

WYZNACZENIE ŚREDNIEJ PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU GAZU ORAZ BADANIE JEJ ROZKŁADU W PRZEKROJU RUROCIĄGU.

Cel ćwiczenia.

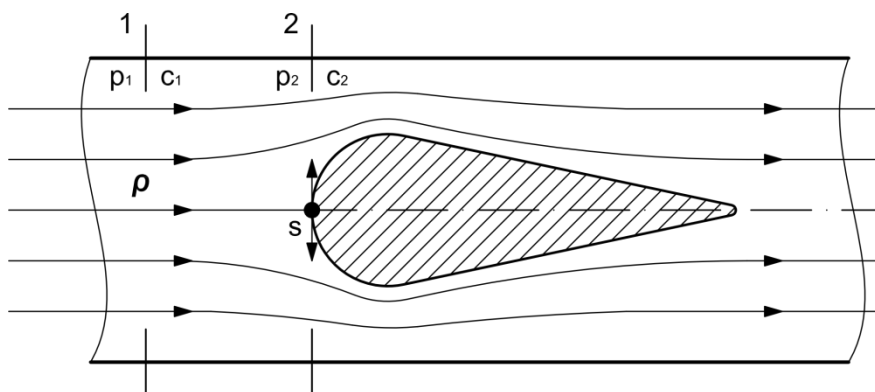
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami pomiaru średniej prędkości gazu w przypadku przepływu osiowo- symetrycznego oraz ich porównanie.

WPROWADZENIE.

Prawie w każdym procesie technologicznym występuje przepływ jakiegoś czynnika (ciecz lub gaz). Ilość przepływającej substancji oraz jej parametry wpływają na przebieg danego procesu technologicznego. Wielkości te należy tak dobierać aby efekt był najlepszy a koszty najniższe, dobór tych wielkości związany jest często z ich prawidłowym pomiarem. Prędkość czynnika w rurociągu zależy od odległości od ścianki, największa jest w osi a najmniejsza przy ściance (w warstwie przyściennej równa się zero). Dlatego prawidłowy pomiar, polega na wyznaczeniu jej wartości średniej.

Pomiar średniej prędkości gazu można przeprowadzić różnymi metodami. Do najbardziej rozpowszechnionych należą pomiary wykonane za pomocą rurek spiętrzających, zwężek, anemometrów (skrzydełkowych, czasowych) lub termoanemometrów. W ćwiczeniu przedstawione będą trzy metody wyznaczenia prędkości średniej, uzyskane z nich wyniki należy porównać między sobą oraz ocenić ich dokładność.

Jeżeli w jednostajnym przepływie płynu o prędkości c_1 i ciśnieniu p_1 znajdzie się przeszkoda w postaci ciała zanurzonego, to wówczas bezpośrednio przed nią następuje spiętrzenie przepływu oraz opływ rozdzielonych strug dookoła tej przeszkody. W punkcie S (zwanym punktem wejścia lub spiętrzenia) znajdującym się w środku obszaru spiętrzenia, prędkość przepływu jest równa zero $c_2 = 0$.



Rys.1. Opływ dookoła przeszkody

Jeżeli ciśnienie w punkcie wejścia (rys. 1) oznaczymy przez p_2 to dla rozpatrywanej linii prądu stosuje się równanie Bernoulliego w postaci:

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = 0 + \frac{p_2}{\rho g}$$

$$p_2 = \rho \frac{c_1^2}{2} + p_1$$

Ciśnienie p_2 jako suma ciśnienia p_1 i ciśnienia prędkości $\rho \frac{c_1^2}{2}$ w przepływie niezakłóconym nazwano ciśnieniem całkowitym. Ciśnienie p_1 to ciśnienie statyczne, w przepływie niezakłóconym, a wyrażenie $\rho \frac{c_1^2}{2}$ nazwano ciśnieniem dynamicznym, możemy więc napisać, że :

$$p_c = p_d + p_{st} \quad (1)$$

gdzie :

