# ZAKŁAD WYDZIAŁOWY MIERNICTWA I SYSTEMÓW POMIAROWYCH POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

## LABORATORIUM

# POMIARÓW WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Pomiary natężenia przepływu gazów metodami: zwężkową i kalorymetryczną

Opracował: Mgr inż. Bogumił Głód

Wrocław 2002

Temat ćwiczenia:Pomiary natężenia przepływu gazów metodą zwężkową<br/>i kalorymetryczną.Cel ćwiczenia:Poznanie zasad pomiarów natężenia przepływu metodami<br/>kalorymetryczną i zwężkową. Poznanie istoty przedmiotu<br/>normalizacji metod zwężkowych. Porównanie wyników<br/>uzyskanych dwoma fizycznie różnymi metodami.

### Program ćwiczenia

- 1. Przeprowadzić jednoczesny pomiar natężenia przepływu metodą zwężkową i kalorymetryczną.
- 2. Przy założonej stałej mocy grzejnej sprawdzić (w metodzie kalorymetrycznej) czy zależność  $\Delta t(q_m)$  jest hiperboliczna. Wartość  $q_m$  wyznaczyć metodą zwężkową.
- 3. Porównać wyniki pomiarów metodą zwężkową i kalorymetryczną. Wyjaśnić przyczyny rozbieżności uzyskanych wyników.
- 4. Korzystając z programu komputerowego **kryza1.exe**, sprawdzić jaki wpływ na wyniki pomiarów metodą zwężkową, mają błędy pomiarów wielkości wpływowych np. błąd pomiaru: różnicy ciśnień, temperatury gazu, wilgotności itp.

### **Wprowadzenie**

Masowym  $q_m$  oraz objętościowym  $q_v$  natężeniem<sup>1</sup> przepływu płynu nazywamy odpowiednio ilość masy lub objętość płynu (cieczy lub gazu) przepływającego w jednostce czasu przez dany przekrój rurociągu. Stosowanymi jednostkami dla  $q_m$  i  $q_v$  są odpowiednio kg/s i m<sup>3</sup>/s.

Większość stosowanych metod pomiaru natężenia przepływu polega na pomiarze objętościowego natężenia przepływu. Wartość masowego natężenia przepływu wymaga znajomości (lub pomiaru) gęstości płynu. Są to więc pośrednie metody pomiaru masowego natężenia przepływu. Tak jest również w wypadku przedstawionej w ćwiczeniu metody zwężkowej. Natomiast metoda kalorymetryczna pozwala z zasady na bezpośredni pomiar masowego natężenia przepływu.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Norma PN-93/M-53950/01 wprowadza inne określenie dla tych wielkości, a mianowicie odpowiednio strumień masy i strumień objętości.

#### I. Metoda zwężkowa

Jeśli do przewodu, przez który przepływa ciecz lub gaz (płyn), wstawimy przewężenie rys.1a, tzw. zwężkę i będziemy mierzyli manometrem różnicowym ciśnienie przed przewężeniem i blisko za przewężeniem, to manometr wykaże różnicę ciśnień. (Zwróć uwagę na analogię występowania różnicy potencjałów na końcach rezystora przy przepływie prądu elektrycznego, rys. 1b)





Rys. 1a. Występowanie różnicy ciśnień na zwężce przy przepływie płynu

Rys. 1b. Występowanie różnicy potencjałów na rezystorze przy przepływie prądu elektrycznego

Ciśnienie przed zwężką będzie większe niż ciśnienie za zwężką. Różnica ta  $(\Delta p)$  będzie tym większa, im większe będzie natężenie przepływu płynu przez rurociąg. Opisuje to prawo Bernouliego, które mówi, że suma energii potencjalnej i kinetycznej płynu w każdym przekroju przewodu ma wartość stałą (1).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = const. \tag{1}$$

gdzie: p - ciśnienie płynu,  $\rho - gęstość płynu,$ v - prędkość płynu.

Zastosowanie powyższego równania dla przekroju przed zwężką i dla przekroju za zwężką, w miejscu największego zwężenia strumienia, umożliwia otrzymanie zależności pomiędzy prędkością przepływu i różnicą ciśnień (2).

$$v = const \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}$$
<sup>(2)</sup>

Tę zależność różnicy ciśnień (przed i za urządzeniem zwężającym strumień płynu) od natężenia przepływu wykorzystuje się do pomiaru natężenia przepływu cieczy i gazów w rurociągach. Przyrządy pomiarowe oparte na tej zasadzie są bardzo szeroko stosowane w praktyce przemysłowej i często są jedynymi przyrządami pozwalającymi na dokonanie pomiaru. Poza tym poważną ich zaletą jest prosta budowa. Stosowane są trzy zasadnicze typy zwężek: *kryzy, dysze, i dysze Venturiego*.

