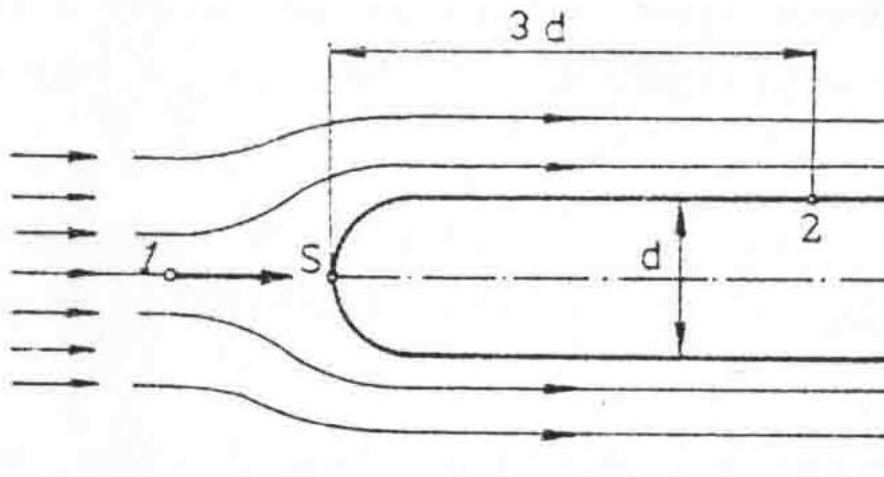


POMIAR STRUMIENIA OBJĘTOŚCI I MASY ZA POMOCAŃ RUREK SPIĘTRZAJĄCYCH

Robert Kłosowiak



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

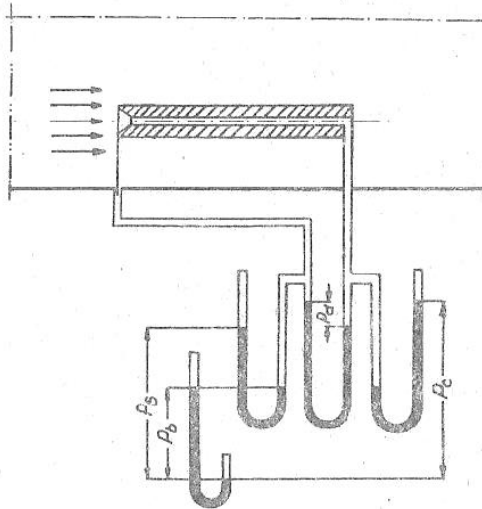
Dla linii prądu przechodzącej przez oś symetrii optywanego ciała (rys. 1) można napisać równanie Bernoullego w postaci:

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

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

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

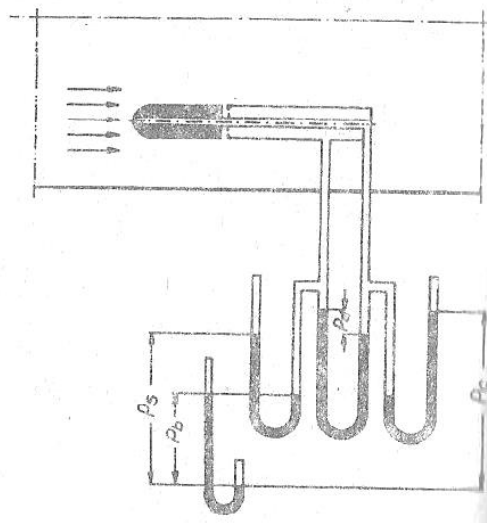
Ciśnienie całkowite w punkcie S jest równe ciśnieniu stagnacji. Gdy w przepływie równoległe do linii prądu wstawimy cienką rurkę, jak pokazano na rysunku 1, to w jej wnętrzu panować będzie ciśnienie stagnacji, czyli ciśnienie całkowite P_C . Przesyłając impuls tego ciśnienia do manometru, można zmierzyć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