$$p_d = \rho \frac{c_1^2}{2}$$

Wielkość szukana czyli prędkość, występuje w wyrażeniu ciśnienia dynamicznego $p_d = \rho \frac{c_1^2}{2}$, czyli aby ją obliczyć (c) musimy w jakiś sposób wyznaczyć wartość p_d . Przekształcając równanie 1 otrzymamy :

$$p_d = p_c - p_{st} \quad (2)$$

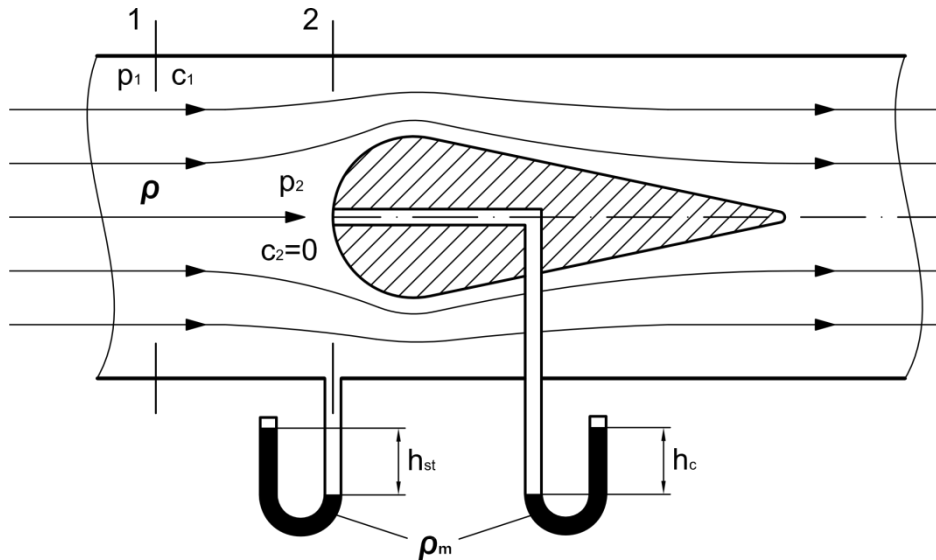
Pomiar ciśnienia statycznego jest znany – dokonuje się go za pomocą manometru na kierunku prostopadłym do przepływającego czynnika . **Jak zmierzyć p_c ?** Zjawisko spiętrzenia wykorzystano przy budowie tzw. rurek spiętrzających tj. Pitota i Prandtla, którymi to rurkami można zmierzyć p_c .

RURKI SPIĘTRZAJĄCE

Rurka Pitota

Zasada działania rurki spiętrzającej oparta jest również o równanie Bernoulliego , które w przypadku małych prędkości (poniżej 0,4 prędkości dźwięku , gaz można traktować jako nieściśliwy) ma postać :

$$\rho \frac{c^2}{2} + p = const \quad (3)$$



Rys. 2. Przeszkoda przewiercona - rurka Pitota

Rurka Pitota przedstawiona na rys. 2. **jest przyrządem do pomiaru ciśnienia całkowitego** w strumieniu płynu. Jeżeli w punkcie wejścia rozpatrywanej przeszkody wywiercony zostanie otwór, to wewnątrz tego otworu będzie panowało ciśnienie p_2 , które można zmierzyć manometrem i jest to ciśnienie całkowite p_c . Z analogiczną sytuacją spotykamy się, kiedy w przepływie umieścimy przeszkodę w postaci rurki zgiętej pod kątem prostym, skierowaną jednym końcem równolegle przeciw przepływowi, a drugi koniec połączymy z manometrem. Mierząc w tym samym przekroju ciśnienie statyczne p_{st} a następnie odejmując je od ciśnienia całkowitego (p_c) otrzymamy wartość ciśnienia dynamicznego (p_d) w danym punkcie wg. wzoru 2.

$$p_d = \rho_m \cdot g \cdot h_c - \rho_m \cdot g \cdot h_{st} = \rho_m \cdot g (h_c - h_{st})$$

