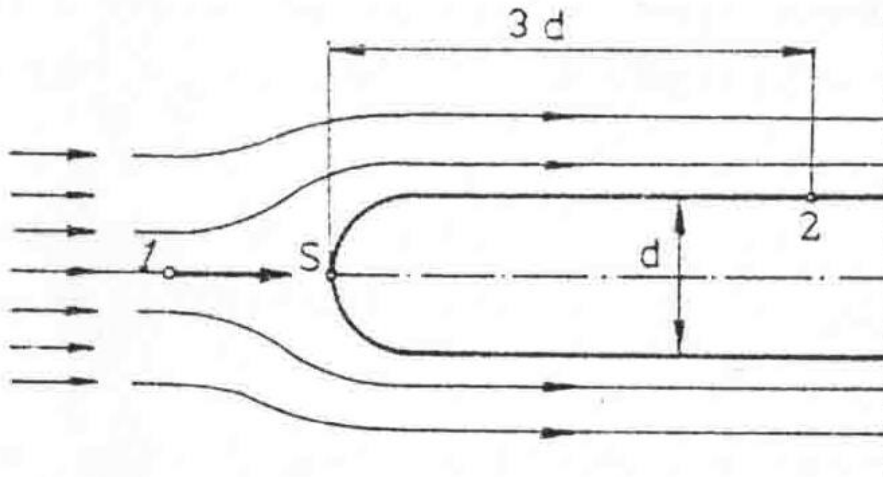


# 16

Pomiar strumienia objętości i masy za pomocą rurek spiętrzających



Do pomiaru prędkości przepływu, zwłaszcza w przewodach o większych przekrojach lub o przekrojach różnych od kształtu kołowego, stosuje się często rurki spiętrzające. Pomiar ten odbywa się w sposób pośredni przez pomiar ciśnienia dynamicznego jako różnicy ciśnienia całkowitego i statycznego.



Rys. 1. Optyw ciała stałego w kształcie walca z czołem kulistym

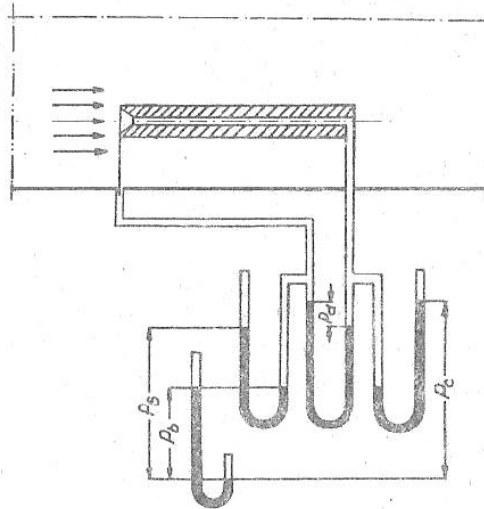
Dla linii prądu przechodzącej przez oś symetrii optywanego ciała (rys. 1) można napisać równanie Bernoullego w postaci:

$$\frac{1}{2} \rho c_1^2 + P_1 + g \rho z_1 = \frac{1}{2} \rho c_S^2 + P_S + g \rho z_S ,$$

gdzie punkt 1 leży na omawianej linii prądu w znacznej odległości od optywanego ciała, natomiast punkt S jest punktem stagnacji. Różnica położenia punktów 1 i S jest na ogół niewielka w związku z czym można przyjąć  $z_1 = z_S$ . W punkcie stagnacji następuje wyhamowanie strugi zatem prędkość  $c_S=0$ . Równanie Bernoullego przyjmuje postać

