p} \quad (3)$$

Entalpie właściwe i_k oraz i_p gazu doskonałego, za jaki praktycznie można uznać azot, są funkcjami temperatury:

$$i_k = C_p T_k; \quad i_p = C_p T_p \quad (4)$$

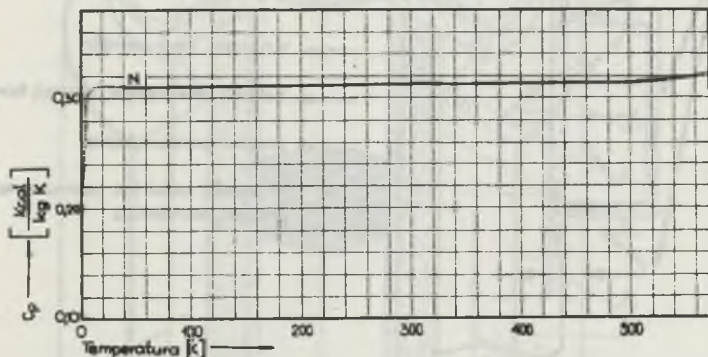
Zależność ciepła właściwego C_p azotu od temperatury pokazano na rys. 2.

Dla izobarycznego procesu wymiany ciepła w nieprzechłodzonej kriocieczy przyrost jej energii wewnętrznej równy jest zero, a entalpia właściwa określona jest utajonym ciepłem parowania azotu. Dla pomiarów realizowanych w takich warunkach ciepło unoszone strumieniem gazu równe jest energii cieplnej dostarczonej do kriocieczy i może być określone wzorem:

$$Q = \frac{P_e + \dot{Q}_o}{C_p (T_k - T_p)} r_t, \quad (5)$$

gdzie:

- r_t - utajone ciepło parowania azotu,
- C_p - ciepło właściwe azotu,
- T_p, T_k - temperatury gazu (początkowa i końcowa).



Rys. 2. Ciepło właściwe azotu w zależności od jego temperatury [1]

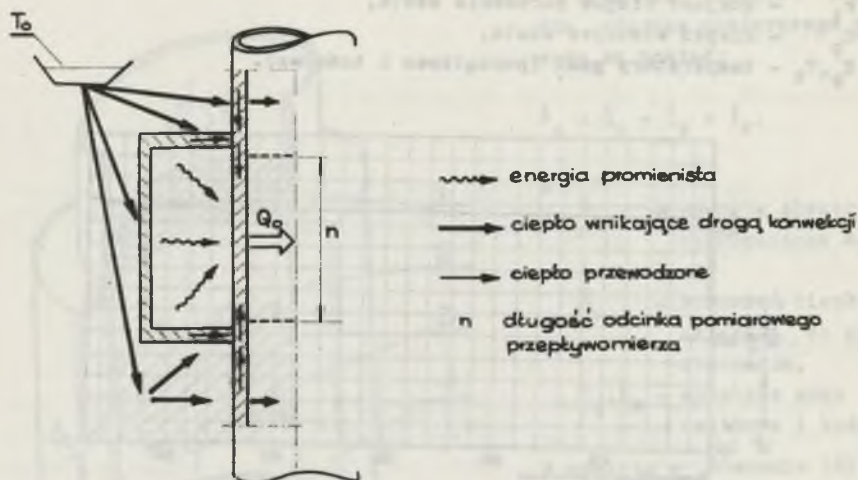
Określenie strumienia masy par azotu i unoszonego z nią ciepła wymaga pomiaru wielkości wchodzących w skład równania bilansu energii (3).

Pomiary określające entalpie właściwe gazu wygodnie jest wykonać za pomocą termoresystorów platynowych o kształcie siatki wypełniającej cały przekrój przewodu gazowego. Pozwala to na określenie średniej wartości temperatury w przekroju przewodu, co jest istotne zwłaszcza w przypadku niejednakowej temperatury w rdzeniu strumienia i przy ścianach przewodu. Różnice temperatur początkowej i końcowej zależne są od dostarczonej do grzejnika mocy oraz od efektów minimalizacji strumienia ciepła wnikającego z otoczenia.