Znając gęstości ρ przepływającego czynnika i mając wyznaczone p_d łatwo obliczymy prędkość w danym punkcie wiedząc już że,

$$p_d = \rho \frac{c^2}{2}$$

a stąd

$$c = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (4)$$

Rurka Prandtla

Rozwinięciem rurki Pitota jest rurka Prandtla, która potocznie nazywana jest rurką w rurce. Mianowicie rurka Pitota została owinięta drugą rurką, która tworzy jakby płaszcz osłaniający rurkę Pitota a za jej pomocą, mierzy się ciśnienie statyczne. Stosując ponownie równanie Bernoulliego na wejściu do rurki otrzymujemy:

$$p_c = p_d + p_{st}$$

Wstawiając za $p_d = \rho \frac{c^2}{2}$

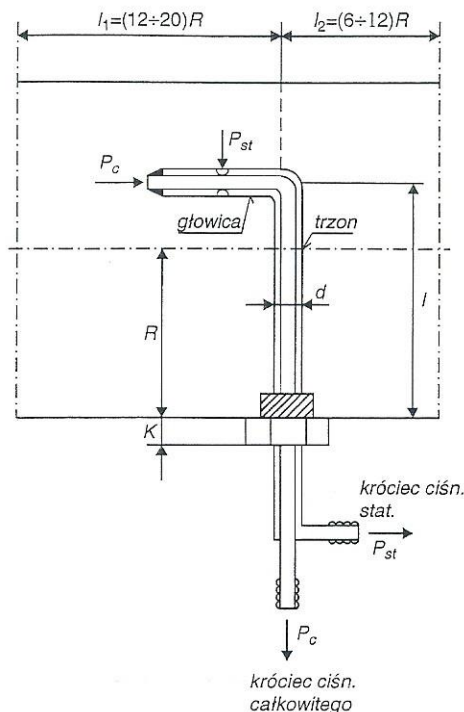
Można więc wyznaczyć wzór na prędkość przepływu:

$$c = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_c - p_{st})} \quad (5)$$

$$c = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d} \quad (6)$$

$$p_d = \rho_m \cdot g \cdot h_d \quad h_d = h_c - h_{st}$$

Jak widać z powyższego wzoru, prędkość przepływu można określić poprzez pomiar ciśnienia. Różnica ciśnienia całkowitego i statycznego występująca pod pierwiastkiem we wzorze (5) to ciśnienie dynamiczne. Należy zwrócić uwagę na to, aby w wyrażeniu (6) nie pomylić gęstości, cieczy manometrycznej z gęstością przepływającego czynnika.



Rys. 3. Rurka Prandtla usytuowana w rurociągu.

Z trzonu rurki wyprowadzone są dwa króćce oznaczone odpowiednio znakami (+) i (-). Króciec na przedłużeniu trzonu, ozn. (+) służy do pomiaru ciśnienia całkowitego, zaś króciec

prostopadły do niego ozn. (-) mierzy ciśnienie statyczne. Przez odpowiednie połączenie króćców rurki z mikromanometrem można określić wprost wartość ciśnienia dynamicznego. W rurkach zazwyczaj stosuje się kilka (6) otworków do poboru ciśnienia statycznego rozmieszczonych na obwodzie głowicy. Prostopadle do trzonu wykonane jest ramię ustawcze, które jest wskaźnikiem położenia głowicy w rurociągu. Prawidłowy pomiar ciśnienia dynamicznego w punkcie polega na tym, aby kierunek prędkości płynu był zgodny z osią głowicy, a ramię ustawcze było równoległe do osi przewodu. Przy zachowaniu tych wskazówek otwór impulsowy ciśnienia całkowitego jest prostopadły do prędkości a przekroje otworków ciśnienia statycznego są styczne do prędkości płynu.

Dokładny pomiar ciśnienia dynamicznego można uzyskać wówczas, gdy przepływ jest potencjalny, czyli bezwirowy, ustalony i podlega prawu ciągłości strugi. Ponieważ rozkład prędkości w przepływie rzeczywistym jest zmienny, należy więc znać wartość prędkości średniej.

Rurka Pitota działa w podobny sposób z tą różnicą, że możemy przy jej pomocy mierzyć tylko ciśnienie całkowite, aby pomierzyć ciśnienie statyczne należy wykonać dodatkowy otwór impulsowy do pomiaru ciśnienia statycznego i odejmując p_{st} od p_c otrzymujemy wartość p_d .

