

**INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
ZAKŁAD ELEKTROWNI**

LABORATORIUM POMIARÓW I AUTOMATYKI W ELEKTROWNIACH

BADANIE WENTYLATORA PROMIENIOWEGO

Instrukcja do ćwiczenia

Łódź 1996

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie metod wyznaczania charakterystyk oraz sposobów regulacji wydajności wentylatorów promieniowych. Metody i przyrządy pomiarowe użyte w ćwiczeniu stanowią też dobrą ilustrację do poznania sposobów pomiaru natężenia przepływu oraz ciśnienia statycznego i dynamicznego.

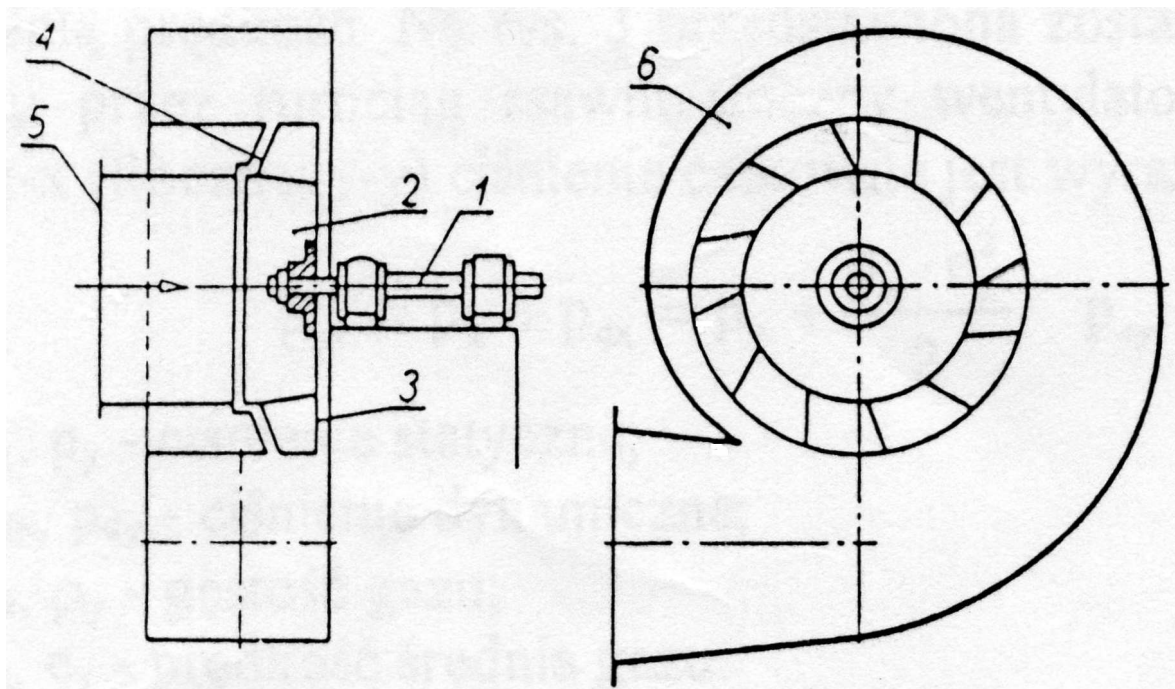
2. WSTĘP

2.1. Budowa, zasada działania oraz klasyfikacja wentylatorów

Wentylatory zalicza się do wirnikowych maszyn roboczych, służących do przetłaczania gazów i par. Mogą one pracować jako urządzenia wyciągowe, podmuchowe lub jako ssąco-tłoczące.

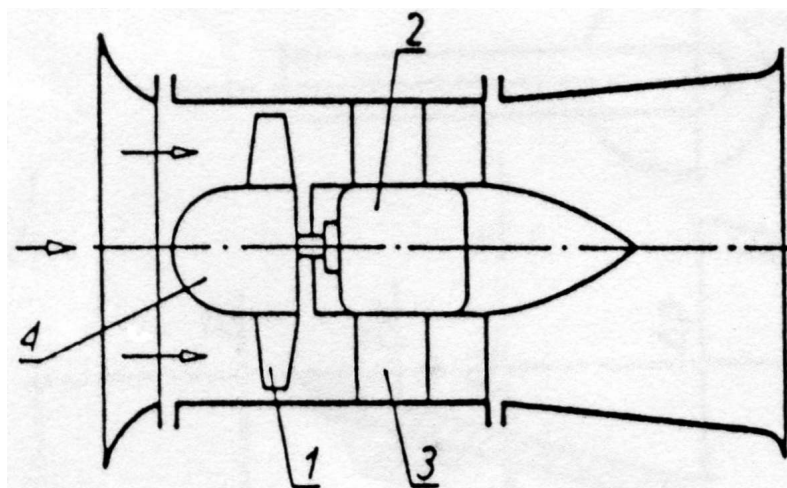
Zastosowanie wentylatorów w elektrowniach ciepłych jest dość szerokie. Obok pomp hydraulicznych stanowią one największą grupę urządzeń pomocniczych, zarówno pod względem liczby, jak i sumarycznej mocy. Do największych i najważniejszych wentylatorów stosowanych w elektrowniach należą wentylatory powietrza (podmuchu) oraz wentylatory spalin (ciągu). Ponadto wyróżnić można wentylatory młynowe, wentylatory stosowane w tzw. chłodniach wentylatorowych do chłodzenia skraplaczy turbin, wentylatory w układach odpowielania pneumatycznego oraz szereg wentylatorów stosowanych w różnych układach chłodzenia: (generatorów, transformatorów itp.).

Pod względem konstrukcyjnym (zależnie od kierunku przepływu czynnika) rozróżnia się wentylatory *promieniowe* i *osiowe*. W wentylatorach promieniowych przepływ czynnika jest prostopadły, natomiast w osiowych równoległy do osi wirnika (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Wentylator promieniowy.

1 - wał napędowy, 2 - wirnik, 3 - tarcza nośna, 4 - tarcza pokrywająca, 5 - wlot, 6 - spiralna obudowa;



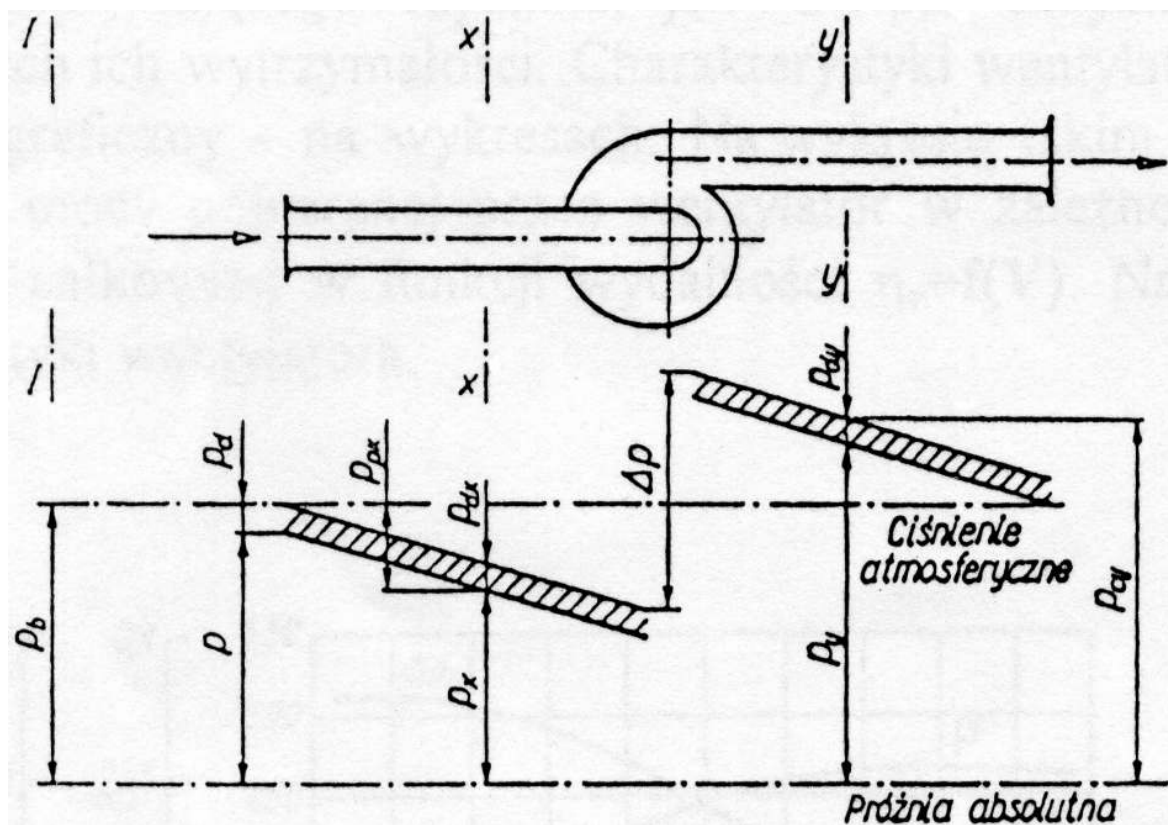
Rys. 2. Wentylator osiowy.