Strumień ciepła wnikającego z otoczenia do odcinka pomiarowego przepływomierza jest główną przyczyną niedokładności pomiaru ilości gazu. Jednym z rozwiązań konstrukcyjnych ograniczających napływ ciepła z otoczenia jest zastosowanie próżniowej izolacji termicznej. Przy takim rozwiązaniu praktycznym strumień ciepła wnika do ścian przyrządu a następnie do gazu w następstwie konwekcji powietrza otaczającego osłonę i drogą promieniowania od wewnętrznych ścian osłonki do ściany odcinka pomiarowego.

Strumień ciepła z otoczenia wnika do przyrządu zarówno przed, jak i za przepływomierzem. Wynikiem zaizolowania odcinka pomiarowego przewodu jest obniżenie jego temperatury. Wywołany w ten sposób spadek temperatury powoduje napływ ciepła wzdłuż ścian przewodu z obu stron odcinka pomiarowego.

Sposób wnikania ciepła z otoczenia do przepływomierza pokazano na rys. 3.



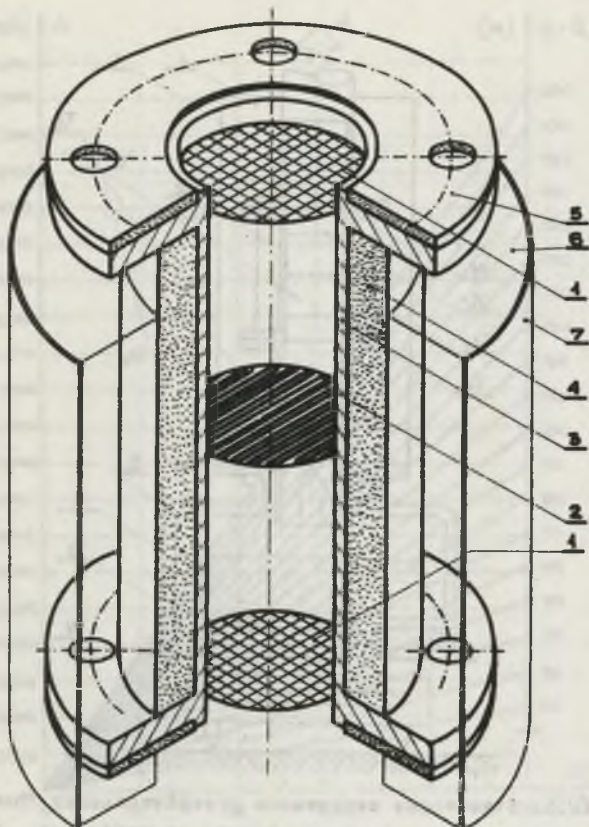
Rys. 3. Składowe strumienie ciepła Q_0 wnikającego z otoczenia do przepływomierza Thomsona

Napływ ciepła z otoczenia do przepływomierza wzdłuż ścian przewodów metalowych ograniczono dodatkową izolacją termiczną nałożoną na przepływomierz i przewód odprowadzania pary azotu (rys. 4). Izolacja ta zmniejszając napływ ciepła z otoczenia powoduje jednocześnie zmniejszenie wahań jego wartości w zależności od temperatury gazu w odcinku pomiarowym przyrządu. Wartości strumienia ciepła Q_0 w zależności od temperatury gazu związanej z natężeniem jego przepływu oraz z mocą grzejnika pomiarowego P_e określono doświadczalnie w czasie cechowania przepływomierzy.

3. Cechowanie przepływomierzy

Cechowania przyrządów można dokonać na drodze porównania ubytków masy ciekłego azotu w naczyniu Dewara ze wskazaniami przepływomierzy (rys. 5).

Na wadze (W) ustawione jest naczynie Dewara (D) z wrzącym azotem oraz przewód (C) odprowadzający gaz z zainstalowanym w nim przepływomierzem (N). W ciekłym azocie zanurzony jest grzejnik elektryczny (G) o regulowanej gęstości strumienia ciepła na jego powierzchni. Zadaniem grzejnika jest regulacja natężenia przepływu masy par azotu w przewodzie. Zależność ubytków masy ciekłego azotu w naczyniu Dewara od czasu dla różnych wartości mocy grzejnika pokazano na rys. 6.

