

Politechnika Lubelska

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów

i Napędów Lotniczych



Instrukcja laboratoryjna

***Pomiar natężenia przepływu
płynów ściśliwych metodą
zwężki pomiarowej***

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady pomiarów natężenia przepływu metodą zwężkową oraz pomiar natężenia przepływu (strumienia masy)

II. Wprowadzenie

W celu określenia ilości cieczy i gazów przepływających w rurociągach prowadzone są pomiary przepływu. Wykonuje się pomiary średniej prędkości przepływu c_{sr} [m/s], natężenia przepływu objętościowego q_v [m³/s], lub natężenia przepływu masowego q_m [kg/s]. Wielkości te są ze sobą powiązane i mogą być obliczane wg zależności: $q_v = c_{sr} \times A$, $q_m = c_{sr} \times A \times \rho$, jeżeli znane są A - powierzchnia przekroju [m²], w - średnia prędkość przepływu [m/s], ρ - gęstość czynnika [kg/m³].

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.

III. Zasada działania zwężki

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. 1. a) Występowanie różnicy ciśnień na zwężce przy przepływie płynu; b) występowanie różnicy potencjałów na rezystorze przy przepływie prądu elektrycznego

Ciśnienie przed zwężką będzie większe niż ciśnienie za zwężką. Różnica ta (Δp) będzie tym większa, im większe będzie natężenie przepływu płynu przez

rurociąg. Opisuje to prawo Bernoulliego, które mówi, że suma energii potencjalnej i kinetycznej płynu w każdym przekroju przewodu ma wartość stałą (1):

$$\frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} = const \quad (1)$$

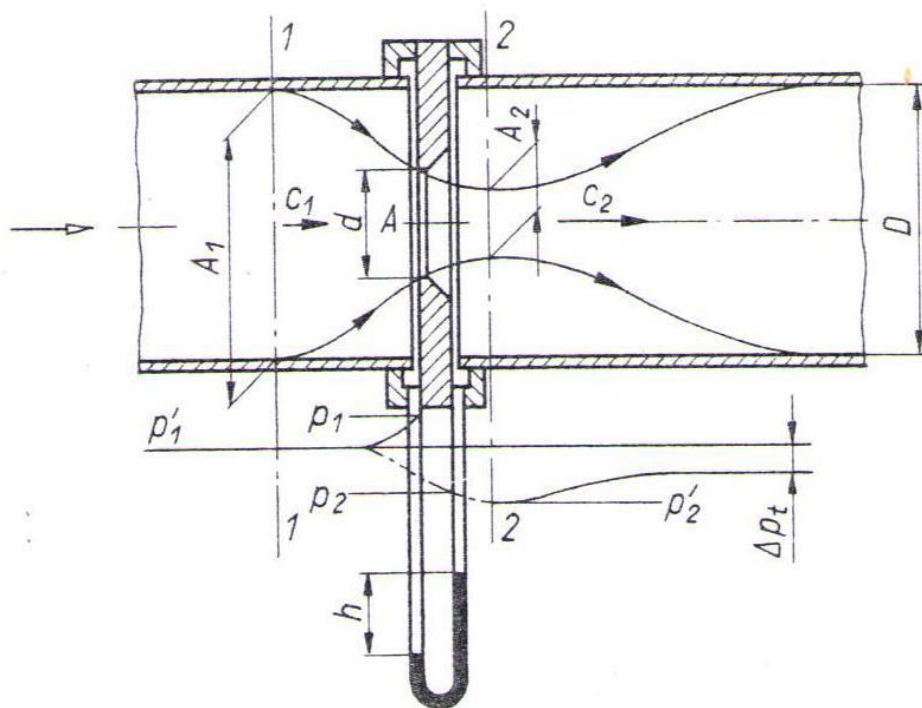
gdzie:

- p - ciśnienie płynu
- ρ - gęstość płynu
- c - prędkość płynu

Zasada pomiaru strumienia przepływającej cieczy, par i gazów przepływomierzami zwężkowymi oparta jest na zmianie potencjalnej ciśnienia statycznego płynu przepływającego przez miejscowe przewężenie przewodu.