I. WYZNACZENIE PRĘDKOŚCI ŚREDNIEJ wg. metody NIKURADSE.

Najprostszy sposób określenia prędkości średniej opiera się, o zależność

$$\frac{c_{sr}}{c_{max}} = f(Re), \text{ którą sporządził Nikuradse na podstawie badań.}$$

gdzie: c_{max} – maksymalna prędkość strumienia w osi przewodu, m/s

c_{sr} – średnia prędkość w przewodzie, m/s

$Re = \frac{c_{max} \cdot D}{\nu}$ - liczba Reynoldsa, określa ona kiedy przepływ jest laminarny (uporządkowany, warstwowy, stabilny), a kiedy jest turbulentny (burzliwy). Np. dla przepływającego powietrza przez okrągłą rurę, wartość rozgraniczająca te dwa rodzaje ruchu to 2320.

D – średnica przewodu, m

ν – kinematyczny współczynnik lepkości, $\frac{m^2}{s}$.

W metodzie tej rurkę Prandtla umieszcza się w osi przewodu, gdzie prędkość gazu jest maksymalna a zatem maksymalne również p_d . Wartość tej prędkości oblicza się w następujący sposób:

$$p_{dmax} = \rho \cdot g \cdot h_{dmax}$$

$$c_{max} = \sqrt{2 \frac{p_{dmax}}{\rho}} \quad (7)$$

gdzie: ρ – gęstość gazu w miejscu pomiaru, kg/m^3

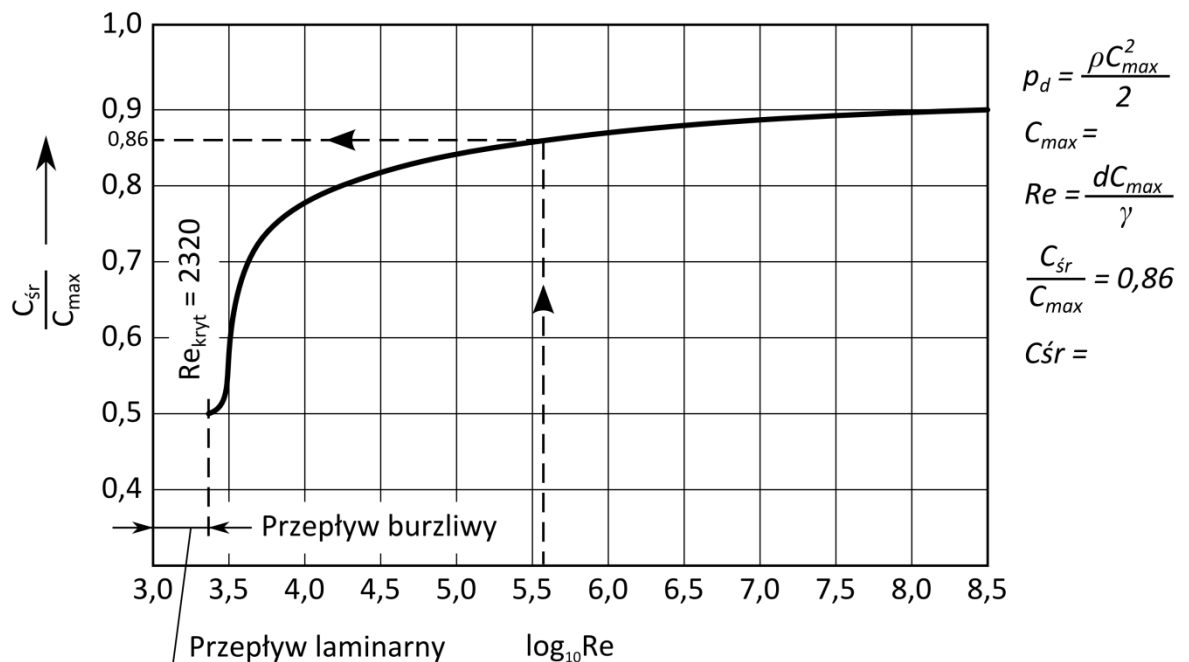
$p_d = \rho_m g h_d$ – ciśnienie dynamiczne, Pa;

ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej, kg/m^3

h_d – wysokość ciśnienia dynamicznego w punkcie sondowania, m ;

g – przyspieszenie ziemskie $9.81 m/s^2$

Następnie wyznacza się liczbę Reynoldsa dla wyliczonej powyżej c_{max} i z wykresu (rys. 4.) odczytuje wartość c_{sr}/c_{max} . Znając stosunek c_{sr}/c_{max} (np. $A = 0,86$) oraz wartość c_{max} obliczymy, że $c_{sr} = A \cdot c_{max}$. Metoda ta nie jest zbyt dokładna, ale ze względu na prostotę wykonania w pewnych warunkach bardzo przydatna.



Rys. 4. Wykres zależności $c_{sr}/c_{max} = f(Re)$

Przekrój przewodu, w którym umieszcza się sondę Prandtla, powinien znajdować się w odległości $40 \div 50 D$ od jej początku.

Strumień objętości lub masy gazu oblicza się z zależności

$$\dot{V} = A \cdot c_{\dot{s}r} \quad (8)$$

$$\dot{m} = A \cdot c_{\dot{s}r} \cdot \rho \quad (9)$$

gdzie:

A – pole przekroju rurociągu, m^2 ,

$c_{\dot{s}r}$ – średnia prędkość gazu w rurociągu, $\frac{m}{s}$;

ρ – gęstość gazu w rurociągu, kg/m^3 .

W celu ustalenia gęstości gazu ρ należy zmierzyć parametry termodynamiczne gazu – ciśnienie statyczne i temperaturę w przekroju pomiarowym .

$$\rho = \rho_n \frac{(p - \varphi p'') T_n}{T_1 p_n} + \varphi \rho''$$

gdzie: ρ_n – gęstość w warunkach normalnych, $\frac{kg}{m^3}$

p – ciśnienie w przekroju pomiarowym, Pa;

φ – wilgotność wagłędna powietrza,

p'' – ciśnienie pary nasyconej, Pa ;

T_n – temperatura normalna , K;

T_{-1} temperatura powietrza w przekroju pomiarowym, K;

p_n – ciśnienie normalne, Pa;

ρ'' – gęstość pary nasyconej kg/m^3

II. WYZNACZENIE PRĘDKOŚCI ŚREDNIEJ METODĄ RÓWNYCH PÓL

Dokładniejszym sposobem wyznaczenia prędkości średniej jest tzw. **metoda równych pól**. Polega ona na podzieleniu pola przekroju przewodu na szereg elementów – pierścieni i pomiarze ciśnienia dynamicznego gazu w określonym punkcie każdego z tych elementów.

$$p_{di} = \rho_m \cdot g \cdot h_{di}$$

Prędkość odpowiadającą pomierzonemu ciśnieniu dynamicznemu oblicza się ze wzoru

$$c = \sqrt{2 \frac{p_{di}}{\rho}}$$

gdzie:

c – prędkość lokalna gazu w danym punkcie pomiarowym, $\frac{m}{s}$;

p_{di} –
ciśnienie dynamiczne lokalne pomierzone w poszczególnych punktach, Pa

ρ – gęstość gazu w przekroju pomiarowym, kg/m^3

Średnią prędkość dla pełnego przekroju przewodu określa się jako średnią arytmetyczną z prędkości lokalnych

$$c_{\text{sr}} = \frac{1}{n} (c_1 + c_2 + \dots + c_n) \quad (10)$$

gdzie:

c_1, c_2, \dots, c_n prędkości lokalne gazu w poszczególnych punktach elementów pomiarowych,

n – liczba punktów pomiarowych.

Podczas sondowania należy wykonać n pomiarów od danej ściany rurociągu do ściany przeciwległej wzdłuż dwóch średnic w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych I i II. Czyli w każdym pierścieniu ciśnienie dynamiczne należy mierzyć w czterech punktach.