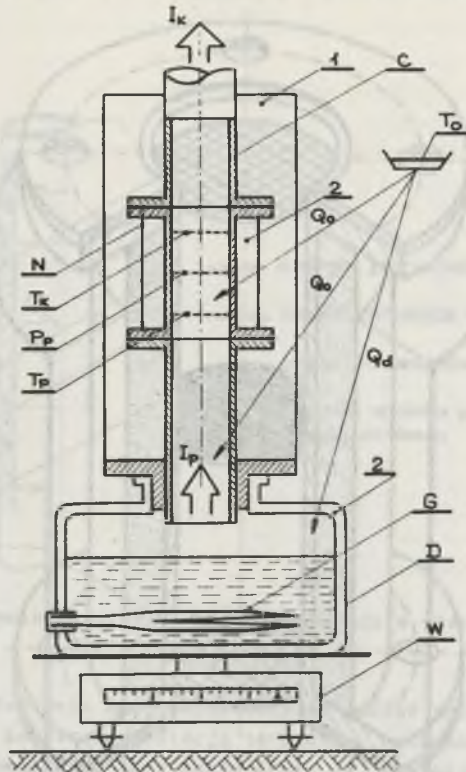


Rys. 4. Przepływomierz Thomsona do pomiaru masy pary azotu

1 - termorezystory platynowe, 2 - grzejnik pomiarowy, 3 - cylindryczny przewód gazowy, 4 - izolacja perlitowo-próżniowa, 5 - uszczelki korkowo-piceinowe, 6 - materiał izolacyjny, 7 - osłona izolacji termicznej

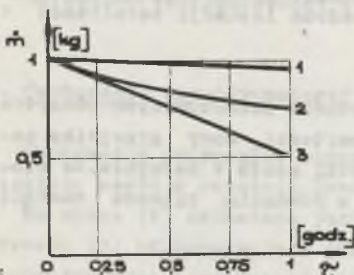
Cechowania przyrządów dokonuje się na podstawie jednoczesnych odczytów temperatur gazu (T_p, T_k) w przepływomierzu i wartości mocy grzejnika pomiarowego oraz wskazań wagi określających ubytki azotu w naczyniu. Ze wzajemnej zależności zmierzonych wielkości oraz z równania bilansu energii wynika, że:

$$\dot{m} = \frac{\dot{P}_e + \dot{Q}_o}{C_p(T_k - T_p)} \quad (6)$$



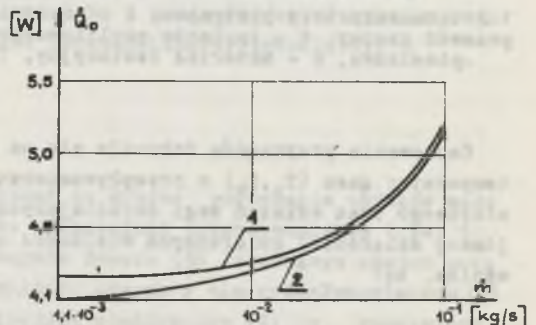
Rys. 5. Stanowisko cechowania przepływomierzy Thomsona

1 - izolacja termiczna, 2 - izolacja termiczna próżniowa, Q_o, Q_d - ciepło wnikające z otoczenia; I_p, I_k - entalpie gazu