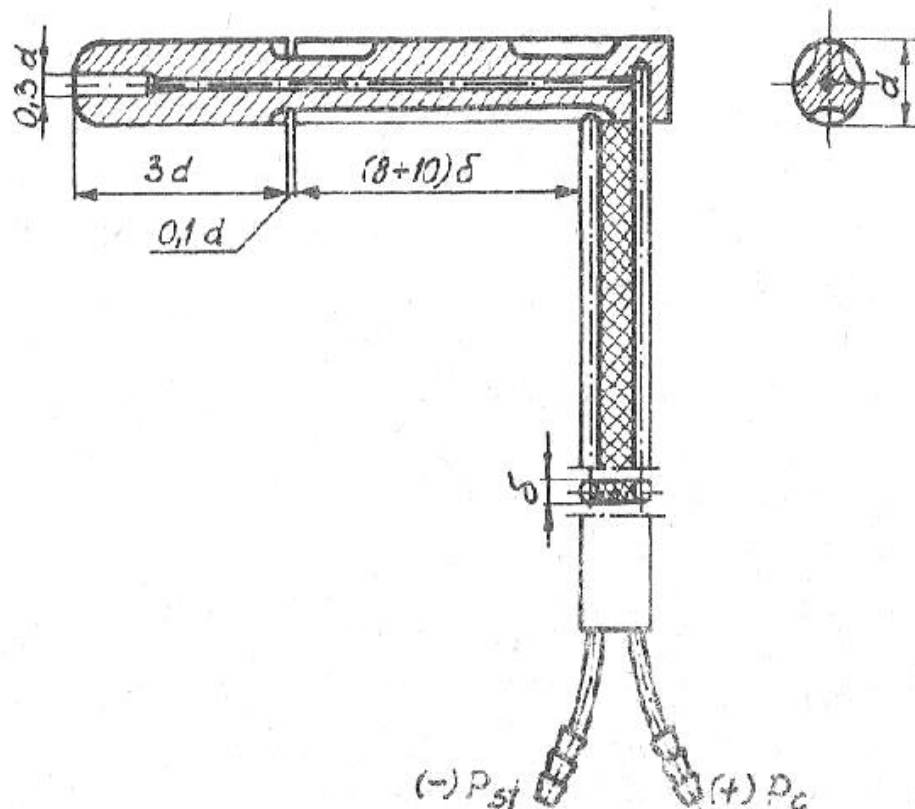
Rys.2. Pomiar ciśnienia rurką Pitotota. Schemat układu pomiarowego.

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

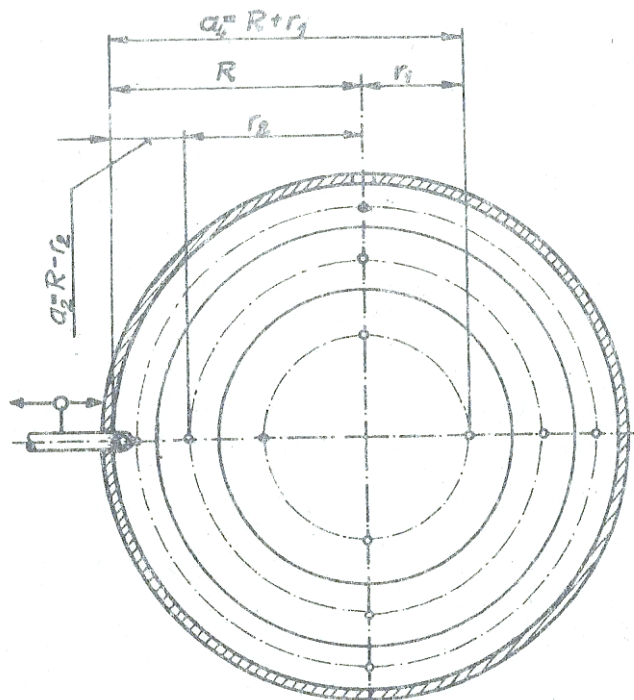
$$r_i = R \sqrt{\frac{2i-1}{2n}}$$

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 punktu 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