Na rys. 2. przedstawiono kryzę. W przewód między dwoma kołnierzami wstawiona jest cienka tarcza 1 z okrągłym otworem 2 pośrodku. Środek otworu ustawiony jest w osi rury. Z obu stron tarczy-kryzy wprowadzone są rurki, tzw. *rurki impulsowe* 3, do których podłącza się manometr różnicowy. Strumień cieczy już w pewnej odległości od kryzy ulega stopniowemu zwężeniu. Jednakże największe zwężenie uzyskuje się nie w otworze kryzy, ale w pewnej odległości za nim, tak że przekrój strumienia w jego najwęższym miejscu jest mniejszy od przekroju otworu kryzy. Następnie strumień stopniowo rozszerza się, wypełniając w końcu cały przekrój przewodu. Przy ściance przewodu, jak to zaznaczono na rysunku, powstają wiry, przy czym po stronie dopływu płynu zajmują one przestrzeń dużo mniejszą niż po stronie odpływu.



Rys. 2. Kryza i rozkład ciśnień wzdłuż przewodu

Rozkład ciśnień w pobliżu kryzy pokazany jest u góry rysunku. Linia ciągła obrazuje zmiany ciśnienia statycznego wzdłuż ścianki przewodu, a linia przerywana - wzdłuż osi. Jak wynika z tego wykresu, ciśnienie przy ściance przewodu tuż przed kryzą (wskutek jej dławiącego działania wzrasta od wartości p<sup>-1</sup> do p<sub>1</sub>. Za kryzą następuje spadek ciśnienia do p<sub>2</sub>. Najmniejszą wartość p<sup>-2</sup> ciśnienie uzyskuje w miejscu, gdzie strumień jest najwęższy. Później ciśnienie stopniowo wzrasta, ale nigdy nie osiąga swej pierwotnej wartości p<sub>1</sub> (ciśnienia przed kryzą). Różni się ono od tego ciśnienia zawsze o pewną wartość  $\Delta \varpi$ . Ta wartość  $\Delta \varpi$  jest stratą ciśnienia płynu, spowodowaną działaniem kryzy.



Rys. 3. Schemat dyszy

Rys.4. Schemat dyszy Venturiego

Na rys. 3 przedstawiono *dyszę* 1 wstawioną w przewód, przez który przepływa płyn. Dysza, jak widać na rysunku, różni się od kryzy tym, że po stronie dopływu nie ma ostrej krawędzi, lecz specjalnie profilowaną krzywiznę. Dzięki temu zwężenie strumienia płynu odbywa się łagodniej, co powoduje zmniejszenie się obszaru wirów po stronie dopływowej zwężki, a tym samym zmniejsza stratę energii przepływającego płynu. Krzywizna przechodzi w część cylindryczną 2, która jest odpowiednikiem otworu w kryzie. Dzięki specjalnym kształtom dyszy (którą jest trudniej wykonać niż kryzę) strata ciśnienia  $\Delta \varpi$  jest mniejsza.

Na rys. 4 pokazano schematycznie trzeci typ zwężki – *dyszę Venturiego*. Składa się ona z dwóch części: jednej zwężającej 1, profilowanej podobnie jak u dyszy i przechodzącej w krótki odcinek cylindryczny, i drugiej 2 stopniowo rozszerzającej się, aż do wymiaru przewodu, zwanej *dyfuzorem*. Dzięki odpowiedniemu kształtowi części dopływowej przestrzeń przy ściankach, zajmowana przez wiry, jest niewielka; rozszerzająca się stopniowo część za przewężeniem pozwala na całkowite usunięcie wirów na tym odcinku. Dysza Venturiego przy przepływie przez nią płynu powoduje najmniejszą stratę ciśnienia  $\Delta \varpi$ . Jest to wynikiem z jednej strony odpowiedniego profilowania części dopływowej, a z drugiej - stopniowego rozszerzania się strumienia płynu za przewężeniem, uwarunkowanego kształtem drugiej części rury.