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.

Przewężenie wywołuje również wzrost prędkości strumienia płynu od prędkości c_1 w przekroju 1-1 do prędkości C_2 w przekroju 2-2 (rysunek 2).



Rys. 2. Przepływ przez zwężkę (kryzę)

Zwężenie strumienia rozpoczyna się już przed kryzą i trwa, aż do uzyskania przekroju minimalnego, znajdującego się w niewielkiej odległości za kryzą, po czym strumień rozszerza się, stopniowo wypełniając całą powierzchnię przewodu. Ciśnienie płynu przed kryzą nieco wzrasta i zmniejsza się do minimum za kryzą w najwęższym przekroju strumienia. Strata części ciśnienia jest wywołana stratą energii na tarcie i

tworzenie się wirów.

Można założyć, że przy małym spadku ciśnienia na zwężce, gęstość płynu pozostaje stała $\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{const}$. Równanie Bernoulliego między przekrojami 1-1 i 2-2 przyjmuje postać:

$$\frac{1}{2} \rho (c_1^2 - c_2^2) = p_1 - p_2 \quad (2)$$

Równanie ciągłości strugi ma postać:

$$c_1 = c_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (3)$$

Oznaczając przewężenie strumienia przez: $\mu = A_2 / A$, przewężenie przekroju rury (moduł zwężki) przez $m = A / A_1$, gdzie A [m²] jest najmniejszym przekrojem zwężki można zapisać $c_1 = \mu m c_2$. Wzór (3) otrzymuje postać:

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1' - p_2')} \quad (4)$$

$(p_1' - p_2')$ - różnica ciśnień przed i za kryzą.

Na skutek oporów wywołanych lepkością płynu prędkość rzeczywista c_{rz} będzie mniejsza od obliczonej ze wzoru (4). Prędkość rzeczywista w przekroju 2-2 oblicza się wówczas z wyrażenie uwzględniając te odchylenie za pomocą współczynnika β :

$$c_{rz2} = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1' - p_2')} \quad (5)$$

$(p_1 - p_2)$ - różnica ciśnień przed i za kryzą realizowany za pomocą manometrów różnicowych.

Masowe natężenie przepływu (strumień masy) wyniesie:

$$q_m = A_2 c_{rz2} \rho = \mu A_1 c_{rz2} \rho \quad (6)$$

$$q_m = \frac{\mu \beta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} A \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)} \quad (7)$$

Poniższe równanie (7) to *liczba przepływu* α :

$$\alpha = \frac{\mu \beta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \quad (8)$$

Liczba przepływu α uwzględnia wpływ lepkości i tarcia, znajdujący swoje odbicie w nierównomiernym rozkładzie prędkości strumienia, a także to, że pomiar ciśnienia nie jest realizowany na środku, lecz przy ścianie przewodu. Uwzględnia również

przyjęcie przekroju A zamiast nieokreślonego bliżej najmniejszego pola przekroju strumienia A_2 . Liczba przepływu przedstawia się w funkcji modułu zwężki m oraz liczby Reynoldsa R_e . Po przekroczeniu $R_e \geq 2 \times 10^4$, *liczba przepływu* staje się od niej niezależna i błędy pomiaru są najmniejsze

W pomiarach strumienia przepływu płynów ściśliwych (par i gazów) należy jeszcze uwzględnić zmianę gęstości, szczególnie jeśli $\Delta p = (p_1 - p_2)$ ma względnie dużą wartość w stosunku do p_1 . W tym celu wprowadza się *liczbę ekspansji* ε . Dla płynów nieściśliwych $\varepsilon=1$.