$$P_S = \frac{1}{2} \rho c_1^2 + P_1 = P_C .$$

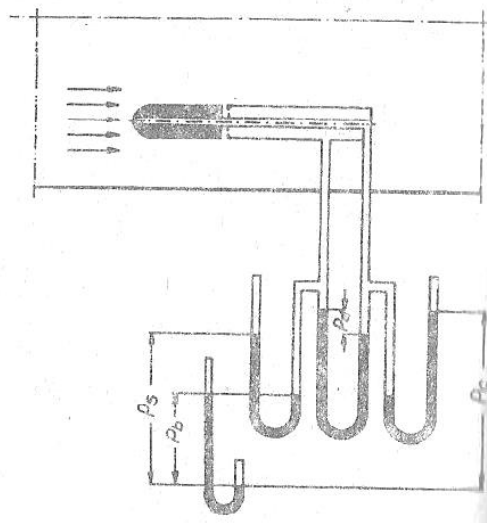
Ciśnienie całkowite w punkcie S jest równe ciśnieniu stagnacji. Gdy w przepływie równoległe do linii prądu wstawimy cienką rurkę, jak pokazano na rysunku 1, to w jej wnętrzu panować będzie ciśnienie stagnacji, czyli ciśnienie całkowite  $P_C$ . Przesyłając impuls tego ciśnienia do manometru, można zmierzyć ciśnienie całkowite w przepływie. Rurkę przystosowaną do pomiaru ciśnienia całkowitego nazywamy rurką Pitota lub sondą ciśnienia całkowitego (rys. 2).



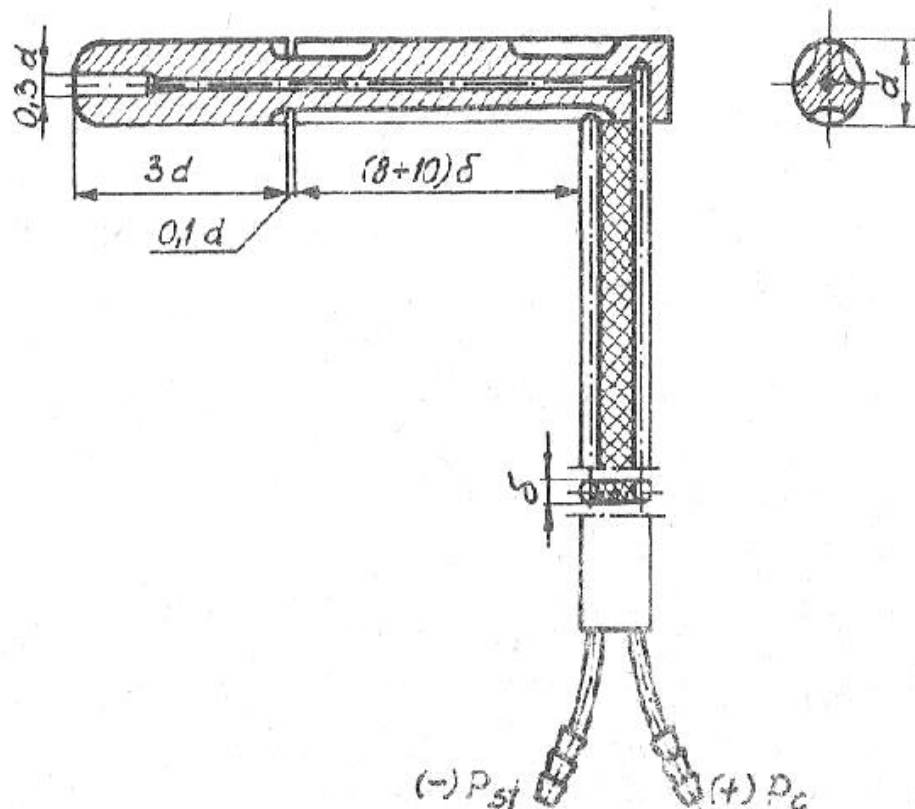
Rys.2. Pomiar ciśnienia rurką Pitotota. Schemat układu pomiarowego.

Wykonując w zaślepionej rurce otworek w punkcie 2 (rys. 1), możemy przekazać do jej wnętrza ciśnienie statyczne. Wielkość względną tego ciśnienia możemy zmierzyć manometrem różnicowym lub U-rurką. Tak wykonana sonda nosi nazwę sondy ciśnienia statycznego.

Można zbudować sondę pełniącą jednocześnie rolę sondy ciśnienia całkowitego i statycznego. Sonda taka przedstawiona na rysunku 3 i 10-5 nosi nazwę sondy ciśnienia dynamicznego lub sondy Prandtla.



Rys.3. Pomiar ciśnienia rurką Prandtla. Schemat układu pomiarowego.



Rys. 4. Rurka spiętrzająca Prandtla.