1 - wirnik, 2 - silnik elektryczny, 3 - kierownica, 4 - kolpak;

W wentylatorach przetłaczanie oraz przyrost ciśnienia całkowitego czynnika następuje dzięki pracy zewnętrznej doprowadzonej do wirnika (np. za pomocą silnika elektrycznego). Po nadaniu mu ruchu obrotowego, porcje gazu znajdujące się w obrębie kanałów międzyłopatkowych przemieszczają się pod wpływem sił wywołanych przez obracający się wieniec w kierunku promieniowym (maszyny promieniowe) lub osiowym (maszyny osiowe). W przestrzeni międzyłopatkowej wytwarza się podciśnienie, dzięki czemu przez wlot napływają nowe porcje gazu. Podczas przepływu przez obracający się wieniec łopatkowy, czynnik doznaje przyrostu energii kinetycznej i ciśnienia statycznego. Przekazana w wirniku energia musi być wystarczająca na pokonanie oporów przepływu przez część ssawną i tłoczną rurociągu, uzyskanie wymaganego ze względu na warunki pracy wentylatora użytecznego ciśnienia statycznego oraz musi zapewnić czynnikowi odpowiednią prędkość. Na rys. 3 przedstawiona została zmienność ciśnienia gazu podczas przepływu przez rurociąg ssawno-tłoczny wentylatora. W dowolnym przekroju części ssawnej x-x (tłocznej y-y) ciśnienie całkowite jest wyrażone zależnością:

$$p_{cx} = p_x + p_{dx} = p_x + \frac{\rho_x \cdot c_x^2}{2} \quad p_{cy} = p_y + p_{dy} = p_y + \frac{\rho_y \cdot c_y^2}{2} \quad (1)$$

gdzie: p_x, p_y - ciśnienie statyczne;
 p_{dx}, p_{dy} - ciśnienie dynamiczne;
 ρ_x, ρ_y - gęstość gazu;
 c_x, c_y - prędkość średnia gazu.



Rys. 3. Rozkład ciśnień w rurociągu ssawnym i tłocznym wentylatora.

□

2.2. Wielkości charakteryzujące pracę wentylatorów

- **Wydajność masowa, strumień masy m** - masa czynnika przepływającego w jednostce czasu przez płaszczyznę wlotu wentylatora ssącego lub ssąco-tłoczącego lub przez płaszczyznę wylotu wentylatora tłoczącego, kg/s.
- **Wydajność objętościowa, strumień objętości V** - objętość czynnika przepływającego w jednostce czasu przez wentylator, określona ilorazem wydajności masowej i gęstości czynnika w płaszczyźnie wlotu wentylatora ssącego lub ssąco-tłoczącego lub płaszczyźnie wylotu wentylatora tłoczącego, m³/s.
- **Przyrost ciśnienia statycznego, spiętrzenie statyczne Δp** - różnica ciśnienia statycznego w płaszczyźnie wlotu i wylotu wentylatora, Pa.
- **Przyrost ciśnienia dynamicznego, spiętrzenie dynamiczne Δp_d** - różnica ciśnienia dynamicznego w płaszczyźnie wlotu i wylotu wentylatora, Pa.
- **Przyrost ciśnienia całkowitego, spiętrzenie całkowite Δp_c** - suma przyrostu ciśnienia statycznego i dynamicznego wentylatora, Pa.
- **Moc pobierana** przez maszynę **P** - moc na sprzęgle (wale) wentylatora, W.
- **Moc użyteczna P_u** - przyrost użytecznej postaci energii czynnika przenieszonego w jednostce czasu, W. W przypadku gdy przetłaczany czynnik traktuje się jako gaz nieściśliwy, a więc jego gęstość przyjmuje jako stałą, moc użyteczną można obliczyć ze wzoru:

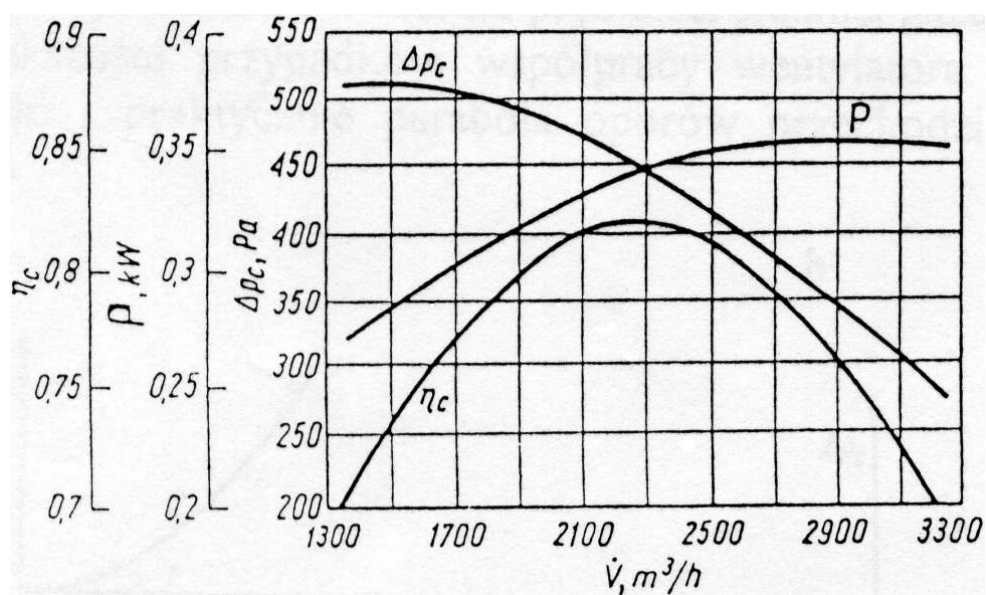
$$P_u = V \cdot \Delta p_c \quad (2)$$

- **Prędkość obrotowa wentylatora n** - liczba obrotów wirnika w jednostce czasu, obr/s.
- **Sprawność całkowita wentylatora:**

$$\eta_c = \frac{P_u}{P} \quad (3)$$

2.3. Charakterystyki wentylatorów

Charakterystyka wentylatora $\Delta p_c = f(V)$ jest to zależność przyrostu ciśnienia całkowitego w zależności od wydajności V przy stałej prędkości obrotowej. Charakterystykę można podzielić na dwa zakresy: *stateczny* i *niestateczny*. Stateczny zakres pracy jest wtedy, gdy wraz ze zmniejszaniem się wydajności wentylatora wzrasta ciśnienie całkowite. Gdy ciśnienie maleje - zakres pracy jest niestateczny; jest to niewskazane ze względu na niską sprawność wentylatora, skłonność do powstawania pulsacji przepływającego czynnika, jak również silnych drgań elementów wentylatora zagrażających ich wytrzymałości. Charakterystyki wentylatorów najczęściej przedstawia się w sposób graficzny - na wykresach. Na wykresie takim nanosi się zwykle jeszcze dwie zależności: mocy pobieranej przez wentylator w zależności od wydajności $P = f(V)$ oraz sprawności całkowitej w funkcji wydajności $\eta_c = f(V)$. Na rys. 4 przedstawiono przykład charakterystyki wentylatora.



Rys. 4. Charakterystyka wentylatora.