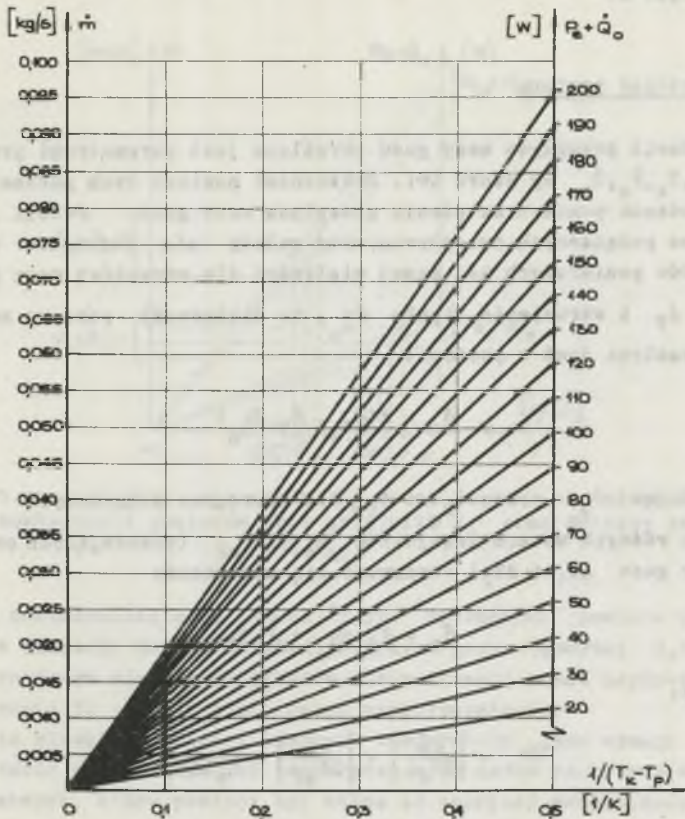
Rys. 6. Wskazania wagi w funkcji czasu dla różnych mocy grzejnika elektrycznego w naczyniu Dewara

1 - $P_G = 0$, 2 - $P_G > 0$, 3 - $P_G \gg 0$



Rys. 7. Energia cieplna wnikająca z otoczenia do odcinka pomiarowego przepływomierza Thomsona w zależności od natężenia przepływu masy pary azotu \dot{m} dla różnych mocy grzejnika pomiarowego

1 - $P_e = 5$ W, 2 - $P_e = 600$ W



Rys. 8. Natężenie przepływu strumienia masy pary azotu w zależności od temperatur T_k i T_p siatek platynowych przepływomierza Thomsona dla różnych wartości mocy jego grzejnika pomiarowego P_e i strumienia ciepła \dot{Q}_0 wnikającego z otoczenia^e

Wzór ten stanowi podstawę do cechowania przepływomierzy i określa ciepło wnikające z otoczenia do ich odcinków pomiarowych w warunkach stanowiska cechowania. Strumień ciepła wnikającego z otoczenia do przepływomierza w zależności od natężenia przepływu gazu dla różnych mocy grzejnika pomiarowego (P_e) pokazano na rys. 7.

W wyniku badań stwierdzono, że zależność pokazana na rys. 7 jest praktycznie taka sama dla wszystkich cechowanych przepływomierzy pod warunkiem jednakowej i dobrze wykonanej izolacji termicznej przyrządów i przewodów gazowych. Pomiar strumienia masy gazu i cechowanie przyrządów jest ułatwiony przy ustalonych wartościach mocy grzejnika pomiarowego. Przy różnych natężeniach przepływu gazu, regulowanych mocą grzejnika w naczyniu

Dewara, zależność strumienia (\dot{m}) od temperatur (T_k, T_p) ma przebieg taki jak na rys. 8.

4. Dokładność pomiaru

Natężenie przepływu masy gazu określone jest parametrami przepływomierza $T_p, T_k, \dot{P}_e, \dot{Q}_o$ wg wzoru (6). Dokładność pomiaru tych parametrów określa dokładność pomiaru natężenia przepływu masy gazu. Jeżeli dla dwóch szeregowo połączonych przepływomierzy założy się jednakowe dokładności przyrządów pomiarowych tej samej wielkości dla odczytów: mocy \dot{P}_e , temperatury δ_T i strumienia ciepła $\delta \dot{Q}_o$, to dokładność pomiaru masy pary azotu określona jest w postaci:

$$\delta_{\dot{m}} = f(\delta_{P_e}, \delta_T, \delta \dot{Q}_o) \quad (7)$$

Wyrażając $\delta \dot{Q}_o$ przez δ_{P_e} i δ_T dla szeregowo połączonych przepływomierzy o różnych mocach grzejników P_{e1} i P_{e2} (powodujących przyrosty temperatury gazu ΔT_1 i ΔT_2) otrzymuje się zależność:

$$\delta_{\dot{m}} = \delta_{P_e} \delta_{P_e} + \delta_T \delta_T, \quad (8)$$

w której:

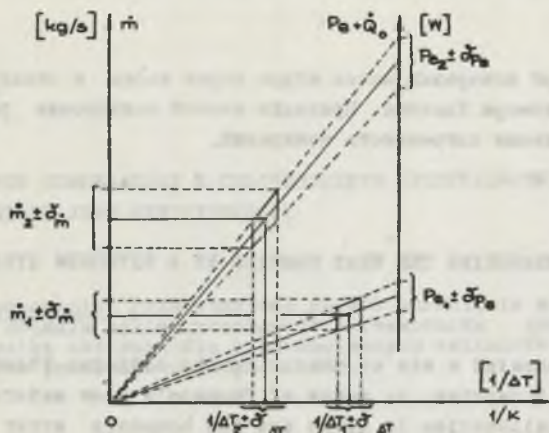
$$\delta_{P_e} = \left| \frac{\partial \dot{m}}{\partial P_{e1}} \right| + \left| \frac{\partial \dot{m}}{\partial P_{e2}} \right| = \frac{2}{C_p (\Delta T_1 - \Delta T_2)}$$

$$\delta_T = \left| \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta T_1} \right| + \left| \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta T_2} \right| = \frac{2}{\Delta T_1 - \Delta T_2}$$

Na podstawie kilkuset pomiarów strumienia masy par azotu, wykonanych za pomocą przepływomierzy na stanowisku cechowania z uchybem granicznym wagi $\pm 0,02\%$, ustalono dokładność pomiaru gazu. W zakresie natężeń przepływu $1,1 \cdot 10^{-2} \dots 9,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ otrzymano powtarzalne wyniki z dokładnością $\pm 1,1 \dots \pm 2,6\%$. Zależność między uchybami pomiaru masy pary azotu, temperatury i mocy grzejnika pomiarowego zilustrowano na przykładzie jednego przepływomierza (rys. 9).

5. Wnioski

1. Zaproponowana metoda pomiaru masy pary azotu i unoszonego z nią ciepła, praktycznie sprawdzona na wielkopropadowym kriotorze, pozwala w zakresie małych natężeń przepływu gazu $(1 \dots 3) \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$ mierzyć energię



Rys. 9. Uchylb pomiaru masy pary azotu $\delta_{\dot{m}}$ w zależności od natężenia jej przepływu i dokładności pomiarów mocy grzejnika δ_{P_e} oraz różnicy temperatur $\delta_{\Delta T}$

cieplną z dokładnością od $+1,1\%$ do $\pm 1,3\%$. Dokładność pomiaru energii cieplnej w zakresie dużych natężeń przepływu gazu (powyżej $0,2 \text{ kg/s}$) zależy w znacznym stopniu od efektów minimalizacji wahań napływu ciepła z otoczenia do odcinka pomiarowego przepływomierza.

- Zapewnienie klasy dokładności pomiarów temperatury gazu wymaga zachowania kształtu charakterystyki temperaturowych zmian rezystywności siatek platynowych, które powinny być wolne od naprężeń mechanicznych.

LITERATURA

- [1] Karwen und Zahlen für die Temperaturtechnik Gesellschaft für Linde Eismaschinen AG. München 1955.
- [2] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników kriooporowych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1979.

Recenzent: prof. sw. dr hab. inż. Czesław Królikowski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛА ОТВОДИМОГО СТРУЕЙ ПАРОВ АЗОТА**Резюме**

Показан способ измерения массы струи паров азота и отводимого ею тепла с помощью расходомера Томсона. Приведён способ калибровки расходомеров, определена предельная погрешность измерений.

THE METHOD OF MEASURING THE HEAT CARRIED BY A NITROGEN STEAM JET**Summary**

There is presented a way of measuring the nitrogen steam jet together with the heat it carries, by means of Thomson's flow meters. The method of flow-meter calibration is given and the boundary error of measurement was determined.