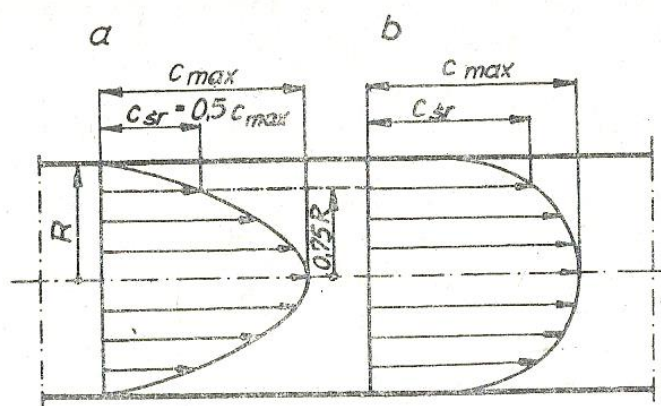
Prędkość przepływu zmierzona rurką spiętrzającą związana jest ściśle z miejscem ustawienia sondy pomiarowej i ma charakter prędkości lokalnej. Ustalenie średniej prędkości przepływu dla przekroju kanału wymaga dokonania pomiaru w odpowiednio dobranych punktach tego przekroju, tak aby średnia prędkość 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,

ν – 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

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

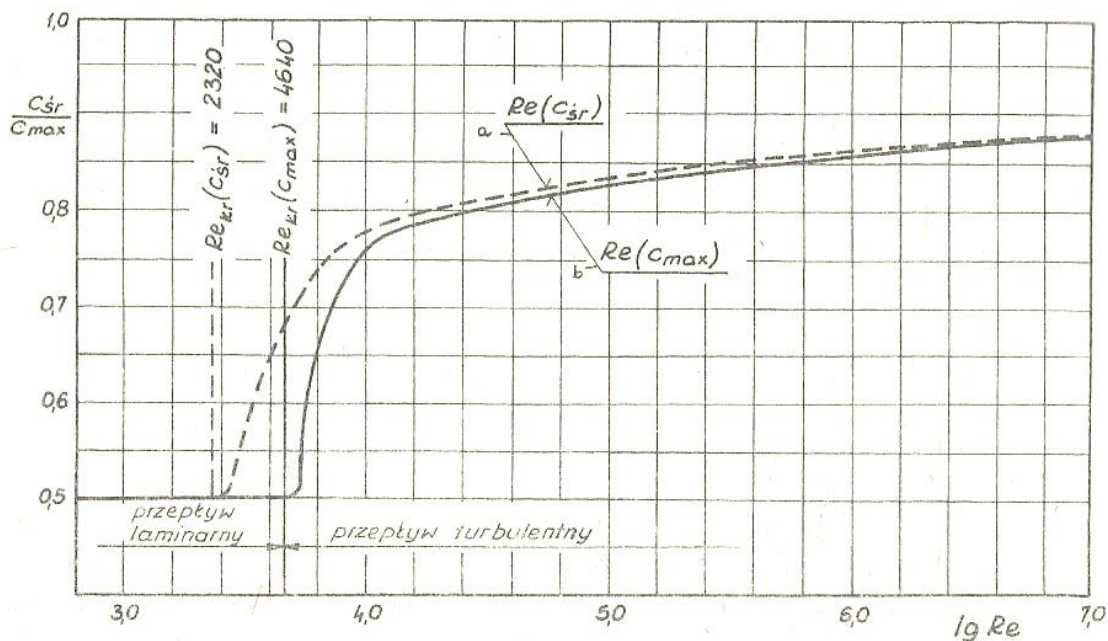
Przepływy laminarne (uwarstwione), dla których obliczona liczba Reynoldsa $Re \leq 2300$, zdarzają się w praktyce bardzo rzadko (przy bardzo małych prędkościach, małych średnicach i dużych lepkościach np. przy przepływie oleju). Rozkład prędkości przy przepływie laminarnym przedstawia paraboloidę obrotową, 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_{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 gazu przy użyciu rurek spiętrzających