Gdy część pomiarową ciśnienia statycznego połączyć z jednym ramieniem U-rurki, natomiast ciśnienia całkowitego z drugim (rys. 3) na U-rurce otrzymamy

$$\left(\frac{1}{2} \rho c_1^2 + P_1\right) - P_1 = \frac{1}{2} \rho c_1^2$$

wartość tę nazywamy ciśnieniem dynamicznym przepływającego czynnika

$$P_d = \frac{1}{2} \rho c^2 = P_c - P$$

Pomiar prędkości lokalnej w przepływie sprowadza się, przy znanej gęstości czynnika, do pomiaru ciśnienia dynamicznego. Z równania powyżej wynika, że prędkość przepływu czynnika jest równa

$$c = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}}$$

### Pomiar przez sondowanie w obliczonych punktach pomiarowych

Jednym ze sposobów na obliczenia średniej prędkości przepływu jest wyznaczanie lokalnych prędkości w charakterystycznych punktach przekroju poprzecznego rurociągu.

W tym celu dokonuje się podziału pola przekroju na określoną ilość równych powierzchni, a następnie dla każdej z nich wyznacza się punkt, w którym prawdopodobnie prędkość lokalna będzie prędkością średnią dla danej powierzchni.

Norma PN-63/M-34131 podaje sposób podziału przekroju rurociągu o danym kształcie i powierzchni na określone pola.

Strumień objętości:

$$\dot{V} = A c_{sr} ,$$

gdzie: A – pole całkowite przekroju poprzecznego.

Przy podziale przekroju poprzecznego na  $n$  równych pól

$$\dot{v} = \frac{A}{n} c_1 + \frac{A}{n} c_2 + \dots + \frac{A}{n} c_n ,$$

stąd

$$\dot{v} = \frac{A}{n} (c_1 + c_2 + \dots + c_n) .$$

Porównując równania otrzymamy

$$c_{\dot{s}r} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_1^n c_n ;$$

czyli  $c_{\dot{s}r}$  jest średnicą arytmetyczną prędkości zmierzonych w obliczanych punktach przekroju poprzecznego rurociągu.

Łatwiej jest posługiwać się średnim ciśnieniem dynamicznym.

$$c_{\dot{s}r} = \sqrt{\frac{2P_{d-\dot{s}r}}{\rho}}$$

oraz

$$c_n = \sqrt{\frac{2P_{d-n}}{\rho}}$$

otrzymamy

$$\sqrt{\frac{2P_{d-\dot{s}r}}{\rho}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \sqrt{\frac{2P_{d-n}}{\rho}}$$

stąd

$$P_{d-\dot{s}r} = \left( \frac{1}{n} \sum_1^n \sqrt{P_{d-n}} \right)^2 .)$$

czyli pierwiastek ze średniego ciśnienia dynamicznego jest średnią arytmetyczną pierwiastków ciśnień dynamicznych zmierzonych w obliczonych punktach przekroju poprzecznego rurociągu.

Według normy PN-63/M-34131 rurociąg kołowy o średnicy do 300 mm dzieli się na 3 współśrodkowe pierścienie o równych powierzchniach, rurociąg dla którego  $300 < D < 900$  dzielimy na  $5 \div 10$  pierścieni, powyżej 900 mm liczbę pierścieni należy odpowiednio powiększyć.

Sondowanie należy wykonać wzdłuż 2 średnic dla rurociągów o średnicy do 1200 mm. Dla większych średnic rurociągów obowiązuje sondowanie wzdłuż czterech średnic rozmieszczonych symetrycznie.

Punkty pomiaru są rozmieszczone na wyznaczonych średnicach w miejscach ich przecięcia z okręgami, które dzielą każdy z wyznaczonych pierścieni na dwa dalsze pierścienie równe co do powierzchni. Otrzymuje się w ten sposób  $2n$  pierścieni o równych powierzchniach, a punkty pomiarowe leżą na okręgu pierwszym i dalej kolejno na co drugim licząc od osi rurociągu. Przy podziale np. na trzy pierścienie, powierzchnię koła o promieniu  $R$  należy podzielić na  $2 \cdot n = 6$  części. Jeżeli promienie kolejnych okręgów oznaczymy przez  $r_1, r_2 \dots r_5$ , to z warunku równości powierzchni pierścieni

$$\frac{\pi \cdot R^2}{2 \cdot n} = \pi r_1^2 = \pi (r_3^2 - r_2^2) = \dots = \pi (R^2 - r_5^2)$$

ustalić można odległość punktów pomiarowych od osi rurociągu.