Charakterystyki wentylatorów przedstawiane są zawsze dla ustalonej umownej gęstości powietrza $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (tzw. warunki normalne: ciśnienie 101,3 kPa, temperatura 293,15 K). Jeżeli zachodzi konieczność przeliczenia charakterystyki na inne warunki, można korzystać ze wzorów przybliżonych wynikających z teorii podobieństwa:

$$V = V_0 \frac{n}{n_0} \quad (4)$$

$$m = m_0 \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{n}{n_0} \quad (5)$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{c0} \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \quad (6)$$

$$P = P_0 \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (7)$$

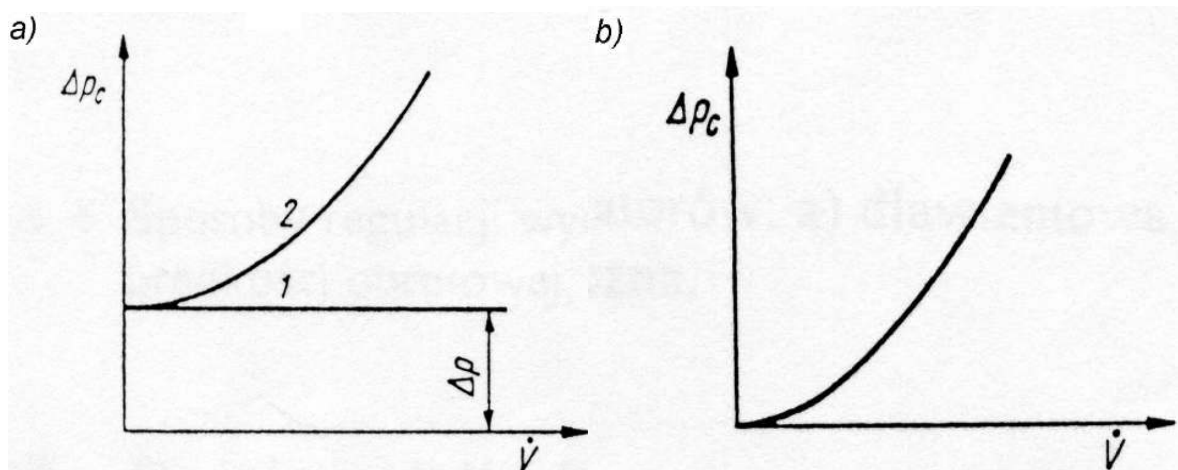
We wzorach tych wielkości z indeksem „0” odnoszą się do umownej gęstości i znamionowych obrotów.

2.4. Charakterystyka sieci (oporów)

Charakterystyka sieci, $\Delta p_r = f(V)$ nazywana także *charakterystyką oporów rurociągu* jest to zależność określająca całkowity spadek ciśnienia na skutek pokonywania oporów rurociągu w zależności od natężenia przepływu czynnika przez rurociąg. W związku z tym musi być wytworzone odpowiednie wysokie ciśnienie, które będzie zużytkowane na:

- pokonanie różnicy ciśnień między przestrzenią, do której gaz jest tłoczony a przestrzenią, z której jest zasysany, tzn. oporu hydrostatycznego Δp ;
- pokonanie oporów przepływu - można przyjąć, że opory te zmieniają się wprost proporcjonalnie do kwadratu prędkości średniej gazu.

W większości przypadków współpracy wentylatora z siecią opór hydrostatyczny jest niewielki i praktycznie parabola oporów przechodzi wówczas przez początek układu (rys. 5).



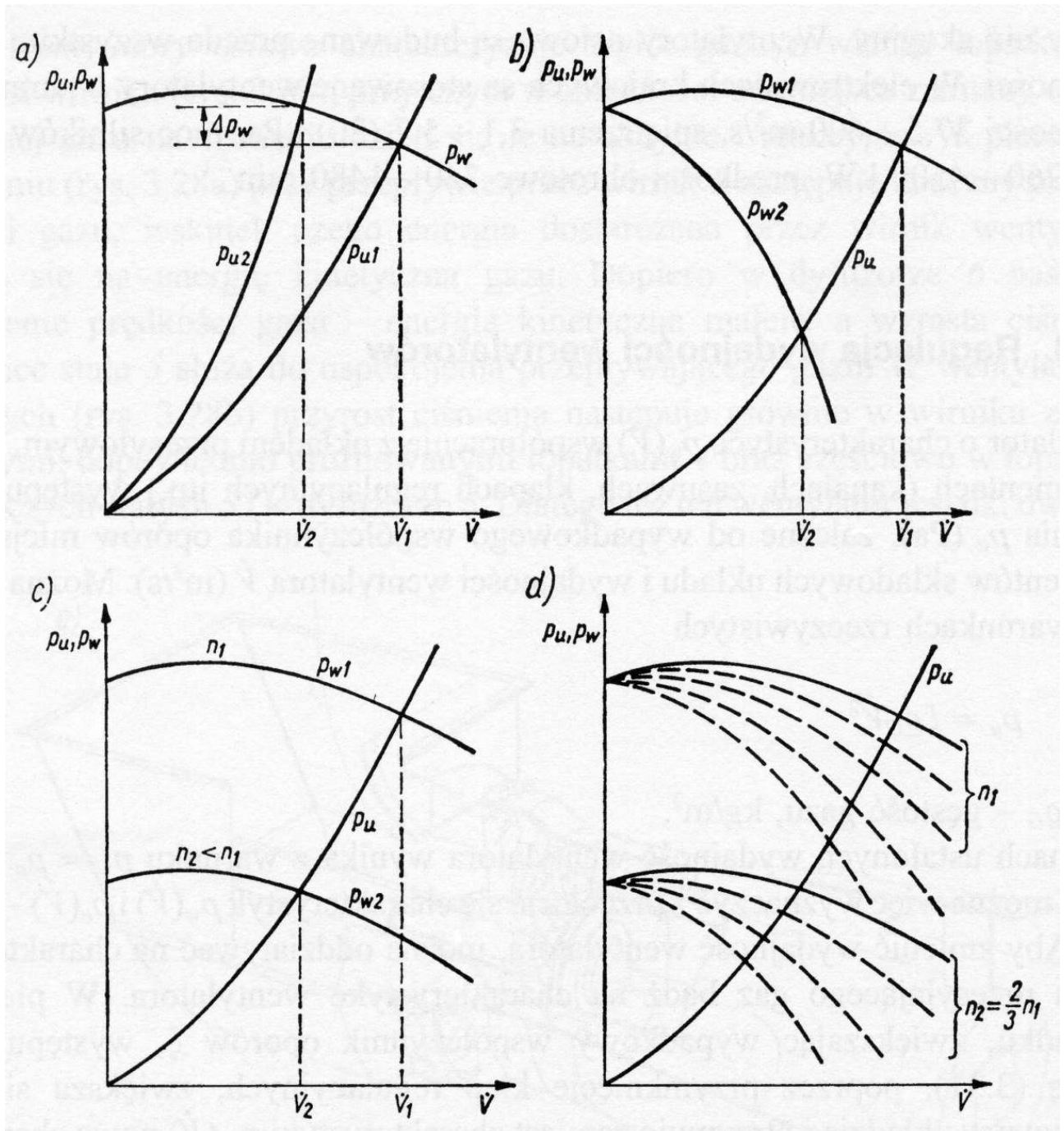
Rys. 5. Charakterystyki oporów rurociągu: a) z oporem hydrostatycznym, b) bez oporu hydrostatycznego.

2.5. Współpraca wentylatora z siecią. Regulacja wydajności.

Jeżeli na charakterystykę wentylatora zostanie naniesiona charakterystyka sieci, przecięcie się tych krzywych wyznaczy punkt pracy wentylatora. Określa on ilość przepływającego czynnika i ciśnienie całkowite wytworzone przez wentylator. Regulację wydajności wentylatora przeprowadza się poprzez zmianę jego punktu pracy. Można to osiągnąć trzema sposobami:

- **Zmiana charakterystyki oporów poprzez dławienie przepływu w rurociągu.** Jest to najprostszy sposób regulacji wydajności, ale zarazem nieekonomiczny, ponieważ charakterystyka wentylatora pozostaje stała - wprowadzony zostaje dodatkowy opór do pokonania przez wentylator. Ten sposób regulacji ilustruje rys. 6.a.
- **Regulacja za pomocą zmianę prędkości obrotowej wirnika.** Związana jest z zastosowaniem napędu o zmiennej prędkości obrotowej (np. sprzęgło hydrokinetyczne, silnik prądu stałego, silnik indukcyjny zasilany poprzez przetwornicę częstotliwości). Jest to najbardziej ekonomiczny sposób regulacji, można go stosować do każdego typu wentylatora bez potrzeby zmiany jego konstrukcji. Podczas tego typu regulacji ulegają zmianie charakterystyki wentylatora (rys. 6.b.) zgodnie z prawami podobieństwa opisanymi wzorami (4)-(7)
- **Regulacja aerodynamiczna.** Polega na zmianie kształtu lub położenia elementów konstrukcyjnych wentylatora. Mogą to być tzw. kierownice wstępne - nieruchome łopatki połączone z obudową wentylatora. Poprzez zmianę ustawienia kąta tych łopatek zmienia się kinematyka przepływu czynnika. Koszt wykonania takiego mechanizmu jest nieduży, jednak zakres regulacji niewielki. Innym sposobem regulacji aerodynamicznej jest nastawianie (podczas

ruchu) łopatek wirnika. Zasada działania jest podobna jak w przypadku kierownic wstępnych, ale koszt mechanizmów jest o wiele większy. Regulacja ta jest bardzo czuła i można ją stosować w szerokim zakresie zmian wydajności. W obydwu przypadkach regulacji aerodynamicznej następuje zmiana charakterystyk wentylatora (rys. 6.c.).



Rys. 6. Sposoby regulacji wydajności wentylatorów: a) dławieniowa przez zmianę charakterystyki oporów sieci, b) aerodynamiczna przez zmianę charakterystyki wentylatora, c) przez zmianę prędkości obrotowej wentylatora, d) wentylator napędzany silnikiem dwubiegowym oraz regulacja aerodynamiczna.

2.6. Pomiar wielkości charakteryzujących pracę wentylatora.

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi pracę wentylatora jest natężenie przepływu (wydajność) i ciśnienie całkowite czynnika przepływającego.

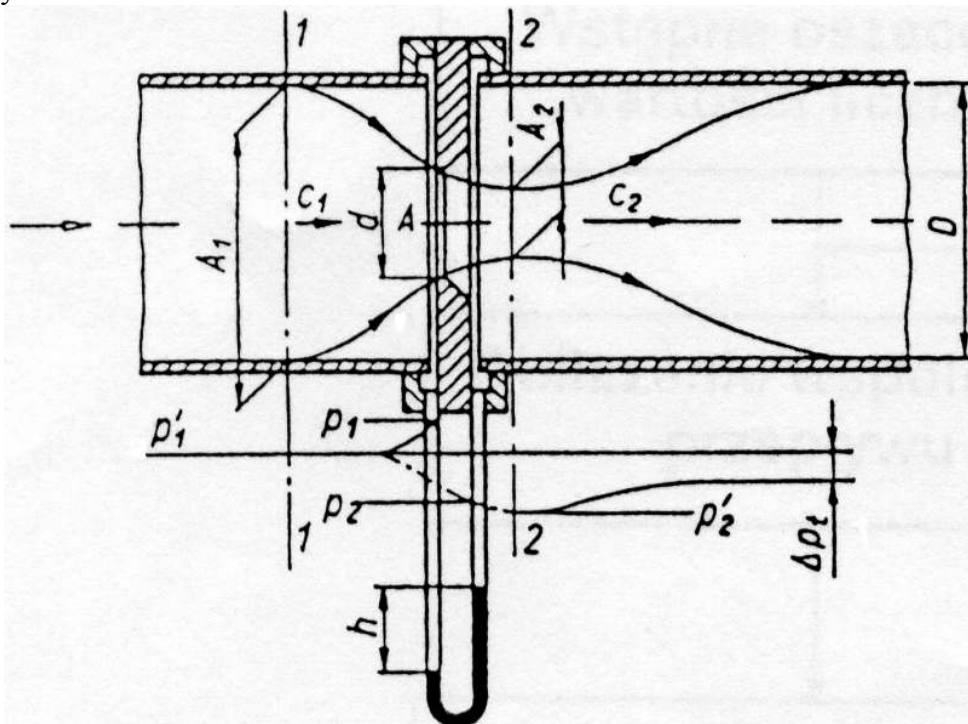
Wydajność wentylatora można określić przez pomiar:

- natężenia przepływu przy użyciu zwężki,
- prędkości przy użyciu sondy Prandtla,
- prędkości przy użyciu anemometru,
- natężenia przepływu przy użyciu gazomierza.

W warunkach przemysłowych najczęściej używa się zwężek lub sond Prandtla. Poniżej omówione zostały zasady pomiaru tymi przyrządami.

2.6.1. Wyznaczanie wydajności przy użyciu zwężki.

Pomiar za pomocą zwężek (kryz) jest najbardziej rozpowszechnioną i najtańszą metodą pomiaru opartą na zmianie energii potencjalnej ciśnienia statycznego płynu przepływającego przez miejscowe zwężenie przewodu. Przewężenie przekroju w postaci kryzy wstawionej w taki sposób, aby oś jej otworu pokrywała się z osią przekroju przewodu (rys. 7) wywołuje wzrost prędkości strumienia płynu z prędkości c_1 w przekroju 1-1 do prędkości c_2 w przekroju 2-2. Ciśnienie płynu wzrasta nieco przed kryzą i zmniejsza się do minimum za kryzą w najwęższym przekroju strumienia (strugi). Strumień przepływającego płynu jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego ze spadku ciśnienia płynu mierzonego na kryzie. Wielkością charakterystyczną kryzy jest tzw. przewężenie, zdefiniowane jako stosunek średnicy najmniejszego przekroju zwężki do średnicy rury.



Rys. 7. Przepływ przez zwężkę (kryzę).

Konstrukcja, wymiary kryz i ich dobór oraz metodyka obliczania przepływu przy pomocy zwężek objęte są normą PN-93/M-53950/01. Zgodnie z normą strumień masy lub objętości przepływającego przez kryzę płynu należy obliczać z następujących zależności:

$$m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \quad [\text{kg/s}] \quad (8)$$

$$V = \frac{m}{\rho_1} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (9)$$

gdzie: β - przewężenie kryzy:

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

d - średnica otworu kryzy w warunkach roboczych, m;

D - średnica wewnętrzna rurociągu, m;

Δp - spadek ciśnienia na zwężce, Pa;

ρ_1 - gęstość właściwa czynnika przed zwężką, kg/m^3 ;

C - współczynnik przepływu, określony jako:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,1840 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,75}$$

Re_D - liczba Reynoldsa określająca charakter przepływu:

$$\text{Re}_D = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D}$$

μ_1 - lepkość dynamiczna przepływającego płynu, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

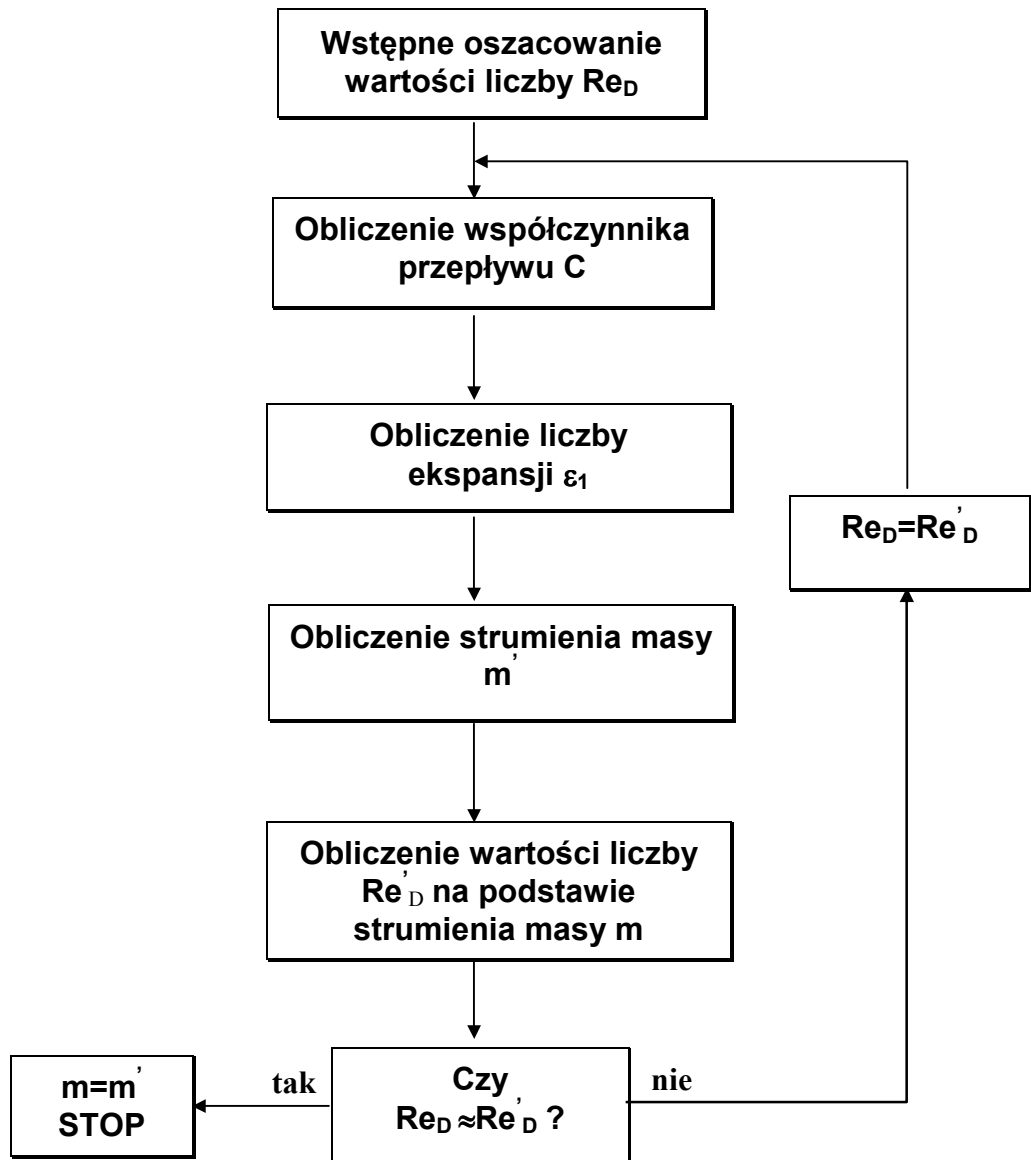
ε_1 - liczba ekspansji płynu przed kryzą:

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

κ - wykładnik izentropy dla przepływającego płynu;

p_1 - ciśnienie bezwzględne płynu przed kryzą, Pa

Z powyższych zależności wynika, że wyznaczenie strumienia przepływu dla konkretnej wartości pomierzonej różnicy ciśnień na kryzie, wymiarów konstrukcyjnych kryzy i rurociągu oraz rzeczywistych warunków termodynamicznych płynu - ciśnienia bezwzględnego i temperatury jest zagadnieniem iteracyjnym. Oznacza to, że pierwsze obliczenie należy wykonać dla przyjętej z góry (założonej) wartości liczby Reynoldsa (np. $\text{Re}_D=10^6$). Uproszczony algorytm obliczeń iteracyjnych jest następujący:



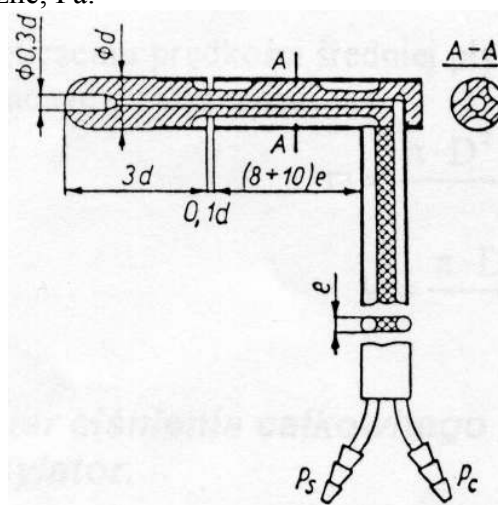
Kryterium zakończenia obliczeń iteracyjnych jest taka wartość liczby Re_D , która jest równa (z założoną dokładnością) liczbie Re'_D obliczonej w poprzednim kroku. W praktyce warunkiem zakończenia obliczeń jest powtórzenie się w kolejnym kroku iteracji takiej samej co do liczby cyfr znaczących (np. 4 cyfry znaczące) wartości strumienia masy m . Zależność współczynnika przepływu C od liczby Re_D dla konkretnej wartości β jest dosyć słaba, dlatego też zwykle wystarczające jest wykonanie 2 lub 3 pętli obliczeń iteracyjnych.

2.6.2. Wyznaczanie wydajności przy użyciu sondy Prandtla.

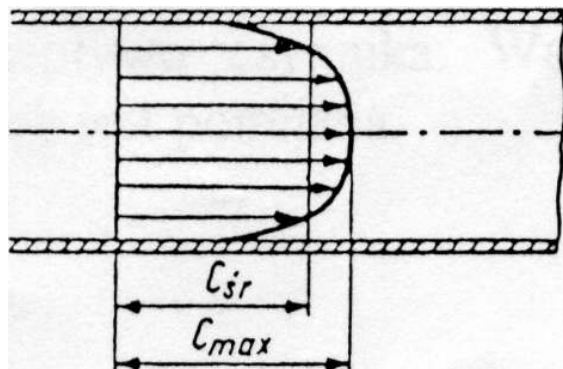
Za pomocą sondy (rurki) Prandtla (rys. 8) można zmierzyć ciśnienie całkowite oraz ciśnienie statyczne płynu przepływającego w rurociągu. Poprzez odpowiednie połączenie końcówek rurki z manometrem można określić ciśnienie dynamiczne. Natężenie przepływu jest wyznaczane pośrednio na podstawie znanej prędkości średniej płynu w rurociągu. Graficzny obraz rozkładu prędkości w rurze pokazany jest na rys. 9. Pomiar przy użyciu pojedynczej sondy Prandtla polega na umieszczeniu jej w osi rury - zatem można pomierzyć ciśnienie dynamiczne odpowiadające prędkości maksymalnej płynu. Prędkość odpowiadającą pomierzonemu ciśnieniu dynamicznemu oblicza się ze wzoru:

$$c = \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho}}, \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

gdzie: ρ - gęstość gazu w przekroju pomiarowym, kg/m^3 ;
 p_d - ciśnienie dynamiczne, Pa.



Rys. 8. Rurka Prandtla - zależności wymiarowe.



Rys. 9. Rozkład prędkości na średnicy rurociągu.

Prędkość średnia może być w przybliżony sposób wyznaczona na podstawie prędkości maksymalnej z zależności:

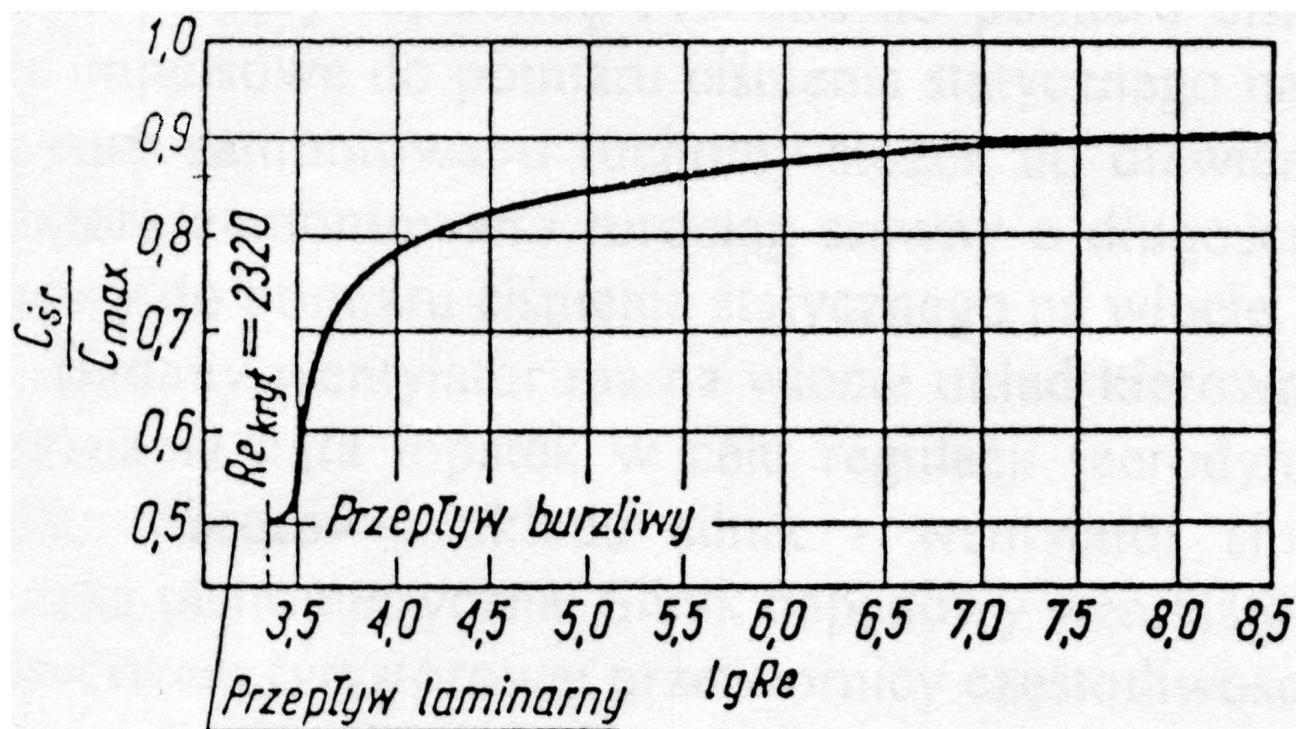
$$\frac{c_{sr}}{c_{max}} = f(\text{Re}) \quad (11)$$

gdzie: Re - liczba Reynoldsa określona jako: $\text{Re} = c_{max} \cdot D \cdot \rho / \mu$;

D - wewnętrzna średnica rurociągu, m;

μ - dynamiczny współczynnik lepkości płynu, Pa·s.

Zależność funkcyjna (11) najczęściej podawana jest w formie wykresu - rys. 10.



Rys.10. Zależność c_{sr}/c_{max} od liczby Re.

Po obliczeniu prędkości średniej płynu (gazu) w rurociągu natężenie przepływu można wyznaczyć z zależności:

$$m = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot c_{sr} \cdot \rho}{4}, \quad [\text{kg/s}] \quad (12)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot c_{sr}}{4}, \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (13)$$

2.6.3. Pomiar ciśnienia całkowitego czynnika przepływającego przez wentylator.

Ciśnienie całkowite można zmierzyć za pomocą sondy Prandtla. Jeżeli mierzy się osobno ciśnienie statyczne i dynamiczne, to wówczas ciśnienie statyczne najkorzystniej zmierzyć na ścianie rurociągu pomiarowego. W tym celu należy wykonać otwory pomiarowe o średnicy 1÷1,5 mm prostopadle do powierzchni ścianki. Przekroje pomiarowe przed i za wentylatorem bywają umiejscowione w pewnej odległości od przekrojów wlotowych i wylotowych wentylatora, dlatego na tych odcinkach występują straty ciśnienia podczas przepływu czynnika. Wartość tych strat jest stosunkowo mała i najczęściej w obliczeniach jest pomijana.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Na stanowisku zamontowany został wentylator promieniowy, napędzany trójfazowym silnikiem indukcyjnym klatkowym. Do wylotu wentylatora dołączony został rurociąg pomiarowy o długości ok. 4,5 m, w którym zamontowano kryzę do pomiaru natężenia przepływu, sondę Prandtla do pomiaru ciśnienia dynamicznego czynnika oraz otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia statycznego na początku i na końcu rurociągu. Na końcu rury zamontowano ruchomy stożek do dławienia przepływu. Na króćcu ssawnym wentylatora zamontowano rurociąg ssawny o długości 0,8 m w którym wykonano otwór impulsowy do pomiaru ciśnienia statycznego na wlocie.

Badany wentylator ma na wlocie układ kierownic wstępnych wraz z mechanizmem do ustawiania kąta łopatek w celu regulacji (aerodynamicznej) wydajności. Do pomiaru prędkości obrotowej układu silnik - wentylator służy zamontowana na wale silnika prądniczka tachometryczna. Silnik napędowy wentylatora zasilany jest z sieci trójfazowej za pośrednictwem tyrystorowej przetwornicy częstotliwości, dzięki czemu możliwa jest płynna zmiana prędkości obrotowej wentylatora. Pomiar ciśnienia w układzie realizowane są przy pomocy manometrów cieczowych wyskalowanych w mm H₂O. Oznaczenia manometrów są następujące:

h_0 - ciśnienie odniesienia (atmosferyczne);

h_1 - ciśnienie statyczne na końcu rurociągu (otwór impulsowy 1);

h_2 - ciśnienie przed kryzą pomiarową;

h_3 - ciśnienie za kryzą pomiarową;

h_4 - ciśnienie całkowite z sondy Prandtla;

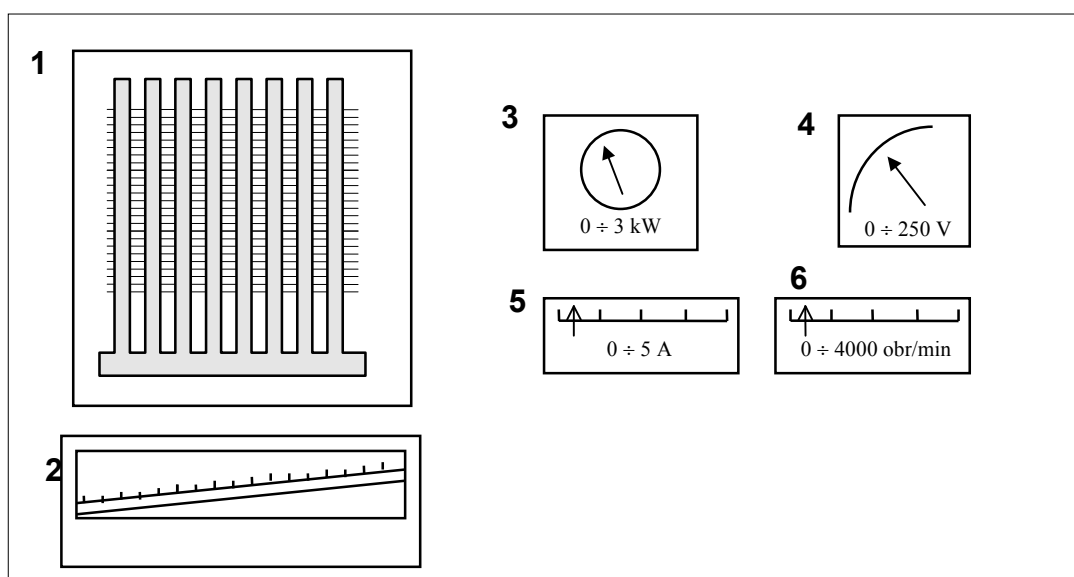
h_5 - ciśnienie statyczne z sondy Prandtla;

h_6 - ciśnienie statyczne na tłoczeniu (otwór impulsowy 2);

h_7 - ciśnienie statyczne na ssaniu (otwór impulsowy 3);

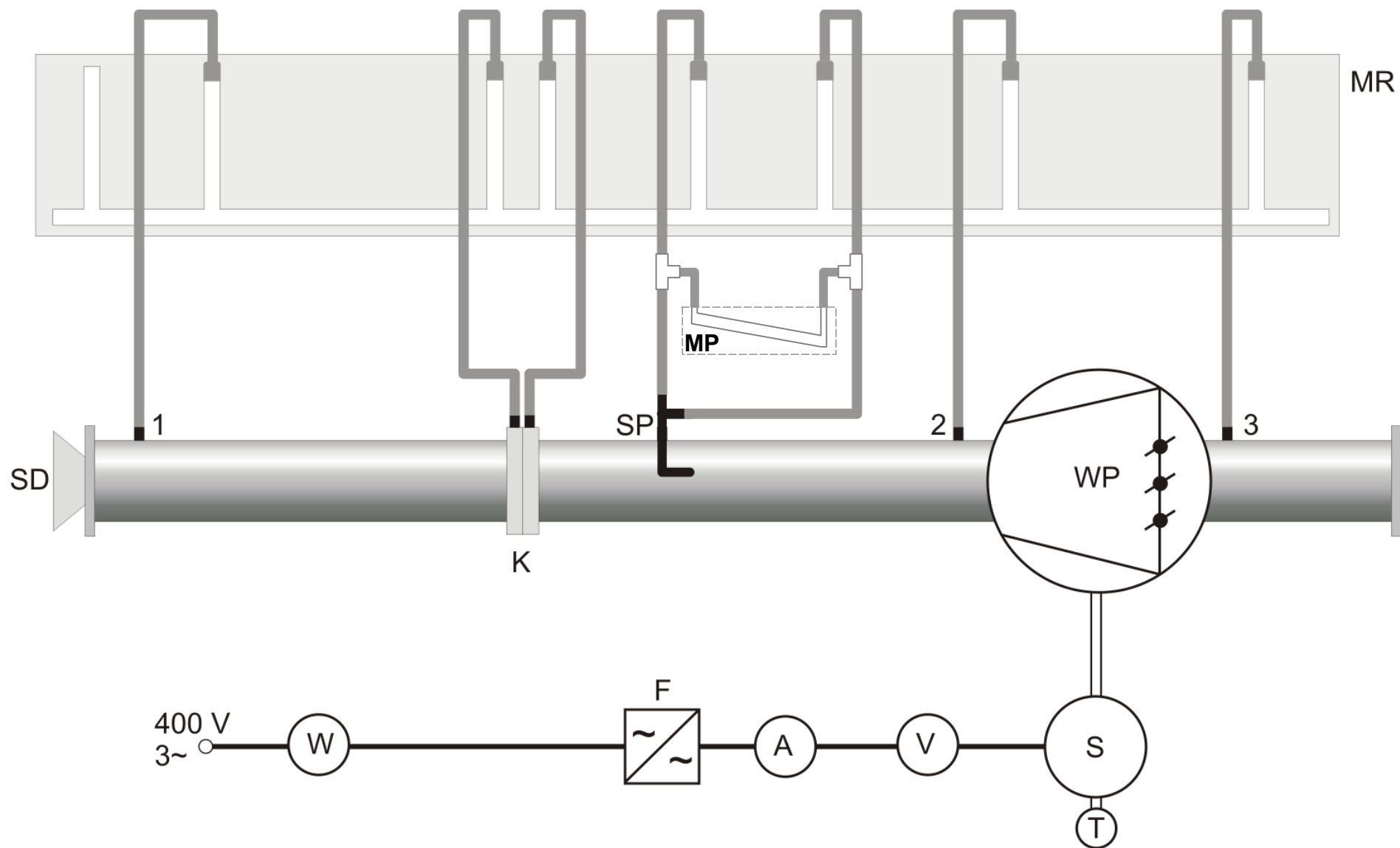
p_d - ciśnienie dynamiczne z sondy Prandtla (manometr z rurką pochyłą).

Schemat rozmieszczenia przyrządów pomiarowych przedstawiony jest na rys. 11. Na rys. 12 przedstawiono schemat ideowy stanowiska wraz z układem zasilania silnika napędowego wentylatora.



Rys. 11. Rozmieszczenie przyrządów pomiarowych na tablicy przy stanowisku.

1 - manometr cieczowy z rurkami pionowymi; 2 - manometr cieczowy z rurką pochyłą; 3 - watomierz do pomiaru mocy pobieranej przez silnik; 4 - woltomierz do pomiaru napięcia fazowego; 5 - amperomierz do pomiaru prądu fazowego silnika; 6 - obrotomierz.



Rys.12. Schemat ideowy stanowiska do badania wentylatora.

MR - manometr cieczowy z rurkami pionowymi; MP - manometr cieczowy z rurką pochylą; A - amperomierz; V - woltomierz; W - watomierz; S - silnik indukcyjny klatkowy; WP - wentylator promieniowy; F - przetwornica częstotliwości (falownik); T - prądniczka tachometryczna; K - kryza pomiarowa; SP - sonda Prandtla; SD - stożek dławiący; 1, 2, 3 - otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia statycznego;

Pomiary elektryczne na stanowisku polegają na pomiarze mocy, prądu i napięcia silnika napędowego. Przyrządy pomiarowe zostały zamontowane pomiędzy przetwornicą częstotliwości a silnikiem. Ponieważ prąd i napięcie za przetwornicą są odkształcone (szczególnie przy niskich częstotliwościach), pomiary te mogą być obciążone dużymi błędami. Dlatego też pomiar mocy elektrycznej pobieranej przez silnik należy przeprowadzić przed przetwornicą (watomierz W1), przyjmując że sprawność falownika jest w przybliżeniu stała w całym zakresie obciążeń.

4. PROGRAM ĆWICZENIA

4.1. Uwagi ogólne

Badanie wentylatora promieniowego obejmuje wyznaczenie jego charakterystyk przy różnych sposobach regulacji wydajności oraz wyznaczenie charakterystyk oporów rurociągu pomiarowego przy regulacji dławieniowej. Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów należy:

- zlokalizować poszczególne przyrządy pomiarowe;
- sprawdzić połączenia przewodów ciśnieniowych doprowadzających impulsy pomiarowe do manometrów;
- sprawdzić czy sonda Prandtla jest prawidłowo umieszczona w rurze;
- sprawdzić czy w manometrach cieczowych znajduje się prawidłowa ilość cieczy - w przypadku wyparowania należy dolać odpowiedniej cieczy;
- wysunąć stożek dławiący na wylocie rurociągu tłocznego oraz ustawić łopatki kierownic wstępnych na 90° (pełne otwarcie);
- spisać z tabliczek znamionowych wentylatora i silnika oznaczenia typu i podstawowe parametry techniczne.

Układ należy podłączyć do sieci pod kontrolą prowadzącego ćwiczenie. Po załączeniu napięcia należy włączyć przetwornicę i sprawdzić, czy wentylator obraca się w prawidłową stronę. Przy pomocy potencjometru do regulacji częstotliwości napięcia wyjściowego stopniowo zwiększać prędkość obrotową wentylatora, aż do wartości znamionowej.

Wykonanie ćwiczenia polega na pomiarze parametrów pracy układu silnik - wentylator dla zadanych sposobów regulacji wydajności.

Pomiary ciśnień w ćwiczeniu dokonywane są przy użyciu manometru wielorurkowego wypełnionego wodą. Odpowiednie ciśnienie zatem należy obliczać jako różnicę poziomów wody w odpowiedniej rurce i rurce odniesienia:

$$p_i = h_0 - h_i \quad [\text{mmH}_2\text{O}]$$

Manometr z rurką pochyłą mierzy ciśnienie dynamiczne, będące różnicą ciśnienia całkowitego i statycznego z sondy Prandtla. Manometr ten jest wyskalowany w mm H₂O i daje poprawne wyniki przy zastosowaniu odpowiedniej cieczy manometrycznej (tzw. ciecz zielona). W przypadku zastosowania innej cieczy manometrycznej (o innym ciężarze właściwym) należy zastosować odpowiedni współczynnik przeliczeniowy.

Uwaga ! Podczas wykonywania pomiarów nie należy dopuścić do przeciążenia silnika (prąd znamionowy $I = 4,8 \text{ A}$). Przeciążenie takie występuje zarówno przy zbyt wysokich, jak i przy zbyt niskich obrotach silnika.

4.2. Regulacja wydajności przez zmianę prędkości obrotowej przy różnych stopniach zdławienia ($D\lambda$) przepływu w rurociągu tłocznym.

Pomiary należy wykonać zgodnie z tabelą nr 1 dla wybranych prędkości obrotowych podanych przez prowadzącego ćwiczenie. Należy zwracać szczególną uwagę na dokładne ustawienie prędkości obrotowej wentylatora. Każdą grupę pomiarów (dla różnych stopni zdławienia) należy rozpoczynać dla maksymalnej prędkości obrotowej.

4.3. Regulacja wydajności przez dławienie przepływu w rurociągu tłocznym przy różnym kącie ustawienia łopatek kierownicy wstępnej (α).

Pomiary należy wykonać zgodnie z tabelą nr 2 utrzymując znamionową prędkość obrotową wentylatora. Należy zwracać szczególną uwagę na dokładne ustawianie stopnia zdławienia rurociągu tłoczego.

5. WYKONANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- **Opis wentylatora i silnika napędowego**

- wg. danych z tabliczek znamionowych.

- **Tabele pomiarów i obliczeń.**

Obliczenia należy wykonywać po przeliczeniu pomierzonych wartości na jednostki zgodne z układem SI. Objasnienia poszczególnych wielkości występujących we wzorach obliczeniowych przedstawia poniższa tabela.

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wzór przeliczeniowy
Ciśnienie statyczne na tłoczeniu	p_{s2}	Pa	$p_{s2} = (h_0 - h_6) \cdot 9,81$
Ciśnienie statyczne na ssaniu	p_{s1}	Pa	$p_{s1} = (h_0 - h_7) \cdot 9,81$
Ciśnienie dynamiczne na tłoczeniu	p_{d2}	Pa	$p_{d2} = p_d \cdot k \cdot 9,81$ (k - wspl. przeliczeniowy dla innej cieczy manometrycznej)
Ciśnienie statyczne na końcu rurociągu	p_{s3}	Pa	$p_{s3} = (h_0 - h_1) \cdot 9,81$
Ciśnienie całkowite na tłoczeniu	p_{c2}	Pa	$p_{c2} = p_{s2} + p_{d2}$
Spadek ciśnienia na kryzie	Δp_K	Pa	$\Delta p_K = (h_2 - h_3) \cdot 9,81$

Pozostałe wzory obliczeniowe podane zostały poniżej.

Obliczenie całkowitego przyrostu ciśnienia w wentylatorze:

$$\Delta p_c = p_{c2} - p_{c1}, \quad [\text{Pa}]$$

Ponieważ ciśnienie dynamiczne na wlocie wentylatora jest pomijalnie małe, należy przyjąć, że ciśnienie całkowite na wlocie jest równe ciśnieniu statycznemu: $p_{c1} = p_{s1}$, czyli:

$$\Delta p_c = p_{c2} - p_{s1} = |p_{c2}| + |p_{s1}|, \quad [\text{Pa}]$$

Obliczenie strumienia objętości przepływającego powietrza na podstawie pomiaru spadku ciśnienia na kryzie.

Obliczenia należy przeprowadzić zgodnie z PN-93/M-53950/01. Warunki pomiaru są następujące (parametry gazu dla obszaru przed kryzą):

- temperatura powietrza: $t_1 = 293 \text{ K}$;
- ciśnienie bezwzględne powietrza równe ciśnieniu normalnemu: $p_1 = p_n = 101,3 \text{ kPa}$;
- gęstość rzeczywista powietrza: $\rho_1 = 1,20461 \text{ kg/m}^3$;
- lepkość dynamiczna rzeczywista powietrza: $\mu_1 = 18,0475 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;
- wykładnik izentropy dla powietrza $\kappa = 1,4$;
- średnica otworu kryzy: $d = 0,150 \text{ m}$;
- średnica rury: $D = 0,235 \text{ m}$;
- pomiar spadku ciśnienia na kryzie jest tzw. pomiarem przytarczowym.

Obliczenia należy wykonać zgodnie z algorytmem podanym we wstępie (str. 9). Do wyznaczania współczynnika przepływu, liczby ekspansji i strumienia przepływu można posłużyć się następującymi zależnościami:

$$C = 0,602984 + \frac{29,85083}{\text{Re}_D^{0,75}}$$

$$\varepsilon_1 = 1 - 3,30065 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p_K$$

$$V_K = 0,02493 \cdot C \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{\Delta p_K}, \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$\text{Re}_D = 361636 \cdot V_K$$

Obliczenie strumienia objętości przepływającego powietrza na podstawie pomiaru ciśnienia dynamicznego za pomocą sondy Prandtla.

Obliczenia V_P należy przeprowadzić zgodnie z opisem podanym we wstępie (str. 10). Do wyznaczenia stosunku $c_{sr}/c_{\max}(\text{Re})$ służy diagram przedstawiony na rys. 10.

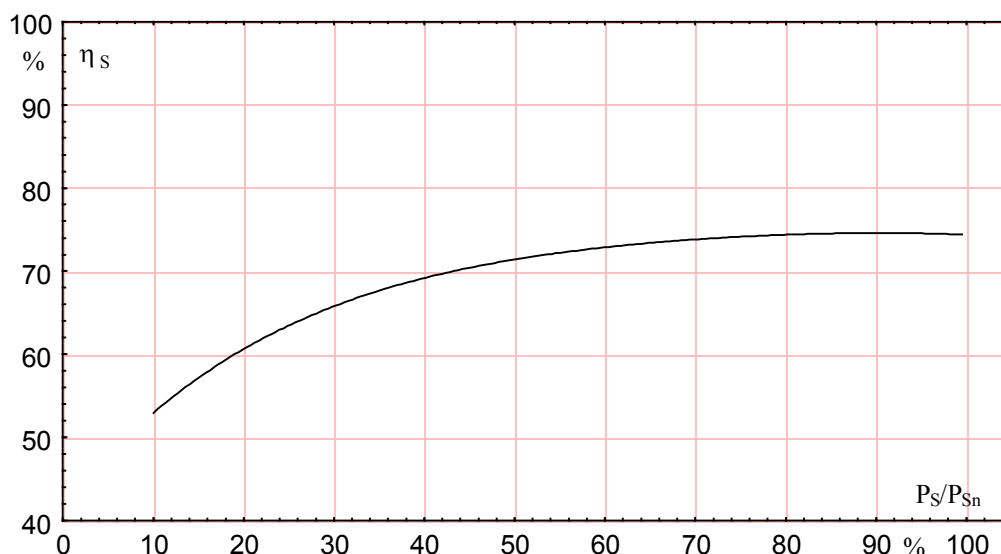
Obliczenie mocy na wale wentylatora.

Moc na wale wentylatora należy wyznaczyć z zależności:

$$P_w = P_s \cdot \eta_s \cdot \eta_F, \quad [\text{kW}]$$

Sprawność falownika η_F należy przyjąć za stałą w całym zakresie obciążeń i równą 0,90.

Sprawność silnika elektrycznego η_s jest zależna od obciążenia silnika i można ją wyznaczyć z poniższego wykresu:



Obliczenie mocy użytecznej wentylatora.

Moc użyteczna wentylatora określona jest jako iloczyn przyrostu ciśnienia całkowitego i strumienia objętości:

$$P_u = \frac{V_K \cdot \Delta p_c}{1000}, \quad [\text{kW}].$$

Obliczenie sprawności wentylatora.

Sprawność wentylatora określona jest jako iloraz mocy użytecznej do mocy na wale wentylatora:

$$\eta_w = \frac{P_u}{P_w}$$

• **Charakterystyki sporządzone na podstawie tabel pomiarów.**

Charakterystyki można wykreślać „ręcznie” na papierze milimetrowym lub wykorzystać do tego celu program komputerowy i drukarkę. Do obliczeń i sporządzania wykresów należy przyjmować strumień objętości V_K wyznaczony na podstawie pomiaru spadku ciśnienia na kryzie.

Charakterystyki wentylatora typu $\Delta p_c = f(V)|_{n=const}$ dla różnych prędkości obrotowych.

Charakterystyki należy wykreślić na podstawie tabeli nr 1 - dla każdej z ustawionych prędkości obrotowych. Każda z charakterystyk jest określona przez 5 punktów odpowiadających kolejnym stopniom zdławienia przepływu, np. ch-kę dla prędkości 2900 obr/min wyznaczają punkty o numerach {3, 12, 21, 30, 39}.

Charakterystyki oporów typu $\Delta p_r = f(V)$.

Podobnie jak poprzednio - charakterystyki te należy wykreślić na podstawie tabeli nr 1 - dla każdego ustawionego stopnia zdławienia przepływu. Każdą charakterystykę wyznacza 9 punktów odpowiadających różnym prędkościom obrotowym, np. ch-kę oporów przy zdławieniu 20 % dla określają punkty {10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18}.

Charakterystyki wentylatora typu $\Delta p_c = f(V)|_{\alpha=const}$ dla różnych kątów ustawienia łopatek kierownicy wstępnej.

Charakterystyki te wykreśla się na podstawie tabeli nr 2 - dla każdego ustawionego kąta α . Każdą charakterystykę wyznacza 6 punktów odpowiadających kolejnym stopniom zdławienia przepływu, np. ch-kę dla $\alpha=70^\circ$ tworzą punkty {1, 2, 3, 4, 5, 6}

Charakterystyki typu $P_w = f(V)$ dla różnych sposobów regulacji wydajności wentylatora.

Charakterystykę dla danego sposobu regulacji wykreśla się dla punktów odpowiadających normalnym (znamionowym lub początkowym) warunkom pracy przy pozostałych sposobach.

Czyli będą to następujące charakterystyki:

- dla regulacji przez zmianę prędkości obrotowej: $P_w = f(V)|_{D\ell=0, \alpha=90^\circ}$ - tabela nr 1, punkty: {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9};
- dla regulacji przez zmianę kąta ustawienia łopatek kierownicy wstępnej:
 $P_w = f(V)|_{D\ell=0, n=2900 \text{ obr/min}}$ - tabela nr 1 - punkt {3} i tabela nr 2 - punkty: {1, 7, 13, 19};
- dla regulacji przez dławienie przepływu w rurociągu tłocznym: $P_w = f(V)|_{n=2900 \text{ obr/min}, \alpha=90^\circ}$ - tabela nr 1, punkty: {3, 12, 21, 30, 39}.

Charakterystyki typu $\eta_w = f(V)$ dla różnych sposobów regulacji wydajności wentylatora.

Charakterystyki te sporządza się analogicznie do charakterystyk typu $P_w = f(V)$.

Charakterystyki regulacyjne typu $V = f(\text{wielkość regulowana})$.

Należy wykreślić następujące charakterystyki:

- $V = f(n)|_{D\ell=0, \alpha=90^\circ}$
- $V = f(D\ell)|_{n=2900 \text{ obr/min}, \alpha=90^\circ}$
- $V = f(\alpha)|_{D\ell=0, n=2900 \text{ obr/min}}$

Punkty tworzące powyższe charakterystyki są takie same jak poprzednio.

Na osobnych wykresach należy przedstawić następujące charakterystyki:

wykres A: $\Delta p_c = f(V)|_{n=const}$, $\Delta p_r = f(V)$, $\Delta p_c = f(V)|_{\alpha=const}$

wykres B: $P_w = f(V)$, $\eta_w = f(V)$

wykres C: $V = f(\text{wielkość regulowana})$.

- **Charakterystyki sporządzone na podstawie teorii podobieństwa.**

Na podstawie wzorów podobieństwa (4) i (6) na str. 5 należy obliczyć charakterystyki dla prędkości podanych w tabeli nr 1 traktując charakterystykę dla prędkości znamionowej jako bazową (należy przeliczać odpowiednie punkty pomiarowe z ch-ki $\Delta p_c = f(V)|_{n=2900 \text{ obr/min}}$). Obliczone charakterystyki należy nanieść na wykres A celem porównania ich z charakterystykami wyznaczonymi na podstawie pomiarów.

- **Uwagi i wnioski dotyczące przebiegu ćwiczenia oraz wyników pomiarów i obliczeń.**

W szczególności należy ustosunkować się do następujących zagadnień:

- ekonomika różnych sposobów regulacji wydajności badanego wentylatora;
- porównanie charakterystyk pomierzonych z obliczonymi na podstawie teorii podobieństwa oraz z charakterystykami katalogowymi (załącznik).

6. LITERATURA

1. Praca zbiorowa pod redakcją M. Mieszkowskiego: „Pomiary cieplne i energetyczne”. WNT, Warszawa 1985.
2. F. Strzelczyk: „Metody i przyrządy w pomiarach cieplno-energetycznych”. Skrypt PŁ.
3. Polska Norma: „Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwęzek pomiarowych” - PN-93/M-53950/01.

Charakterystyka wentylatora promieniowego FK-25

Gęstość przetwarzanego powietrza $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$

Characteristics for centrifugal fan FK-25

Density of forced air $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$