Ostateczny wzór na strumień masy przepływającego płynu ma postać:

$$q_m = \alpha \varepsilon A \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (9)$$

Natężenia przepływu objętościowego (strumień objętości) wyraża się wzorem:

$$q_v = \alpha \varepsilon A \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)} \quad (10)$$

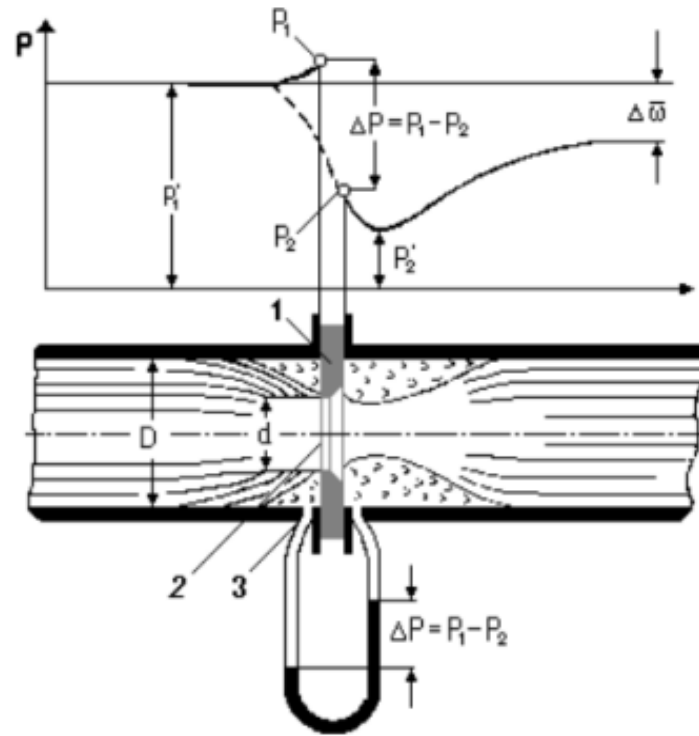
Przeprowadzenie pomiaru w znormalizowanych warunkach wymaga quasi-ustalonego charakteru przepływu. Oznacza to, że manometr różnicowy mierzy chwilową wartość ciśnienia różnicowego a nie średnią. Zwężki pomiarowe są wygodnymi przyrządami pomiarowymi ze względu na dużą dokładność i możliwość zastosowania w szerokich zakresach ciśnienia i temperatury. Montowane są tak aby oś zwężki pokrywała się z osią przewodu i stosowane w zakresie średnic D od 50 do 1200 mm. Przepływ przez zwężkę nie powinien powodować zmiany fazy, płyn powinien być fizycznie i termicznie jednorodny oraz musi on całkowicie wypełniać przekrój rurociągu.

III. Typy zwęzek pomiarowych

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 zwęzek pomiarowych : kryzy, dysze, i zwężki Venturiego.

Na rysunku 3 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.



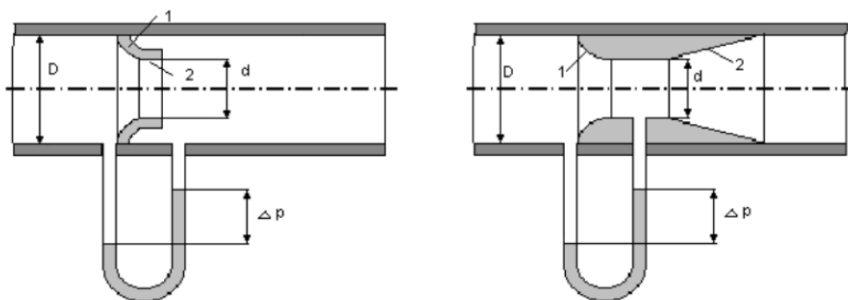
Rys. 3. Kryza i rozkład ciśnień wzdłuż przewodu

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_1 do p_1). Za kryzą następuje spadek ciśnienia do p_2 . Najmniejszą wartość p_2 ciśnienie uzyskuje w miejscu, gdzie strumień jest najwęższy. Później ciśnienie stopniowo wzrasta, ale nigdy nie osiąga swej pierwotnej wartości p_1 (ciśnienia przed kryzą). Różni się ono od tego ciśnienia zawsze o pewną wartość Δp . Ta wartość Δp jest stratą ciśnienia płynu, spowodowaną działaniem kryzy.