Zasada działania zwężek wszystkich typów jest taka sama, a więc i zasadnicza zależność natężenia przepływu od różnicy ciśnień przed nimi i za nimi jest również taka sama. Występujące różnice w zmianach strumienia, jak również w rozkładzie ciśnień w pobliżu zwężki ujęte są w postaci współczynników wyznaczonych doświadczalnie. Aby móc korzystać z wyznaczonych doświadczalnie współczynników musi być zachowane podobieństwo między zwężką, na której zostały przeprowadzone prace badawcze w celu wyznaczenia tych wartości, a tymi zwężkami, które mają być użyte do pomiarów. W tym celu zwężki znormalizowano. Zwężki znormalizowane można stosować bez uprzedniego wzorcowania, tzn. bez doświadczalnego wyznaczania zależności spadku ciśnienia przed i za zwężką od natężenia przepływu.

Powyższe zagadnienia ujęte są w normie PN-93/M-53950/01 -Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych.

### Podstawowe zależności

Podstawowy wzór (3), z którego oblicza się strumień masy jest następujący:

$$q_m = C \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$
(3)

gdzie: *C* – współczynnik przepływu [bezwymiarowy],

 $\varepsilon_1$  – liczba ekspansji [bezwymiarowa],

d – średnica otworu zwężki [m],

 $\Delta p$  – różnica ciśnień [Pa],

 $\rho_1$  – gęstość płynu przed zwężką [kg/m<sup>3</sup>],

 $\beta$  – przewężenie zwężki pomiarowej [bezwymiarowe].

**Przewężenie**  $\beta$  zwężki pomiarowej jest <u>charakterystycznym parametrem</u> <u>zwężki</u> i stanowi stosunek średnicy otworu zwężki do średnicy rurociągu (4).

$$\beta = \frac{d}{D} \tag{4}$$

gdzie: *d* – średnica otworu zwężki [mm], *D* – średnica rurociągu [mm].

**Współczynnik przepływu** C – określony dla przepływu płynu nieściśliwego, charakteryzuje zależność między rzeczywistym a teoretycznym strumieniem masy lub objętości, i dla tych samych zwężek jego wartość nie zależy od instalacji a tylko od liczby Reynoldsa. Określa go równanie Stolza (5):

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,1840 \cdot \beta^3 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left[\frac{10^6}{\text{Re}_D}\right]^{0,75}$$
(5)

gdzie: Re<sub>D</sub> – liczba Reynoldsa [bezwymiarowa].

Liczba Reynoldsa  $Re_D$  – parametr bezwymiarowy wyrażający iloraz sił bezwładności i sił lepkości. Odniesiony do średnicy rurociągu w obszarze przed

zwężką wyraża się wzorem (6). Parametr ten jest bardzo ważny w technice pomiarów przepływów, gdyż wykorzystywany jest m.in. do określania momentu przejścia z przepływu laminarnego na przepływ burzliwy (turbulentny) (Rys. 5).



Rys. 5. Modele przepływów: a) laminarnego, b) turbulentnego

Warunek, aby przepływ miał charakter turbulentny jest istotny, ponieważ tylko wtedy stosunek maksymalnej prędkości (w osi zwężki) do prędkości średniej w całym przekroju jest stały – <u>nie zależy od prędkości płynu.</u>

$$\operatorname{Re}_{D} = \frac{4 \cdot q_{m}}{\pi \cdot \mu_{1} \cdot D} \tag{6}$$

gdzie:  $\mu_1$  – lepkość dynamiczna płynu [Pa·s].

Porównując wzory (3), (5) i (6) widzimy, że natężenie przepływu zależy od liczby Reynoldsa, a liczba Reynoldsa zależy od natężenia przepływu. Jest to zagadnienie uwikłane, które najlepiej rozwiązać metodą iteracyjną (zaleca tę metodę także, wspomniana wcześniej norma). Ilustracja tej metody pokazana jest na rys. 6. W pierwszym kroku obliczamy q<sub>m</sub>, korzystając z zależności (3) i (5) – krzywa 1, podstawiając dużą wartość Re<sub>D</sub> np. 10<sup>6</sup>. W drugim kroku obliczamy Re<sub>D,</sub> korzystając ze wzoru (6) – krzywa 2, podstawiając wcześniej obliczoną wartość q<sub>m</sub>. Obliczenia takie powtarzamy, aż do uzyskania wystarczającej dokładności.