Punkt pomiarowy najbliższy środka koła będzie położony na promieniu  $r_1$

$$r_1 = R \sqrt{\frac{1}{2n}} = R \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 3}} = 0,408 R ,$$

następne punkty pomiarowe odpowiednio na promieniach:

$$r_3 = R \sqrt{\frac{3}{2n}} = R \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 3}} = 0,706 R ,$$

$$r_5 = R \sqrt{\frac{5}{2n}} = R \sqrt{\frac{5}{2 \cdot 3}} = 0,912 R .$$

Ogólnie punkty pomiarowe, w których prędkości lokalne będą równe prędkościom średnim dla danych pól, wyznacza się z równania

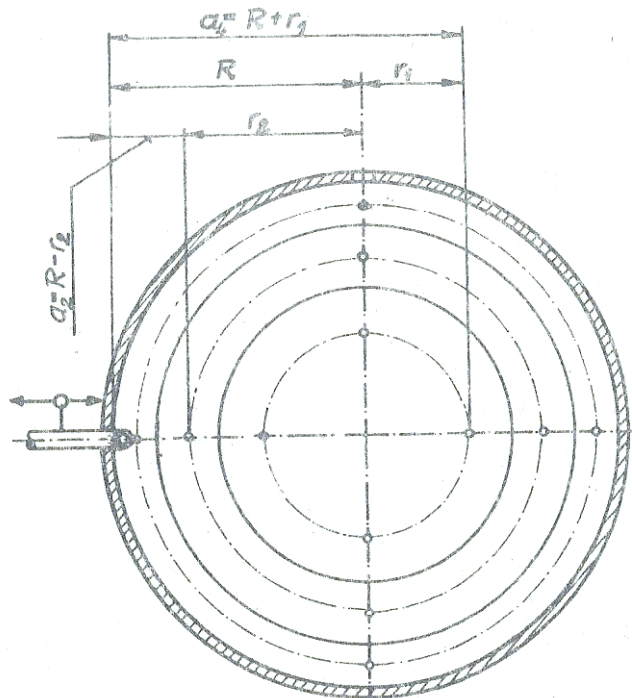
$$r_i = R \sqrt{\frac{2i-1}{2n}}$$

gdzie:  $i$  – kolejny promień pomiarowy licząc od środka okręgu,

$R$  – promień rurociągu,

$n$  – ilość pierścieni, na które podzielony został okrąg.

W każdym okręgu mierząc na dwóch prostopadłych do siebie średnicach znajdują się cztery punkty pomiarowe, po dwa leżące z jednej i z drugiej strony środka (rus. 10-8).



Sposób podziału przekroju poprzecznego rurociągu kołowego na równe pola z zaznaczeniem punktów sondowania dla dwóch średnic

Ponieważ przy sondowaniu interesującym nas wymiarem jest odległość punkty sondowania od ścianki rurociągu, wielkość ta została wyznaczona z równania (rys. 10-8):

$$a_i = R \pm r_i = R \left( 1 \pm \sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \right) . \quad (10-27)$$

Przy sondowaniu na jednej średnicy każdy pierścień sondujemy w dwóch punktach, czyli ilość sondowań wynosi  $2n$ . Poszczególnym punktom nadaje się numerację kolejną, poczynając od punktu zewnętrznego. Korzystając z podziałki umieszczonej na rurce obudowy sondy wyprowadzonej

z otworu na zewnątrz, łatwo jest przesunąć sondę po wykonaniu odczytu do następnego punktu pomiarowego. Ponieważ tak zwane „sondowanie” wzdłuż dwóch średnic trwa stosunkowo długo, należy zwrócić uwagę, aby warunki przepływu w tym zakresie były możliwie stałe. Przy wyborze najdogodniejszego miejsca do pomiaru należy zwrócić uwagę, aby w badanym przekroju nie mogły wystąpić zaburzenia przepływu, wiry itp. Wybrane miejsca powinny znajdować się na dostatecznie długim prostym odcinku rurociągu, z dala od kolan, zasuw i innych źródeł zaburzeń, a w razie potrzeby należy stosować przed miejscem sondowania specjalne wstawki w celu usunięcia zawirowań w strumieniu.

Według PN-63/M-34131 rurociąg o przekroju prostokątnym dzieli się za pomocą linii równoległych do boków przekroju na 16 prostokątów – gdy pole przekroju rurociągu nie przekracza  $0,5 \text{ m}^2$ , na 25 prostokątów – gdy pole przekroju jest większe od  $0,5 \text{ m}^2$  i nie przekracza  $2,5 \text{ m}^2$ , na 36 prostokątów – gdy pole przekroju jest większe od  $2,5 \text{ m}^2$ .

### Pomiar średniej prędkości przepływu przez sondowanie w jednym punkcie rurociągu

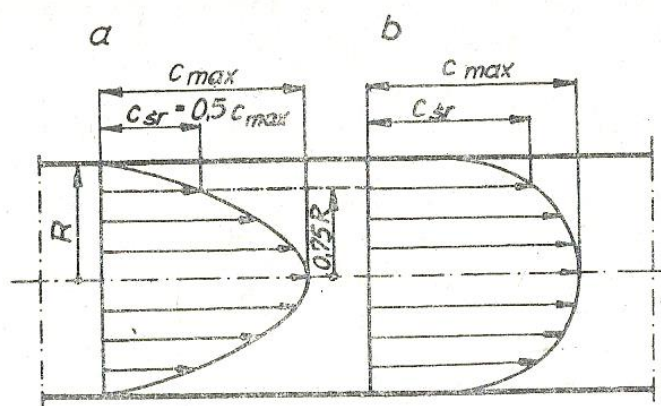
Prędkość przepływu zmierzona rurką spiętrzającą związana jest ściśle z miejscem ustawienia sondy pomiarowej i ma charakter prędkości lokalnej. Ustalenie średniej prędkości przepływu dla przekroju kanału wymaga dokonania pomiaru w odpowiednio dobranych punktach tego przekroju, tak aby średnia prędkość mogła być ustalona z wystarczającą dokładnością, w sposób możliwie dogodny. Teoretyczny rozkład prędkości przepływu zależy od tego, czy przepływ ma charakter laminarny czy burzliwy (rys. 10-9), a rozpoznanie tego charakteru i określenie stopnia burzliwości przepływu umożliwia liczba Reynoldsa  $Re$ , którą dla rurociągów zdefiniowano następująco

$$Re = \frac{c D_h}{\nu}$$

gdzie:  $c$  – prędkość charakterystyczna, która może być prędkością średnią lub maksymalną,

$\nu$  – lepkość kinetyczna (rys. Z-3, Z-4),

$D_h$  – średnica hydrauliczna rurociągu.



Rozkłady prędkości w rurociągu: a) przepływ laminarny  $Re \leq 2,3 \cdot 10^3$ ,  
b) przepływ turbulentny  $Re = 4 \cdot 10^3$

Średnica hydrauliczna dla rurociągów kołowych równa jest średnicy geometrycznej.

Ogólnie średnicę hydrauliczną oblicza się z równania

$$D_h = \frac{4 A}{O}$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego rurociągu,  
O – obwód zwilżony przez płyn.

Dla powietrza lepkość kinetyczna określona jest zależnością

$$\nu = 17,7 \cdot 10^{-6} \frac{T^2}{P}$$

Dla rurociągów o przekroju kołowym liczba Reynoldsa wynosi:

- na podstawie prędkości średniej

$$Re_{c_{\text{sr}}} = \frac{c_{\text{sr}} D}{\nu}$$

- na podstawie prędkości maksymalnej

$$Re_{c_{\text{max}}} = \frac{c_{\text{max}} D}{\nu}$$

Przepływy laminarne (uwarstwione), dla których obliczona liczba Reynoldsa  $Re \leq 2300$ , zdarzają się w praktyce bardzo rzadko (przy bardzo małych prędkościach, małych średnicach i dużych lepkościach np. przy przepływie oleju). Rozkład prędkości przy przepływie laminarnym przedstawia paraboloidę obrotową, a prędkość średnia przepływu równa się połowie maksymalnej występującej w osi rurociągu (rys. 10-9a).

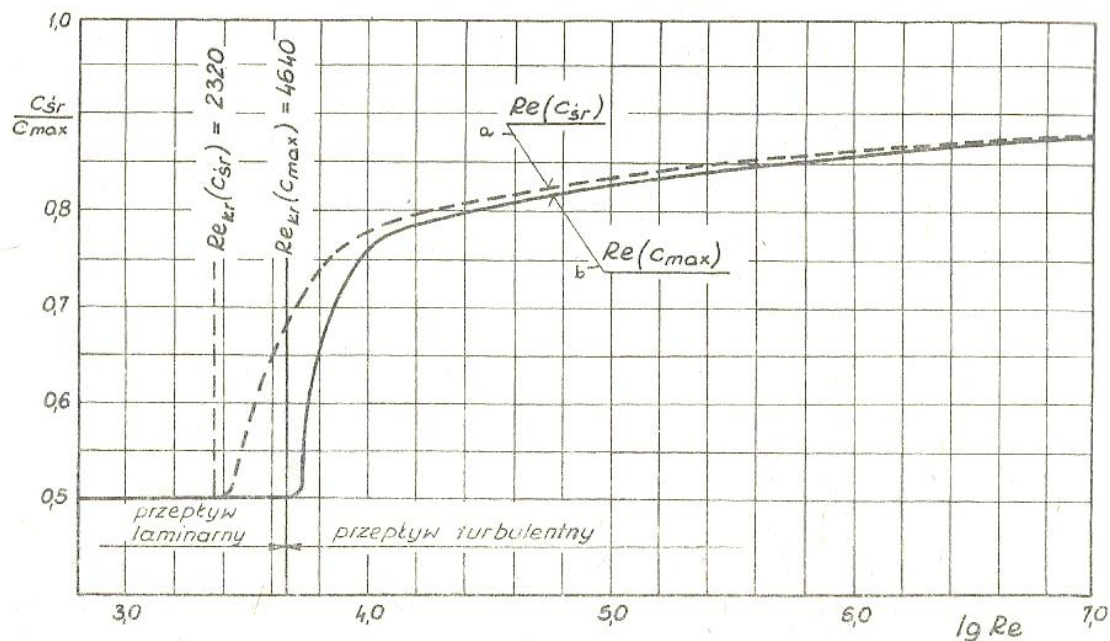
Przy przepływach burzliwych  $Re > 2300$  krzywe rozkładu prędkości mają przebieg bardziej płaski (rys. 10-9b) i silnie opadają przy przejściu do warstwy granicznej przy ścianie rurociągu. Im wyższy stopień burzliwości (większa liczba  $Re$ ), tym bardziej płaski przebieg krzywych prędkości. Zakładając teoretyczny rozkład prędkości, można dla przekroju kołowego ustalić punkt, w którym przecinają się, z pewnym przybliżeniem, wszystkie krzywe stosunków prędkości średniej  $c_{\text{sr}}$  niezależnie od stopnia burzliwości, a występujące w nim prędkości mają wartość średniej prędkości dla poszczególnych profili prędkości. Odległość tego punktu od osi rurociągu wynosi około  $r \approx 0,75 R$ . Stąd wniosek, że w rurociągu, w którym nie występują żadne zewnętrzne zakłócenia przepływu i chropowatość ścianek jest równomierna, można zmierzyć średnią prędkość przepływu wykonując pomiar w jednym punkcie przekroju, ustalonym jak wyżej. Jednak w zdecydowanej większości przypadków, z jakimi spotykamy się w praktyce, nie można założyć, że nie ma zakłóceń przepływu, gdyż występujące w rzeczywistości zmiany kierunku przepływu, wywołane przez kolana i rozgałęzienia, zmiany przekroju w zaworach i klapach regulacyjnych, nierównomierna chropowatość ścianek itp. powodują, że w przekroju pomiarowym wystąpić mogą różne prędkości.

Rozkłady profilów prędkości w rurociągach w przepływach o różnych liczbach Reynoldsa badał Nikuradse. Doświadczenia wykazały, że w przepływach osiowosymetrycznych istnieje stała zależność

$$\frac{c_{\text{sr}}}{c_{\text{max}}} = f(Re)$$

przedstawiona na rysunku 10-10.





Rys.10-10. Wykres  $c_{sr}/c_{max} = f(Re)$ : a) dla  $Re$  obliczonej z prędkości  $c_{max}$   
 b) dla  $Re$  obliczonej z prędkości  $c_{sr}$

Krzywa a obrazuje przebieg  $c_{sr}/c_{max}$  od liczby Reynoldsa obliczonej z prędkości średniej, natomiast krzywa b dla  $Re$  obliczanej z prędkości maksymalnej.

Z przedstawionego wykresu w sposób praktyczny można korzystać mierząc prędkość maksymalną rurką spiętrzającą umieszczoną w środku rurociągu, a po obliczeniu liczby Reynoldsa odczytać  $c_{sr}/c_{max}$  i wyznaczyć prędkość średnią.

Pomiar prędkości średniej w sposób pośredni poprzez pomiar prędkości maksymalnej w środku rurociągu jest dokładniejszy od bezpośredniego pomiaru przez sondę umieszczoną w odległości  $0,75 R$  (rys. 10-9) ze względu na mniejszy gradient prędkości.

Warunkiem pomiaru średniej prędkości przepływu w obydwóch przypadkach jest jednak idealna symetria osiowa przepływu. Przekrój pomiarowy winien być poprzedzony odcinkiem prostym bez żadnych przeszkód (zawory, kolana itp.) o minimalnej długości  $40 \div 50 D$ .

Główną zaletą tych pomiarów jest mała pracochłonność. Jednak dokładność tej metody jest mniejsza od metod opartych na sondowaniu przekroju.

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**  
**Instytut Energetyki Ciepłej**  
**ite.put.poznan.pl**

**Temat:**

**Pomiar strumienia objętości i masy płynu przy użyciu rurek spiętrzających**

Imię Nazwisko:		Rok akademicki:	
Nr indeksu:		Grupa:	
Data wykonania:	Data zaliczenia:	Ocena ze sprawdzianu:	Ocena z ćwiczenia:

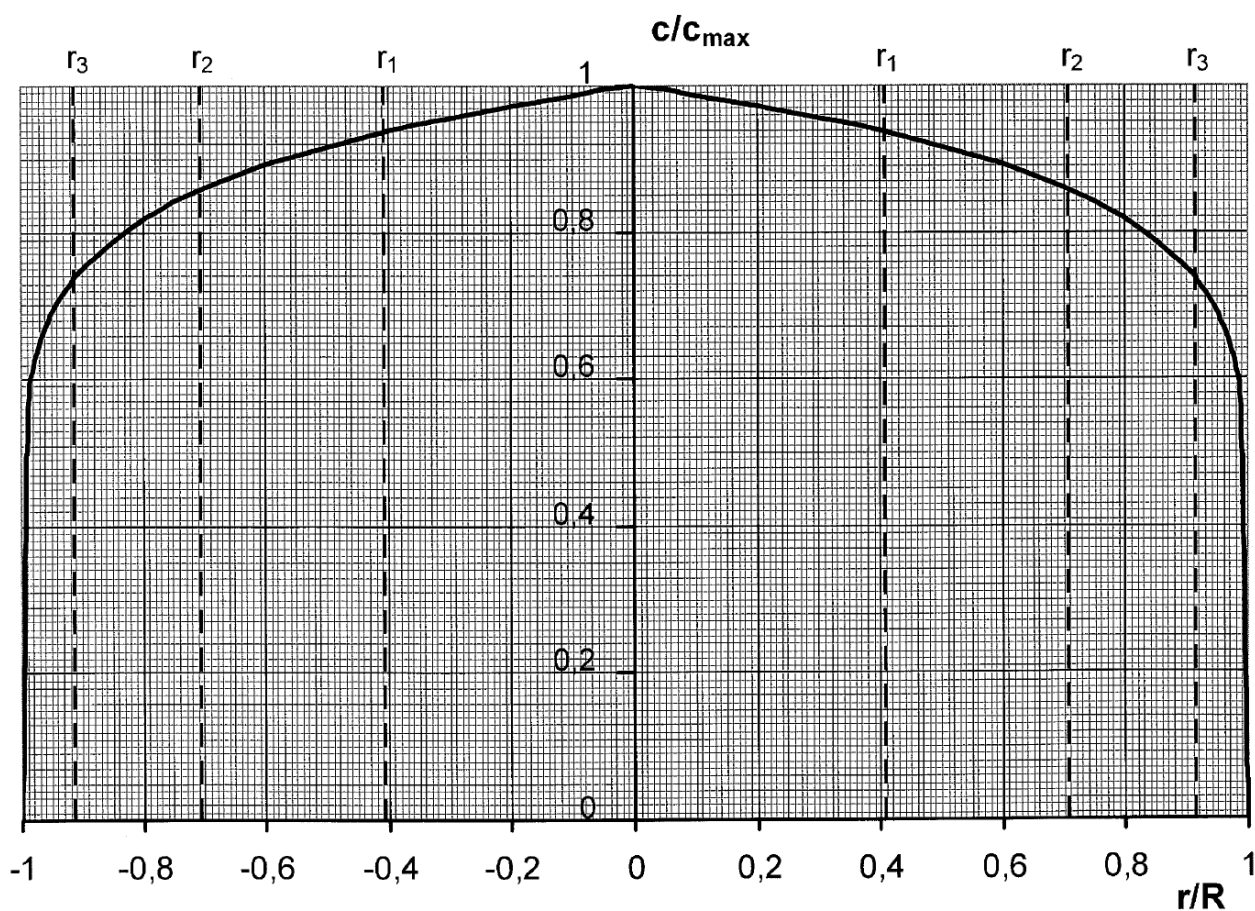
1. Schemat stanowiska pomiarowego

2. Tabela Pomiarowa

1.	Typ rurki spiętrzającej: sonda Prandtla
2.	Średnica sondy $d=3$ mm
3.	Średnica rurociągu $D=100$ mm
4.	Nastawy suwaka sondy: - skrajna górna $a_g = \dots\dots\dots$ mm - skrajna dolna $a_d = \dots\dots\dots$ mm - środek rurociągu $a_{sr} = \dots\dots\dots$ mm
5.	Pomiar ciśnienia barometrycznego: $p_o = \dots\dots\dots$ hPa $\dots\dots\dots$ Pa
6.	Indywidualna stała gazowa powietrza wilgotnego ( $\varphi = 50$ ; $p = 1$ bar; $t = 20^\circ\text{C}$ ) $R = 288,3$ J/kg K
7.	Lokalne przyspieszenie ziemskie: $g=9,81$ m/s <sup>2</sup>

-	Wielkość	Punkt pomiarowy									
-	-	a <sub>d</sub>	3	2	1	a <sub>śr</sub>	1	2	3	a <sub>g</sub>	
8.	Promień sondowania r [mm]										
9.	Nastawy suwaka a[mm]										
10.	Stosunek r/R										
11.	Ciśnienie statyczne p <sub>st</sub> [Pa]										
12.	Ciśnienie dynamiczne p <sub>d</sub> [Pa]										
13.	Prędkość powietrza c[m/s]										
14.	Prędkość względna c/c <sub>max</sub>										
15.	Ciśnienie różnicowe na zwężce(dysza typu ISA)						Δp =				Pa
16.	Temperatura powietrza w rurociągu:	t =									°C
		T =									K
17.	Ciśnienie statyczne w rurociągu:	p <sub>st</sub> =									Pa
18.	Ciśnienie statyczne absolutne: :	p <sub>st,a</sub> = p <sub>o</sub> +p <sub>st</sub> =									Pa
19.	Gęstość powietrza w rurociągu:	ρ =									kg/m <sup>3</sup>
20.	Prędkość średnia w rurociągu:	c <sub>śr</sub> =									m/s
21.	Prędkość maksymalna:	c <sub>max</sub> =									m/s
22.	Strumień objętości:	V̇ =									m <sup>3</sup> /s
23.	Strumień masy:	ṁ =									kg/s
24.	Kinematyczny współczynnik lepkości:	ν = 17,7x10 <sup>-6</sup> $\frac{T^2}{p}$									m <sup>2</sup> /s
		=									

25.	Liczba Reynoldsa	Re=	
26.	Stosunek: - z pomiaru -wg Nikuradse	$c_{sr}/c_{max} =$ $c_{sr}/c_{max} =$	
27.	Typowy rozkład prędkości w rurze gładkiej wg Nikuradse $\frac{c}{c_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$ $\text{dla } Re = \frac{c_{sr} \cdot D}{\nu} \approx 2 \cdot 10^5, n = 8$		



## 28. Podsumowanie i wnioski