Na rysunku 4a 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 Δp jest mniejsza.

Na rysunku 4b pokazano schematycznie trzeci typ zwężki – zwężka 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 Δp . 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.



Rys. 4. a) dysza, b) dysza Venturiego

Należy podkreślić, że zastosowanie określonego typu zwężki jest ściśle związane z warunkami przepływu określoną liczbą Reynoldsa (określa kiedy ruch płynu jest stacjonarny a kiedy turbulentny).

Z wymienionych typów zwężek kryzy mają tę zaletę, że są krótsze, mają zwartą budowę, są łatwe do wykonania, wbudowania i demontażu oraz są tańsze. Wadą ich jest łatwość zanieczyszczania się, szybko zmniejszająca się dokładność pomiaru i stosunkowo duży trwały spadek ciśnienia. Stosuje się je w przypadku, gdy gaz lub para płynie z dużą szybkością, gdy duży trwały spadek ciśnienia nie odgrywa roli oraz gdy w danych warunkach nie można użyć dyszy, np. ze względu na jej długość. Kryzy są stosowane dla rur przy średnicach większych niż 50 mm, dla modułów $0,05 \leq m \leq 0,64$, przy $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^7$.

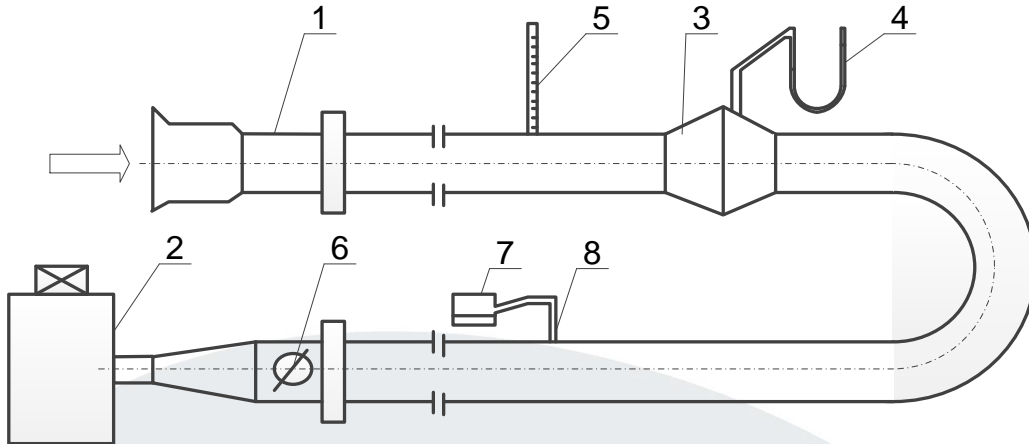
Dysze są dokładniejsze od kryz, dają mniejszy trwały spadek ciśnienia, są mniej wrażliwe na zanieczyszczenia i zaburzenia przy przepływie, są jednak droższe, dłuższe a więc trudniejsze do wykonania, montażu i demontażu. Stosuje się do rur średnicach 50 mm przy modułach $0,1 \leq m \leq 0,6$

IV. Opis ćwiczenia

Po włączeniu ciągu dokonuje się odczytu długości słupa cieczy manometrycznej w manometrze bateryjnym $l_1 - l_2$, i przełożenie n_1 . Należy również odczytać temperaturę

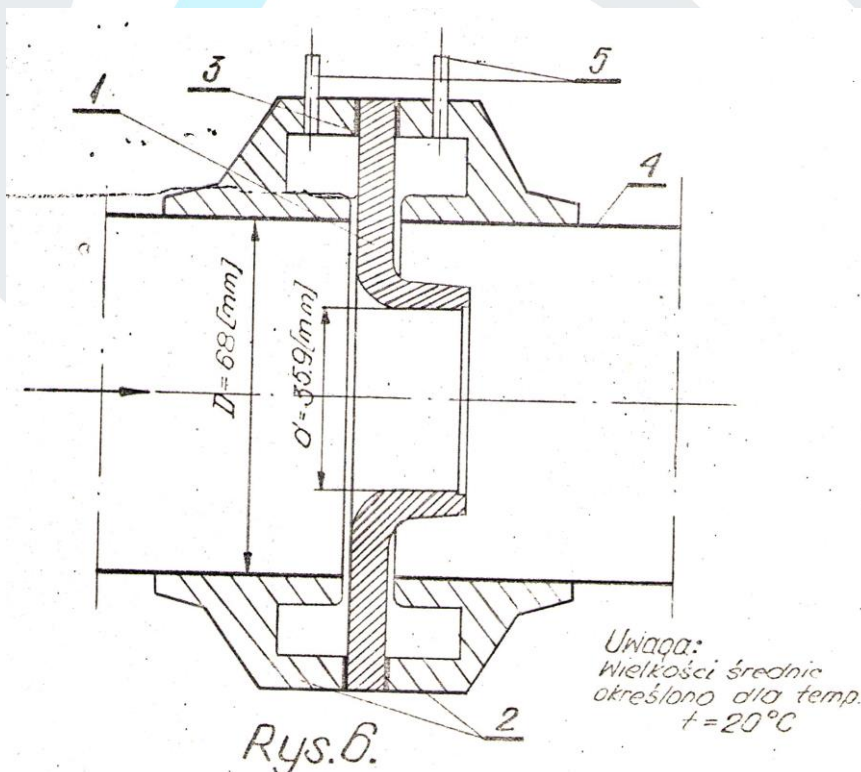
gazu oraz ciśnienie barometryczne z barometru mieszkowego. Schemat stanowiska przedstawia rysunek 5 a zastosowanej dyszy pomiarowej ISA rysunek 6.

ρ_c - gęstość cieczy manometrycznej (żółta) $1000 \text{ kg/m}^3 @ 15^\circ\text{C}$



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego

1. Rurociąg ssawny, 2. Wentylator ssący, 3. Dysza ISA, 4. Manometr różnicowy, 5. Termometr, 6. Przesłona dławiąca,



Rys. 6. Schemat dyszy pomiarowej ISA

1. Dysza, 2. Oprawa dyszy, 3. Uszczelki, 4. Rurociąg, 5. Króćce pomiarowe.

Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać krótki opis przeprowadzonego ćwiczenia, schemat stanowiska oraz ciąg obliczeń wykonanych podczas zajęć laboratoryjnych.

Literatura:

- [1] Pomiary w technice cieplnej - Kotlewski F. Warszawa , WNT 1974 L.
- [2] PN-93/M-53950/01- Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynu za pomocą zwężek pomiarowych
- [3] Pomiary cieplne cz.1. Podstawowe pomiary cieplne - Tadeusz R. Fodemski
WNT Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

Przykładowe zagadnienia:

- 1. Co to jest liczba Reynoldsa i jakie ma znaczenie na poprawność pomiaru
- 2. Równanie Bernouliego
- 3. Zasada pomiaru na zwężce
- 4. Podział i charakterystyka zwężek
- 5. Dysza, kryza, zwężka Bernouliego schemat i rozkład ciśnienia oraz prędkości
- 6. Co to jest liczba przepływu α i co uwzględnia
- 7. Co to jest liczba ekspansji ϵ i co uwzględnia