Rys. 6. Ilustracja obliczenia natężenia przepływu w sposób iteracyjny

*W niniejszym ćwiczeniu korzysta się z programu komputerowego kryza1.exe*. Uwzględniono w nim i inne wielkości, od których zależy istota pomiaru natężenia przepływu gazów metodą zwężkową – wymienione wcześniej we wzorach (3), (5), (6), jak: lepkość dynamiczna, liczba ekspansji, gęstość gazu.

# Lepkość dynamiczna $\mu$ – dla gazów, w różnych temperaturach roboczych, opisana jest zależnością (7).

$$\mu = \mu_n \cdot \frac{1 + \frac{C_s}{273,15}}{1 + \frac{C_s}{T}} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15}}$$
(7)

gdzie:  $\mu_n$  – lepkość dynamiczna w warunkach normalnych tj. w tempera turze 0°C i ciśnieniu 101,325 kPa.

Dla powietrza  $\mu_n = 17,08 \ 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 

- T temperatura termodynamiczna gazu w warunkach roboczych
- $C_s$  stała Sutherlanda,  $C_s$  = 113.

**Liczba ekspansji**  $\varepsilon$  – Uwzględnia ściśliwość płynu. Dla płynów nieściśliwych (cieczy)  $\varepsilon$  = 1, dla płynów ściśliwych (gazów)  $\varepsilon$  < 1. Jeśli znany jest wykładnik izentropy  $\kappa$ , liczbę ekspansji oblicza się wg wzoru doświadczalnego (8).

$$\varepsilon_1 = 1 - \left(0, 41 + 0, 35 \cdot \beta^4\right) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \tag{8}$$

gdzie:  $\Delta p$  – różnica ciśnień [Pa],

- p<sub>1</sub> ciśnienie po stronie dopływowej [Pa],
- $\kappa$  wykładnik izentropy [bezwymiarowy], dla powietrza  $\kappa$  =1,4.
- $\beta$  przewężenie [bezwymiarowe].

# Gęstość gazu wilgotnego

(patrz norma PN-93... str. 30)

### II. Metoda kalorymetryczna.

Zasadę działania przepływomierzy kalorymetrycznych przedstawia rys. 8. Badany płyn przepływa przez izolowany cieplnie odcinek rurociągu, wewnątrz którego osadzony jest specjalny grzejnik elektryczny **G**. Temperatura płynu podnosi się od wartości t<sub>1</sub> do wartości t<sub>2</sub>. Przyrost temperatury  $\Delta t = t_2 - t_1$  mierzony jest za pomocą oporników termometrycznych R<sub>t1</sub> i R<sub>t2</sub> w układzie mostkowym. Zakłada się, że oporniki te mierzą wartość średnią temperatury płynu w badanym przekroju. Dobre wyrównanie temperatury w badanym przekroju rurociągu występuje przy przepływie burzliwym oraz przy braku wymiany ciepła z otoczeniem.



Rys. 7. Przykładowe zależności między natężeniem przepływu

 $\mathbf{q}_m$ , przyrostem temperatury  $\Delta t$  płynu i mocą grzejną P

Charakter zależności przyrostu temperatury  $\Delta t$  od natężenia przepływu przedstawiony jest przykładowo na rys. 7, przy założeniu stałej mocy grzejnej P. Jak widać, dla małych prędkości przepływu zależność  $\Delta t$  i q<sub>m</sub> jest w przybliżeniu liniowa, natomiast dla dużych prędkości przechodzi praktycznie w hiperbolę. Jest to spowodowane faktem ustania wymiany ciepła przez przewodzenie, konwekcję, promieniowanie i zużywanie energii grzejnej wyłącznie na zwiększenie energii wewnętrznej płynu. Przyrost tej energii w jednostce czasu wynosi:

$$q_m \cdot c_p \cdot \Delta t = P \tag{9}$$

gdzie:  $c_p$  – ciepło właściwe płynu przy stałym ciśnieniu.

W oparciu o powyższą zależność realizowane są przepływomierze dla dużych prędkości przepływu, zwane walcami Thomasa. Przepływomierze te pracują przy założonej stałej różnicy temperatur  $\Delta t = \text{const.}$ , utrzymywanej na niezmiennym poziomie przez regulację mocy grzejnej. Wartość mocy w tym przypadku jest miarą natężenia przepływu  $q_m$ .

$$q_m = \frac{P}{c_p \cdot \Delta t} \tag{10}$$

Przedstawiony na rys. 8 mostek osiąga stan równowagi, gdy:

$$R_{t1} + \Delta R = R_{t2} \tag{11}$$

gdzie:  $\Delta R$  – dodatkowa rezystancja równoważąca przyrost rezystancji czujnika  $R_{t2}$  wywołany przyrostem temperatury  $\Delta t$ .