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

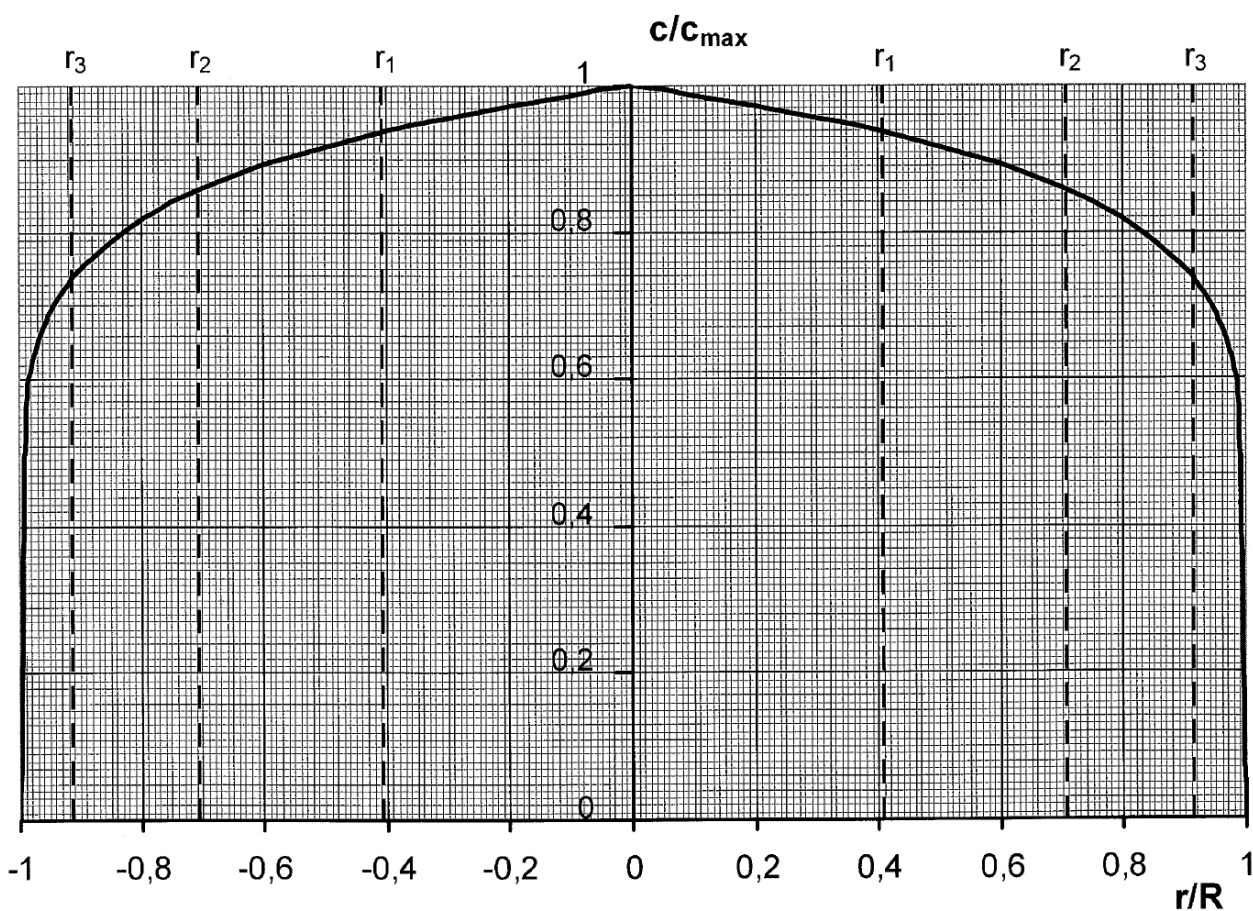
1. Schemat stanowiska pomiarowego

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 ²

-	Wielkość	Punkt pomiarowy									
-	-	a _d	3	2	1	a _{śr}	1	2	3	a _g	
8.	Promień sondowania r [mm]										
9.	Nastawy suwaka a[mm]										
10.	Stosunek r/R										
11.	Ciśnienie statyczne p _{st} [Pa]										
12.	Ciśnienie dynamiczne p _d [Pa]										
13.	Prędkość powietrza c[m/s]										
14.	Prędkość względna c/c _{max}										
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 _{st} =									Pa
18.	Ciśnienie statyczne absolutne: :	p _{st,a} = p _o +p _{st} =									Pa
19.	Gęstość powietrza w rurociągu:	ρ =									kg/m ³
20.	Prędkość średnia w rurociągu:	c _{śr} =									m/s
21.	Prędkość maksymalna:	c _{max} =									m/s
22.	Strumień objętości:	\dot{V} =									m ³ /s
23.	Strumień masy:	\dot{m} =									kg/s
24.	Kinematyczny współczynnik lepkości:	$\nu = 17,7 \times 10^{-6} \frac{T^2}{p}$									m ² /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