Promienie, na których leżą punkty pomiarowe, obliczamy wg. wzoru

$$r_z = R \cdot \sqrt{\frac{2z-1}{2N}} \quad (11)$$

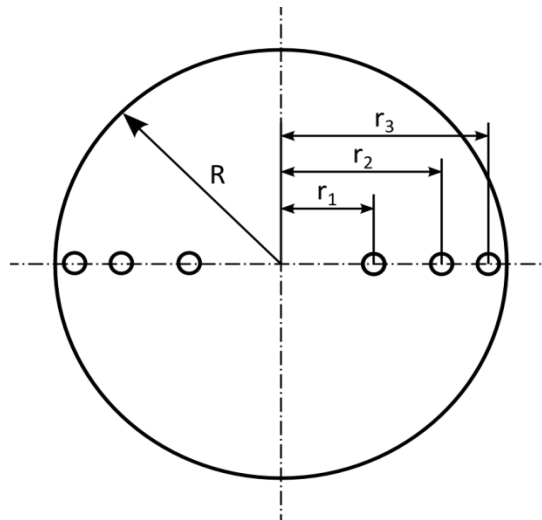
gdzie: R - promień rurociągu,

z – numer kolejnego promienia zwymiarowanego względem środka przekroju,

N – liczba pierścieni, na które podzielony został poprzeczny przekrój rurociągu, znajdują się w nich punkty pomiarowe ciśnienia dynamicznego.

Dla danej średnicy rurociągu D przyjmuje się odpowiednią ilość N pierścieni wg. zalecenia:

$$150 < D \leq 300; \quad N = 3 \div 6, \quad 300 < D \leq 900; \quad N = 5 \div 10$$



Rys. 5. Promienie przekroju r_z w rurociągu.

Wydajność przez dany przekrój A liczymy zgodnie ze wzorem (8) lub (9).

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na dokładność pomiaru wydajności są:

- dokładność odczytu wysokości ciśnienia dynamicznego
- położenie przekroju pomiarowego w stosunku do kształtek sieci wywołujących deformację pola prędkości
- ilość oraz położenie punktów pomiarowych w polu przekroju.

W praktyce nie zawsze można mieć wpływ na wymienione czynniki, zwłaszcza ukształtowanie sieci i dostępność przekroju spełniającego warunki pomiarowe. Najlepiej aby odcinek przed przekrojem był prosto osiowy na długości 10 średnic i 6 średnic za przekrojem. Takie wymagania powinno się zabezpieczyć już na etapie projektowania. Liczba i położenie punktów pomiarowych w polu przekroju zależy w dużym stopniu od mierzącego, który decyduje o ilości pierścieni oraz metodzie wyznaczenia prędkości średniej. Oprócz podanych wcześniej metod wg. Nikuradse i arytmetycznej (równych pól) stosowana bywa **metoda liniowo-logarytmiczna**. Wg. niej dla rurociągów kołowych do $D = 300$ mm przekrój wystarczy sondować w 4 punktach na dwóch

prostopadłych średnicach. Dla większych średnic rurociągu wystarczy wybrać 6 punktów sondowania na każdej z nich.

Promienie punktów wynoszą: dla $D \leq 300 \text{ mm}$ $r_1 = 0,420 R$,

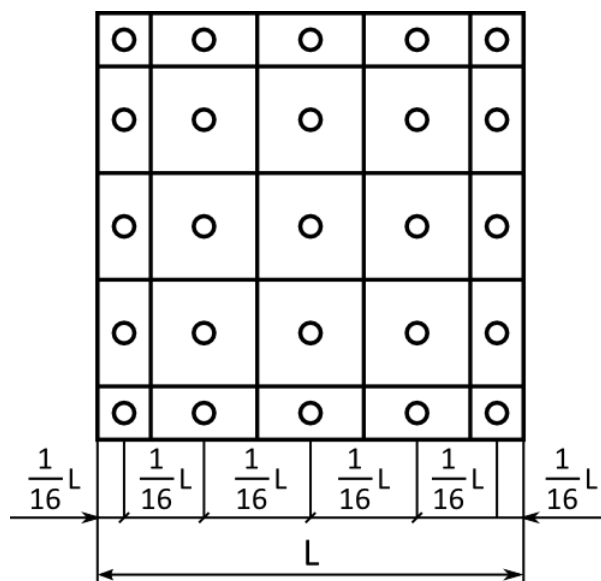
$$r_2 = 0,914 R,$$

Dla $D > 300 \text{ mm}$ $r_1 = 0,358 R$,

$$r_2 = 0,730 R,$$

$$r_3 = 0,936 R.$$

Dla przewodów prostokątnych sondowanie wykonuje się wzdłuż przekątnych, dzięki czemu za pomocą dwóch otworów (w obudowie) można przesondować przekrój. Uproszczoną metodą jest podział na 4, 9, 16 itd. Prostokątów cząstkowych i pomiar ciśnienia dynamicznego i pomiar ciśnienia dynamicznego w środku cząstkowego prostokąta. Pociąga to za sobą konieczność wykonania większej ilości otworów przy zwiększeniu ilości cząstkowych pól co staje się dużą niedogodnością.



Rys. 6. Podział i rozmieszczenie punktów pomiarowych w rurociągu kwadratowym.

Promienie wzdłuż przekątnych rurociągu, należy obliczyć wg. następujących zależności:

$$r_1 = 0,201 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$r_2 = 0,405 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}$$

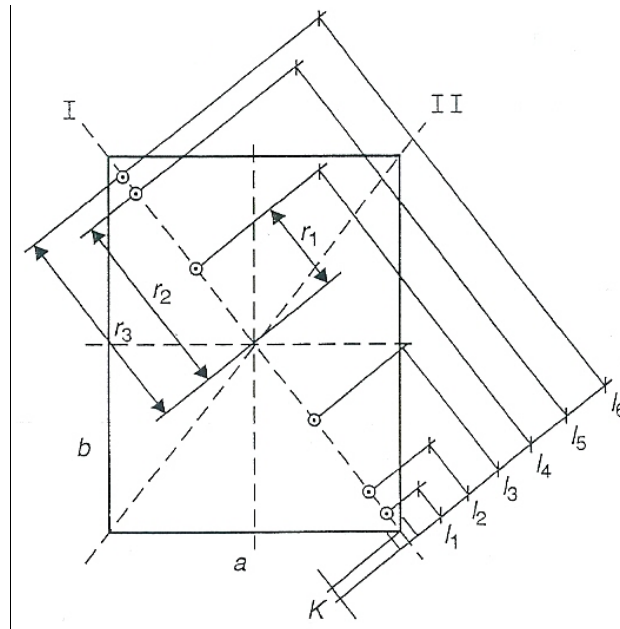
$$r_3 = 0,455 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}$$

gdzie: a i b są bokami przewodu prostokątnego.

Korzystając z rysunku 7. można łatwo obliczyć zagłębienia sondy na przekątnych I i II :

gdzie: p - połowa przekątnej przekroju,

K - wysokość nakrętki mocującej sondę.



Rys. 7 . Rozmieszczenie punktów sondowania w przekroju prostokątnym wg. metody liniowo - logarytmicznej.

Prawidłowo wykonany pomiar ciśnienia dynamicznego musi spełniać następujące warunki. Kat odchylenia osi głowicy od kierunku przepływu może dochodzić do ∓ 3 stopni. Średnica rurki spiętrzającej musi być dobrana do średnicy rurociągu tak, aby spełniała warunek $\frac{d}{D} \leq 0.02$. Głowica rurki nie może być bliżej ściany rurociągu niż jej średnica d . Ciśnienie dynamiczne mierzone rurkami powinno być mniejsze od 0.046 ciśnienia statycznego. Mierzona prędkość gazu nie powinna przekraczać 0.25 prędkości dźwięku. Średnica otworu do poboru ciśnienia całkowitego d_1 ma być tak dobrana aby

$$Re_{d_1} = \frac{c d_1}{\nu} > 200$$

III. POMIAR PRĘDKOŚCI ŚREDNIEJ ANEMOMETREM SKRZYDEŁKOWYM.

Anemometry są to urządzenia służące do pomiaru miejscowych prędkości gazów. Zasada działania anemometru polega na wykorzystaniu sił aerodynamicznych wywieranych przez strumień gazu na elementy przyrządu pomiarowego. Anemometr skrzydełkowy składa się z następujących elementów: wirnika skrzydełkowego o osi obrotu równoległej do przepływającej strugi, obudowy utrzymującej i osłaniającej wirnik oraz układu

elektronicznego mierzącego i przeliczającego prędkość obrotową wirnika. W zależności od typu anemometru zakres pomiarowy wynosi od 0.3 – 50 m/s. Rozdzielczość takich mierników jest rzędu $0.01 \frac{m}{s}$, a dokładność $\pm 3\%$ i możemy nimi mierzyć prędkość chwilową, średnią, maksymalną lub minimalną. Próbkowanie sygnałów pomiarowych zwykle odbywa się raz na sekundę, a podstawa czasu do obliczania wartości średniej może wynosić 2 lub 16 sekund. Liczniki anemometru przed wykonaniem pomiarów należy wyzerować. Wykonać serię pomiarów prędkości miejscowych na wlocie do rurociągu w pięciu punktach pomiarowych (w środku rurociągu, na osiach poprzecznych możliwie najbliżej ścianki). Po umieszczeniu anemometru w miejscu pomiarowym, należy odczekać aż do ustalenia wartości na wyświetlaczu anemometru. Powtórzyć procedurę w każdym z 5 punktów pomiarowych, a następnie uśrednić wynik i zapisać w tabelce. Pomiarów powtórzyć trzykrotnie.

Wykonanie ćwiczenia.

W przekroju rurociągu kołowego dla jednego punktu pracy wentylatora należy wyznaczyć prędkość średnią oraz obliczyć wydajność. W rurze tej jest zainstalowana rurka Prandtla w ten sposób, że można ją przesuwac wzdłuż średnicy. Rurka Prandtla jest przyłączona do mikromanometru cieczowego, na którym odczytujemy różnicę poziomów cieczy manometrycznej $h_c - h_{st} = h_d$ która to wysokość potrzebna jest do obliczenia p_d . Należy wyznaczyć c_{sr} wg. metody Nikuradse, metody równych pól oraz z zastosowaniem anemometru skrzydełkowego. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w sprawozdaniu oraz na ich podstawie sporządzić wykres rozkładu prędkości w rurociągu.

Uzyskane wartości średnie z trzech metod, należy odnieść do wartości wyznaczonej za pomocą zwężki pomiarowej (który to pomiar jest najdokładniejszy). Aby to zrobić należy obliczyć strumień przepływającego czynnika za pomocą zwężki a następnie otrzymany wynik podzielić przez pole przekroju rurociągu.

Obliczenie strumienia:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (12)$$

gdzie:

$C = 0.9373$ – współczynnik przepływu

$\varepsilon = 0.9829$ – liczba ekspansji

$\beta = \frac{d}{D} = 0.7$ – współczynnik przewężenia zwężki

C, ε, β – dotyczą zwężkina stanowisku (dysza ISA)

$d = 0.35\text{m}$ – średnica zwężki

$D = 0.50$ - średnica rurociągu

Δp – różnica ciśnień na zwężce , $\Delta p = \rho_m g \Delta h$

ρ – gęstość przepływającego czynnika

$$C_{sr} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2}$$

Tabela pomiarowa i obliczeniowa dla przekroju o $D = 500 \text{ mm}$.

| Nr. Pomiaru | h_{di} [mm] | p_{di} [Pa] | c_i [m/s] | C_{sr} [m/s] |
|-------------|------------------|------------------|----------------|-------------------|
| 1 | | | | C _{sr} |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| . | | | | |
| N | | | | |

OPRACOWAŁ: WOJCIECH KNAPCZYK.

Literatura

1. Norma. $PN - \frac{81}{M} - 42364$. Rurki spiętrzające
2. Norma. $PN - \frac{81}{M} - 42367$. Pomiar prędkości przepływu za pomocą rurek piętrzących.
3. Fortuna S. Badanie wentylatorów i sprężarek . Kraków, Wydawnictwa AGH, 1999
4. J.Budziński, W.Lassota, J.Olechowicz, Z.Żebrowski. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989