Jeżeli czujniki termometryczne są jednakowe to zachodzi zależność:

$$R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot t_1) + \Delta R = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot t_2)$$
(12)

stąd:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \alpha_0} \tag{13}$$

gdzie:  $R_0$  – rezystancja czujników w temperaturze 0 °C,

 $\alpha_0$  – współczynnik temperaturowy czujników w temperaturze 0 °C. Podstawiając zależność (13) do (9) otrzymuje się następujące równanie:

$$q_m = \frac{R_0 \cdot \alpha_0}{c_p \cdot \Delta R} \cdot P \tag{14}$$

Stała przepływomierza kalorymetrycznego:

$$B = \frac{R_0 \cdot \alpha_0}{c_p \cdot \Delta R} \tag{15}$$

Podstawiając (15) do (14) otrzymujemy:

$$q_m = B \cdot P \tag{16}$$

Powyższe zależności są podstawą działania przepływomierzy kalorymetrycznych. Stosuje się je dla dużych natężeń przepływów (przepływów burzliwych), gdzie obowiązuje hiperboliczna zależność przyrostu temperatury od natężenia przepływu, przy stałej mocy grzejnej (patrz rys.7).

### Parametry instalacji w stanowisku laboratoryjnym

- zwężka pomiarowa: kryza, średnica otworu d=65,3 [mm]
- czujniki temperatury Pt100 kl.1 (rezystory platynowe):

R<sub>0</sub>=100 [Ω],

 $\alpha_0 = 0,00385 [K^{-1}]$ 

- $c_p = 1000 [Wskg^{-1}K^{-1}]$  (powietrze suche)
- przewidywane maksymalne natężenie przepływu:  $q_{m max}=0,15$  [kg s<sup>-1</sup>]
- maksymalny prąd grzejnika: 5 [A].

### Przyrządy pomiarowe

- 1. Watomierz, typ LW1, kl. 0,5
- 2. Woltomierz, typ TLEM2, kl. O5
- 3. Amperomierz, typ TLEM2, kl. 0,5
- 4. Rezystory dekadowe, DR4a-16, DR4b-16, kl.0,05
- 5. Autotransformator



Rys. 8. Stanowisko do pomiaru natężenia przepływu powietrza

# Przebieg ćwiczenia

- 1. Przeczytać instrukcję do ćwiczenia. Zapoznać się z instalacją na stanowisku laboratoryjnym. Sprawdzić poprawność połączeń, a w razie potrzeby połączyć układ pomiarowy jak na rys. 8.
- Ustawić moc grzejną (autotransformatorem) na wartość P=0. Ustawić pokrętło regulacji natężenia przepływu na minimum (natężenie równe zero).. Ustawić wartości rezystorów w mostku R=1000 Ω, ΔR=0 Ω.
- 3. Włączyć dmuchawę i zrównoważyć mostek potencjometrem P.
- 4. Obliczyć  $\Delta R$  dla założonego przyrostu temperatury  $\Delta t z$  zależności (13).
- 5. Nastawić obliczoną wartość  $\Delta R$  w układzie mostka.
- 6. Nastawiając różne wartości natężenia przepływu równoważyć mostek mocą grzejną przez regulację autotransformatorem. Odczytywać wskazania watomierza oraz U-rurki ( $l_1$  i  $\Delta l$ ).
- Korzystając z programu kryza1.exe, wykonać obliczenia dla kryzy. Dla kalorymetru wykonać obliczenia samodzielnie. Zestawić wyniki w tabeli. Porównać otrzymane wyniki.
- 8. Korzystając z programu kryza1.exe, sprawdzić jaki wpływ na wyniki pomiarów mogą mieć niepewności odczytu  $l_1$ ,  $\Delta l$ , temperatury, wilgotności.
- 9. Zbadać zależność  $\Delta t(q_m)$ . Dla stałęj mocy grzejnej (podanej przez prowadzącego) zmieniać natężenia przepływu  $q_m$  i równoważyć mostek przez regulację  $\Delta R$  ( $\Delta t$  obliczyć ze wzoru (13)).

# Literatura

- 1. E. Romer, Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa, 1978
- 2. P.H. Sydenham, Podstawy metrologii podstawy praktyczne, WKiŁ, Warszawa, 1990
- 3. PN-93/M-53950/01, Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych