

**Katedra Silników Spalinowych
i Pojazdów ATH
ZAKŁAD TERMODYNAMIKI**

Badanie wentylatora

Wiadomości podstawowe

Wentylator jest maszyną przepływową, służącą do przetłaczania i sprężania czynników gazowych. Sprężenie czynnika jest niezbędne dla pokonania oporów sieci przewodów, przez które czynnik jest przetłaczany.

Wentylatory różnych typów znajdują powszechne zastosowanie w urządzeniach wentylacji mechanicznej, klimatyzacji, odpylania w urządzeniach transportu pneumatycznego oraz jako urządzenia ciągu i podmuchu sztucznego w energetyce i hutnictwie.

Elementem przekazującym energię czynnikowi przetłaczanemu jest wirnik wentylatora. W zależności od budowy wirnika (kierunku przepływu czynnika przez wirnik) można wentylatory podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- **wentylatory odśrodkowe**
- **wentylatory osiowe**

Ponadto budowane są wentylatory, w których zasadniczy kierunek przepływu odbywa się pod pewnym kątem $\left(< \frac{\pi}{2} \right)$ do osi wirnika. Są to **wentylatory diagonalne**.

Z uwagi na wytwarzany spręż, można wentylatory podzielić na trzy grupy:

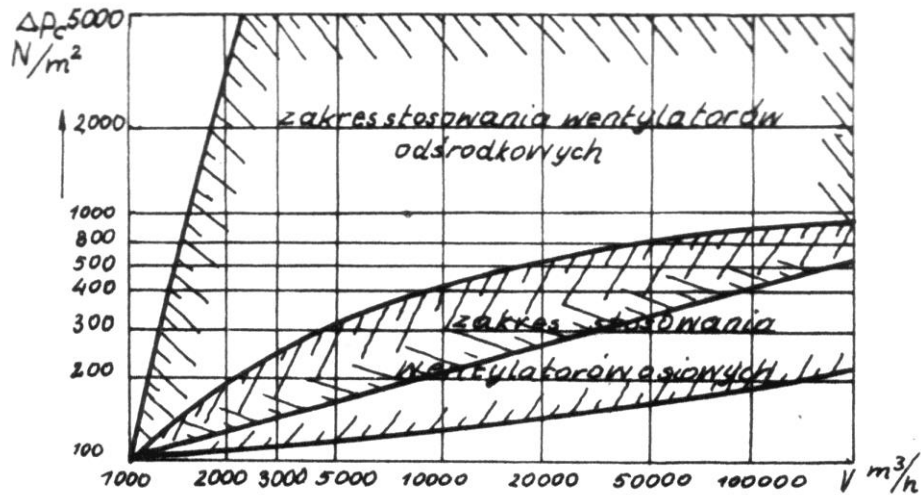
- niskoprężne $\Delta p_c < 1000 \text{ N/m}^2$
- średnioprężne $\Delta p_c < 1000 \div 3000 \text{ N/m}^2$
- wysokoprężne $\Delta p_c < 3000 \div 10000 \text{ N/m}^2$

W grupie wentylatorów odśrodkowych można rozróżnić trzy rodzaje wentylatorów różniących się budową wirnika:

- z wirnikiem o łopatkach prostych (promieniowych)
- z wirnikiem o łopatkach zgiętych wpród (w kierunku ruchu wirnika)
- z wirnikiem o łopatkach zgiętych wstecz (przeciwnie do kierunku ruchu wirnika)

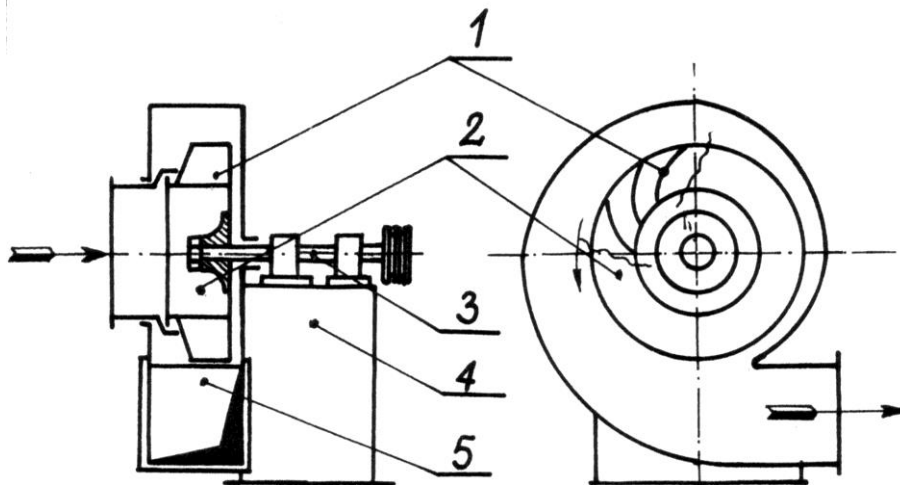
Różnice konstrukcyjne wentylatorów w decydujący sposób wpływają na ich zastosowanie. Podstawowymi wielkościami, które określają przydatność wentylatora są: wydatek oraz wytwarzany spręż.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres określający obszar właściwego zastosowania wentylatorów osiowych i odśrodkowych.



Rys.1. Przybliżone zakresy pracy wentylatorów osiowych i odśrodkowych.

W ćwiczeniu badaniom poddany jest wentylator odśrodkowy niskoprężny, którego przekrój podłużny i poprzeczny przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Schematyczny przekrój poprzeczny i podłużny wentylatora odśrodkowego

Z punktu widzenia eksploatacji wentylatorów najistotniejszymi wielkościami są:

- wydatek V [m^3/s],
- spręż Δp_c [N/m^2] oraz
- sprawność ogólna η_o .

Wydatek wentylatora jest najczęściej wyrażony jako objętość lub masa czynnika zassanego w jednostce czasu, odniesioną do warunków na ssaniu, lub warunków umownych.

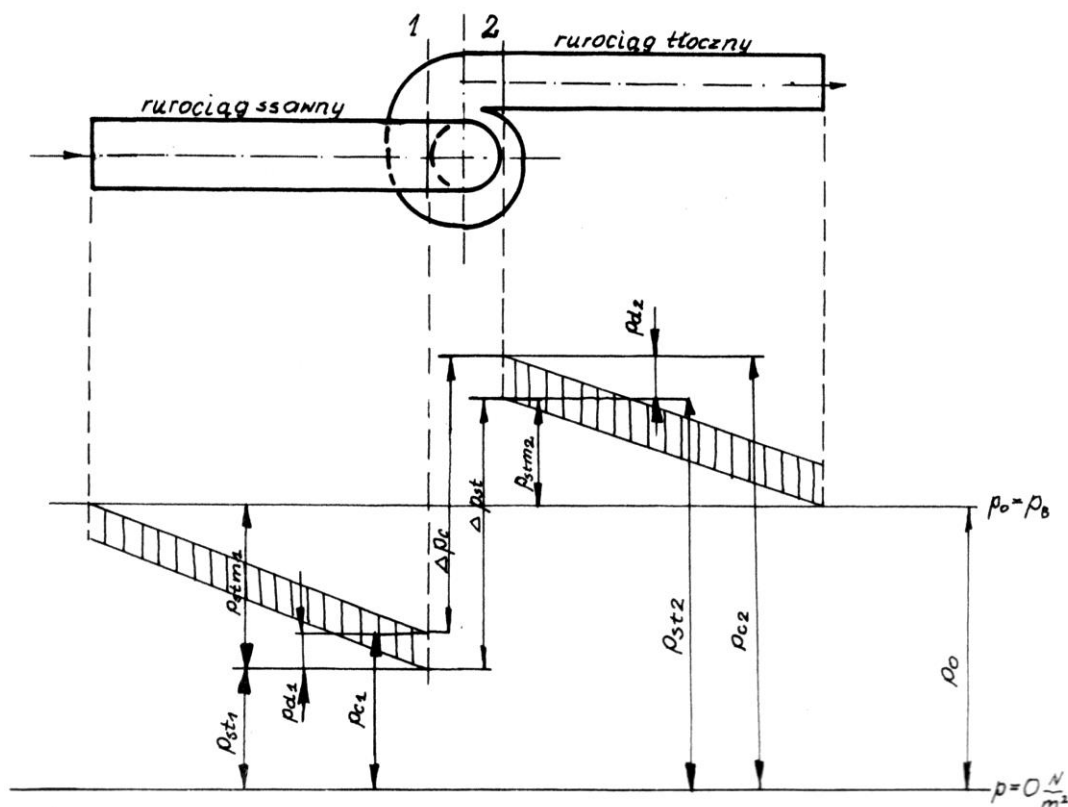
Spręż wentylatora jest to ilość energii, jaką przekazuje wirnik wentylatora przetłaczanemu czynnikowi dla pokonania oporów przepływu, oraz nadania energii kinetycznej odpowiadającej wydatkowi. Jednostkową energię przekazaną czynnikowi można określić mierząc przyrost ciśnienia całkowitego uzyskanego w wentylatorze:

$$\Delta p_c = p_{c2} - p_{c1}$$

gdzie:

- p_{c1} ciśnienie całkowite na wlocie wentylatora
- p_{c2} ciśnienie całkowite na wylocie wentylatora

Rozkład ciśnień w przewodzie ssącym i tłoczym wentylatora w przypadku zasysania i tłoczenia czynnika do otoczenia o ciśnieniu p_0 przedstawia schemat na rys.3.



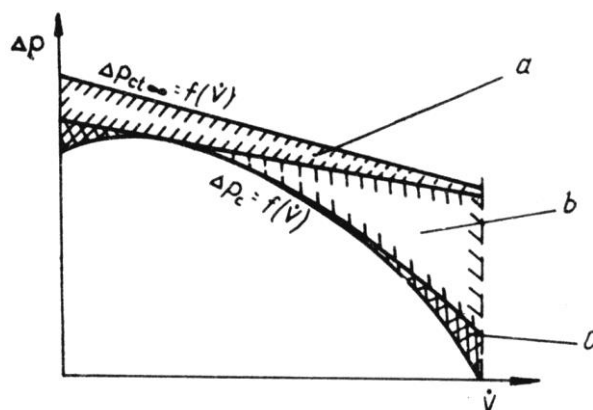
Rys. 3. Rozkład ciśnień w instalacji przewodowej.

Sprawności

Przepływ gazu rzeczywistego przez wentylator, którego wirnik posiada skończoną ilość łopatek odbywa się ze stratami energii. Straty te wynikają z tarcia cząsteczek gazu o ścianki kanałów

międzyłopatkowych i obudowy wentylatora, wirów powstałych w strumieniu gazu uderzeń strumienia o krawędzie łopatek na wlocie.

Straty te noszą nazwę **strat hydraulicznych**. W wyniku tych strat krzywa zależności $\Delta p_{ct\infty}=f(V)$ ma przebieg zmieniony. Ponieważ wielkość strat hydraulicznych zależy od kwadratu prędkości przepływu gazu, rzeczywista zależność $\Delta p_c=f(V)$ będzie zależnością drugiego stopnia. Przebieg tej krzywej przedstawia rys.4.



Rys. 4. Charakterystyka rzeczywistej maszyny sprężającej.

- (a) powierzchnia określająca straty wynikłe ze skończonej ilości łopatek wirnika (przepływ z wirami);
- (b) straty wewnętrzne wynikające z tarcia;
- (c) straty wynikające z uderzenia strumienia o krawędzie łopatek.

Wpływ strat hydraulicznych na pracę wentylatora określa współczynnik **sprawności hydraulicznej**, który definiowany jest jako stosunek rzeczywistej wysokości tłoczenia (spręża) do wysokości teoretycznej (spręża) uzyskanej przy skończonej ilości łopatek wirnika.

$$\eta_h = \frac{H_u}{H_{T\infty}} = \frac{\Delta p_c}{\Delta p_{CT\infty}} \quad (7)$$

Sprawność hydrauliczną można również zdefiniować jako stosunek mocy użytecznej N_u do mocy przekazywanej przez wirnik wentylatora N_w .

$$\eta_h = \frac{N_u}{N_w} \quad (8)$$

Wpływ strat mechanicznych (tarcie w łożyskach) określa współczynnik **sprawności mechanicznej**

$$\eta_m = \frac{N_w}{N_{ei}} \quad (9)$$

gdzie: N_{ei} – moc efektywna na wale wentylatora.

Całkowitą **sprawność wentylatora** określa stosunek mocy użytecznej do mocy efektywnej.

$$\eta_w = \frac{N_u}{N_{ei}} = \frac{N_u}{N_w} \cdot \frac{N_w}{N_{ei}} = \eta_h \eta_m \quad (10)$$

Sprawność wentylatora η_w zależy głównie od wielkości wentylatora określonej wydatkiem:

- Wentylatory małe $\dot{V} \leq 1500$ m³/h $\eta_w = 0,3 - 0,5$
- Wentylatory średnie $\dot{V} = 1500 - 20000$ m³/h $\eta_w = 0,3 - 0,7$
- Wentylatory duże $\dot{V} > 20000$ m³/h $\eta_w = 0,65 - 0,83$

Dla oceny pracy całego urządzenia (wentylator-silnik) wprowadza się pojęcie **sprawności ogólnej** urządzenia jako stosunku mocy użytecznej N_u do mocy pobieranej przez silnik napędzający N_e .

$$\eta_o = \frac{N_u}{N_e} \quad (11)$$

Rzeczywista charakterystyka wentylatora

Charakterystyką wentylatora nazywana jest krzywa obrazująca zależność między wytwarzanym sprężem a wydatkiem wentylatora

$$\Delta p_c = f(\dot{V})$$

Krzywa ta może być wyznaczona dla dowolnej prędkości obrotowej wirnika n .

Krzywe charakterystyczne wyznacza się doświadczalnie przez pomiar spręża całkowitego Δp_c dla różnych wartości wydatku V tj. dla różnych przesłonięć przewodu pomiarowego, przy tej samej prędkości obrotowej wirnika.

W każdym stanie ruchu spręż wentylatora równy jest sumie spadku ciśnienia wywołanego oporami przepływu gazu przez przewody połączone z wentylatorem i energii kinetycznej wyrażonej ciśnieniem dynamicznym gazu przepływającego przez przewody

$$\Delta p_c = \Delta p_R + \frac{c^2 \rho}{2} \quad (12)$$

Całkowity spadek ciśnienia gazu w przewodach (sieci przewodów) można wyrazić zależnością:

$$\Delta p_R = R \dot{V}^2 . \quad (13)$$

w której R jest wielkością charakteryzującą przewód (sieć przewodów). Wielkość ta nosi nazwę oporu właściwego przewodu (sieci przewodów) i jest zależna od właściwości przewodu (wymiary, kształt przewodu i chropowatości jego powierzchni). Dla przewodów o określonych i niezmiennych właściwościach oraz stałej gęstości płynu w przewodzie R jest wielkością stałą.

Zmiana wartości R jest równoznaczna z zmianą właściwości przewodów połączonych z wentylatorem. Zmianę taką można uzyskać przez dławienie przepływu gazu stosując odpowiednie przesłony dławiące.

Dla liczbowego ujęcia oporów przepływu sieci przewodów, z którą współpracuje wentylator przy pomiarach na stoisku badawczym wprowadza się pojęcie otworu równoważonego.

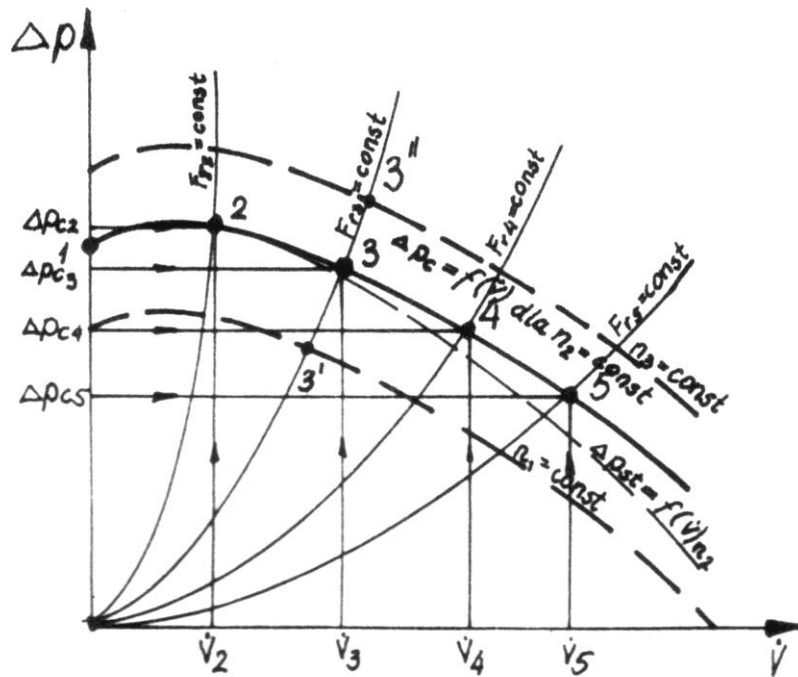
Otworem równoważnym określonej sieci przewodów nazywa się otwór o przekroju F_r [m²], przez który pod wpływem tej samej różnicy ciśnień Δp_c [N/m²] przepływa ta sama ilość czynnika w jednostce czasu, co przez daną sieć. Zmiana otworu równoważonego (przesłony) odpowiada zmianie sieci przewodu.

Krzywe określające zależność $\Delta p_R = f(V)$ w układzie Δp - V są parabolami i noszą nazwę charakterystyk przewodów (sieci przewodów).

Punkt przecięcia się krzywej oporów z charakterystyką wentylatora określa stan współpracy danego wentylatora z siecią.

Wyznaczanie przebiegu krzywej charakterystycznej wentylatora przy stałych obrotach wirnika sprawdza się do określenia spręża i wydatku dla różnych wartości otworów równoważnych.

Przebieg krzywej przedstawiono na rys.5.

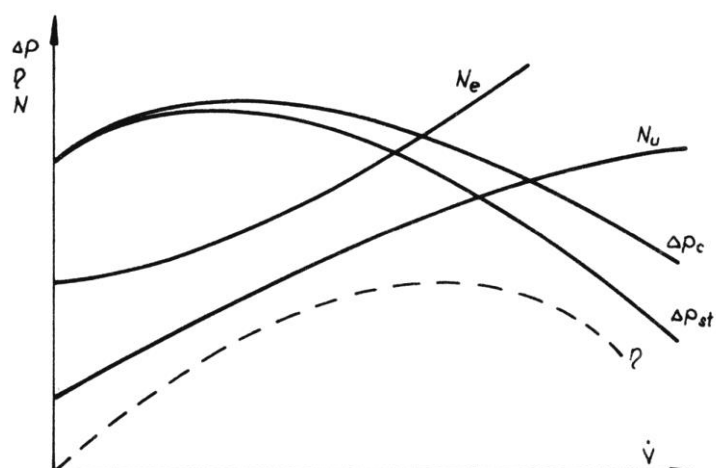


Rys. 5. Charakterystyka zbiorcza wentylatora.

Dla pełnego obrazu pracy wentylatora podstawowe krzywe charakterystyczne uzupełnia się krzywymi sprawności wentylatora, mocy użytecznej i mocy efektywnej.

- $\eta_w = f_1(\dot{V})$
- $N_u = f_2(\dot{V})$
- $N_e = f_3(\dot{V})$

Przebieg krzywych obrazuje rys.6.



Rys. 6. Pełna charakterystyka wentylatora.

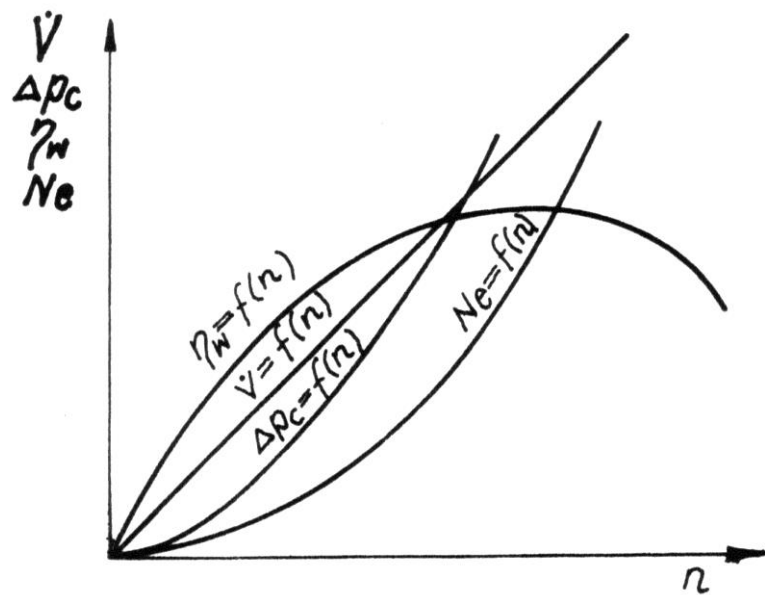
Zmiana prędkości obrotowej wirnika wywołuje zmianę wielkości charakterystycznych wentylatora. Zakładając, że przy zmianie obrotów n sprawność wentylatora pozostaje stała (stałe straty) zależność powyższych wielkości od prędkości obrotowej można przedstawić równaniami:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_1} = \frac{n}{n_1} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_{c1}} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 \quad (15)$$

$$\frac{N_e}{N_{e1}} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^3 \quad (16)$$

Zmienność wielkości charakterystycznych w zależności od prędkości obrotowej wirnika n przy stałym otworze równoważnym przedstawia rys.7.



Rys. 7.

Przebieg pomiarów

Wyznaczanie charakterystyk badanego wentylatora wymaga pomiaru następujących wielkości:

- spadku ciśnienia statycznego na zwężce Δp dla określenia strumienia objętości przepływu (wydatku) przez przewód pomiarowy
- podciśnienia statycznego p_{stm2} na wlocie do wentylatora
- nadciśnienia statycznego p_{stm2} na wylocie z wentylatora
- liczby obrotów wirnika wentylatora n
- mocy dostarczonej do silnika napędzającego N_{el} (przez pomiar napięcia U i prądu J).

Powyższe wielkości mierzy się w różnych stanach ruchu określonych prędkością wirnika n (w zakresie $n=1000-1400$ [obr/min] oraz wielkością otworów równoważnych. Ilość serii pomiarów ustalamy wybierając prędkości obrotowe wirnika n ($n_1 n_2 n_3 \dots n_i$). Seria pomiarów dla stałej prędkości obrotowej n_1 obejmuje pomiary podanych wielkości o dla kolejnych przesłon od całkowicie zamkniętego przewodu ($d_p=0$) do całkowicie odsłoniętego przewodu.

Przebieg obliczeń

Wielkości charakterystyczne wentylatora dla określonego stanu ruchu ($d_{pi}=\text{idem}$ $n_i=\text{idem}$) wyznacza się w oparciu o wynik uzyskane z pomiarów:

Określenie wydatku wentylatora \dot{V} [m^3/s]

Wydatek \dot{V} określamy przy użyciu zwężki pomiarowej

$$\dot{V} = f \cdot \varepsilon \cdot \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (17)$$

gdzie:

- α współczynnik przepływu
 $\alpha = 0,698$
- ε współczynnik ekspansji
 $\varepsilon = 1$
- f powierzchnia przekroju pomiarowego
 $f = \frac{\pi \cdot d_z^2}{4}$
- d_z średnica otworu zwężki
 $d_z = 141 \text{ mm}$
- ρ gęstość powietrza w przekroju pomiarowym
- Δp spadek ciśnienia pomiarowego na zwężce.

Z termicznego równania stanu dla powietrza:

$$\rho = \frac{p_{ot}}{R_x T_{ot}}$$

gdzie:

- R_x zastępcza stała gazowa dla powietrza wilgotnego (gaz doskonały)
 $R_x = \frac{R_g + X \cdot R_p}{1 + X}$
- R_g indywidualna stała gazowa dla powietrza suchego
 $R_g = 287 \text{ J/kgK}$
- R_p indywidualna stała gazowa pary wodnej
 $R_p = 462 \text{ J/kgK}$
- X stopień zawilżenia powietrza

$$X = 0,622 \frac{\varphi_{ot} \cdot p_s(t_{ot})}{p_{ot} - \varphi_{ot} \cdot p_s(t_{ot})} \quad (18)$$

- φ_{ot} - wilgotność względna powietrza w otoczeniu
- $p_s(t_{ot})$ - ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze pomiaru

Prędkość powietrza na wlocie do wentylatora c_1 .

$$c_1 = \frac{\dot{V}}{F_1} \quad (19)$$

F_1 - pole przekroju przepływu w miejscu pomiaru ciśnienia statycznego p_{stm1}

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, D = 350\text{mm}$$

Ciśnienie dynamiczne na wlocie do wentylatora p_{d1}

$$p_{d1} = \frac{c_1^2 \cdot \rho}{2} \quad (20)$$

gdzie ρ - gęstość powietrza

Prędkość powietrza na wylocie z wentylatora c_2

$$c_2 = \frac{\dot{V}}{F_2} \quad (21)$$

gdzie

$$F_2 = a \cdot b ; a=210\text{mm} \quad b=350\text{mm}$$

Ciśnienie dynamiczne na wylocie z wentylatora p_{d2}

$$p_{d2} = \frac{c_2^2 \cdot \rho}{2} \quad (22)$$

Spręż wentylatora Δp_c

$$p_{c1} = p_B - p_{stm1} + p_{d1}$$

$$p_{c2} = p_B + p_{stm2} + p_{d2}$$

$$\Delta p_c = p_{stm2} + p_{stm1} + p_{d2} - p_{d1}$$

$$\Delta p_c = \Delta p_{stm} + p_{d2} - p_{d1} \quad (23)$$

gdzie:

- p_B ciśnienie barometryczne
- $\Delta p_{stm} = p_{stm2} + p_{stm1}$ spręż statyczny wentylatora

Moc użyteczna N_u

$$N_u = \dot{V} \cdot \Delta p_c \quad (24)$$

Mocą użyteczną wentylatora nazywana jest moc potrzebna do izotermicznego sprężenia zassanego czynnika w ilości V od ciśnienia p_{c1} do p_{c2} .

Moc elektryczna N_{el} (doprowadzona do silnika)

$$N_{el} = U \cdot I \quad (25)$$

gdzie:

- U napięcie
- I prąd

Sprawność elektryczna η_{el}

Odczytuje się z wykresu $\eta_{el} = f(N_{el})$.

Moc efektywna wentylatora N_e

Mocą efektywną nazywamy moc doprowadzoną do wału wirnika wentylatora.

$$N_e = N_{el} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_p \quad (26)$$

gdzie

- η_p sprawność przekładni pasowej pomiędzy silnikiem a wałem wirnika wentylatora
 $\eta_p = 0.9$

Sprawność wentylatora η_w

$$\eta_w = \frac{N_u}{N_e}$$

Sprawność ogólna urządzenia η_o

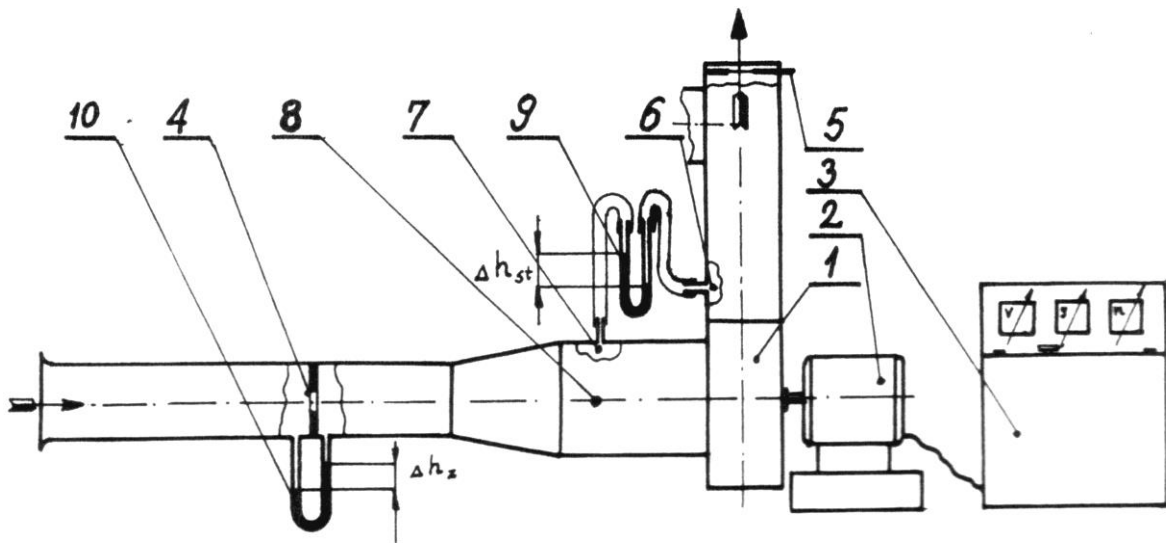
$$\eta_o = \frac{N_u}{N_{el}} = \eta_w \eta_p \eta_{el} \quad (28)$$

Powierzchnia otworu równoważnego Fr

$$Fr = \frac{V}{\mu \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\rho}}} \quad (29)$$

Gdzie:

- μ współczynnik przepływu;
dla otworu wykonanego w cienkiej blaszce wynosi $\mu = 0,6 - 0,7$



Rys. 8. Schemat stanowiska pomiarowego.

- 1) badany wentylator
- 2) silnik prądu stałego
- 3) pulpit sterowniczy
- 4) zwężka pomiarowa
- 5) przesłony
- 6) miejsce odbioru nadciśnienia statycznego p_{stm2}
- 7) miejsce odbioru podciśnienia statycznego p_{stm1}
- 8) miejsce określenia parametrów powietrza
- 9) mikromanometr
- 10) mikromanometr