

Politechnika Lubelska

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów

i Napędów Lotniczych



I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z budową i metodami badań podstawowych typów wentylatorów oraz wyznaczenie charakterystyk wentylatora promieniowego do kanałów okrągłych.

II. Wprowadzenie

Wentylatory to wirnikowe maszyny robocze w których spiętrzenie całkowite nie przekracza 13 kPa. Służą do przetłaczania płynów z obszaru o ciśnieniu niższym do obszaru o ciśnieniu wyższym. Sprężenie czynnika jest niezbędne dla pokonania oporów sieci przewodów, przez które czynnik jest przetłaczany. Badania tych maszyn przeprowadza się w celu sporządzenia charakterystyki pracy danej maszyny. Ze względu na uzyskiwane spiętrzenie całkowite dzielą się na:

- niskoprężne – do 1 kPa,
- średnioprężne – 1 – 3 kPa
- wysokoprężne – 3 – 13 kPa

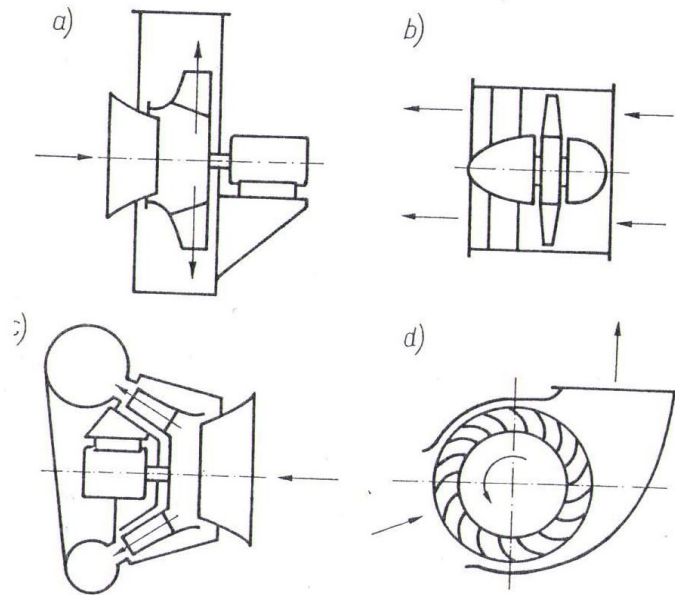
Elementem przekazującym energię czynnikowi przetłaczanemu jest wirnik wentylatora. Ze względu na konstrukcje (kierunek przepływu przez wirnik) wentylatory dzielimy na:

- odśrodkowe (promieniowe)
- osiowe
- skośne (diagonalne)
- poprzeczne

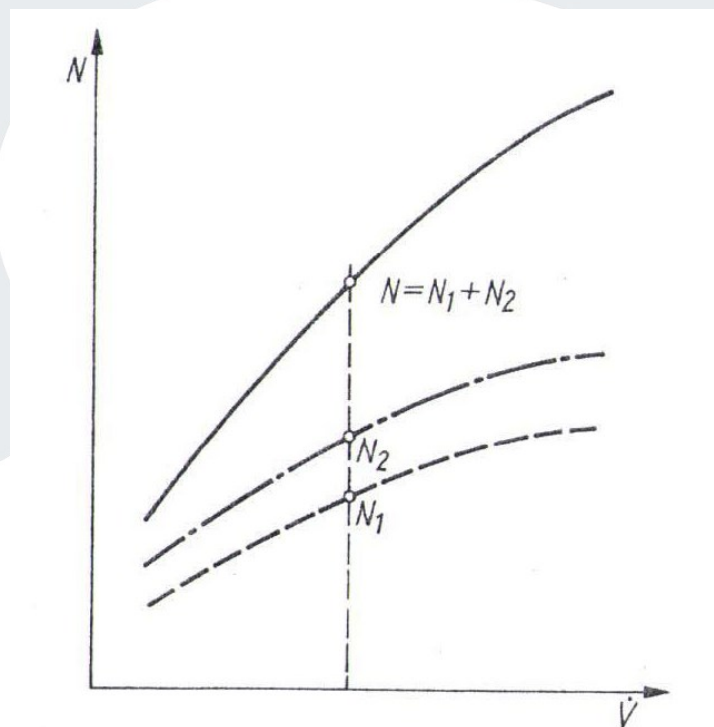
W grupie wentylatorów odśrodkowych można rozróżnić trzy rodzaje wentylatorów różniących się budową wirnika:

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

W wentylatorach przetłaczanie oraz przyrost ciśnienia następują dzięki pracy zewnętrznej doprowadzanej do wirnika. 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 tworzy się podciśnienie, dzięki czemu przez wlot napływają nowe porcje gazu. Podczas przepływu przez obracający się wieniec łopatkowy zwiększa się energia kinetyczna i ciśnienie statyczne gazu.



Rys. 1. Schemat układu przepływowego wentylatorów: a) odśrodkowych, b) osiowych, c) skośnych, d) poprzecznych



Rys. 2. Charakterystyka mocy elektrycznej układu wentylatorów przy współpracy szeregowej

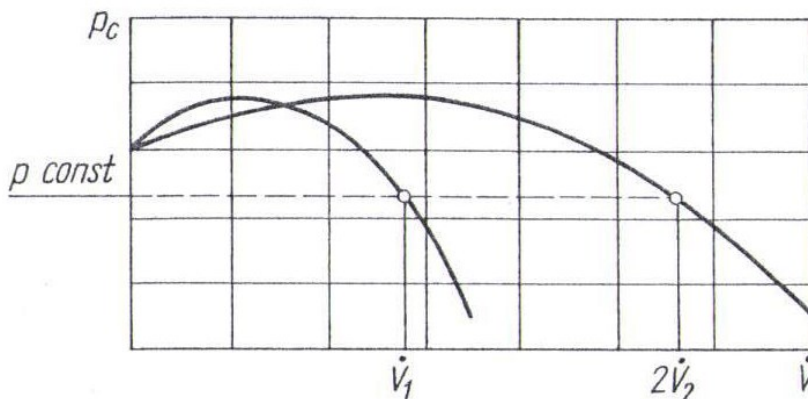
W układzie jednowieńcowym ciśnienie całkowite czynnika jest uzależnione przede wszystkim od prędkości obwodowej wirnika. Przy większej prędkości obwodowej istnieje możliwość uzyskania większego ciśnienia całkowitego czynnika, lecz zwiększają się wymagania wytrzymałościowe dotyczące materiału, z którego zbudowany jest wirnik. Dlatego celu uzyskania większego ciśnienia łączy się szeregowo kilka wieńców uzyskując układ wielowieńcowy.

W przypadku gdy poszczególne wentylatory nie zapewniają odpowiedniego strumienia

objętości czynnika, stosuje się łączenie kilku wentylatorów w układ szeregowy lub równoległy.

W celu zwiększenia spiętrzenia toczonego czynnika stosuje się współpracę szeregową wentylatorów. Przy tym połączeniu wentylatorów strumień objętości czynnika w poszczególnych wentylatorach powinien być jednakowy. Spiętrzenie całkowite jest wówczas równe sumie spiętrzeń poszczególnych wentylatorów. Charakterystykę mocy elektrycznej pobieranej przez układ wentylatorów pracujących szeregowo uzyskuje się przez sumowanie mocy napędowych poszczególnych wentylatorów.

Zwiększenie strumienia objętości uzyskuje się stosując współpracę równoległą tych maszyn. Spiętrzenia całkowite poszczególnych wentylatorów powinno być sobie równe. Strumień objętości układu jest sumą strumieni objętości poszczególnych wentylatorów.



Rys. 3. Charakterystyka aerodynamiczna układu wentylatorów przy współpracy równoległej

III. Podstawowe wielkości charakteryzujące pracę wentylatorów

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi pracę wentylatorów są:

- **natężenie przepływu:** masowe q_m określające masę gazu przepływającego w jednostce czasu [kg/s], lub objętościowe q_v określające objętość czynnika przepływającego w jednostce czasu [m^3/s] przez przekrój wlotowy wentylatora, określone dla warunków normalnych, tj. temperatury $20^\circ C$ i ciśnienia $101325 Pa$;
- **przyrost ciśnienia** (spiętrzenie) Δp lub stosunek ciśnień (spręż) p_2/p_1 , określające różnicę lub stosunek ciśnień panujących w przekroju wlotowym i wylotowym wentylatora. Ciśnienia podaje się w [Pa]. Określa się spiętrzenie: statyczne, dynamiczne i całkowite, odnoszące się odpowiednio do ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego;
- **moc użyteczna** P_u [W]: przyrost użytecznej postaci energii gazu przepływającego przez wentylator w jednostce czasu – określonej iloczynem całkowitej pracy sprężania i strumienia objętości gazu;
- **moc wentylatora** (efektywna) P_{ef} [W]: moc przekazana na wał wentylatora;
- **prędkość obrotowa wentylatora** n [obr/min] to liczba obrotów wirnika w ciągu jednostki czasu;

- **sprawność wentylatora** η_w wyrażająca stosunek zapotrzebowanej mocy maszyny w warunkach wyidealizowanych do mocy rzeczywiście pobieranej.

III. Wskaźniki bezwymiarowe

W celu porównania różnych wentylatorów bardzo często sprowadza się ich wielkości charakterystyczne do wspólnego odniesienia, wyrażając je w postaci bezwymiarowych wskaźników.

- **wskaźnik strumienia objętości** (wskaźnik wydajności objętościowej) φ^* - stosunek strumienia objętości do iloczynu powierzchni koła o średnicy odniesienia i prędkości odniesienia (prędkość obwodowa koła wirnikowego) wyrażony wzorem:

$$\varphi^* = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} D_z^2 \cdot u_z}$$

- **wskaźnik spiętrzenia** (wskaźnik ciśnienia całkowitego) ψ - iloraz spiętrzenia całkowitego i ciśnienia dynamicznego czynnika przepływającego z prędkością odniesienia:

$$\psi = \frac{\Delta p_c}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_z^2}$$

- **wskaźnik mocy** λ - iloraz iloczynu wskaźnika strumienia objętości gazu φ i wskaźnika spiętrzenia ψ do sprawności wentylatora η :

$$\lambda = \frac{\varphi^* \cdot \psi}{\eta}$$

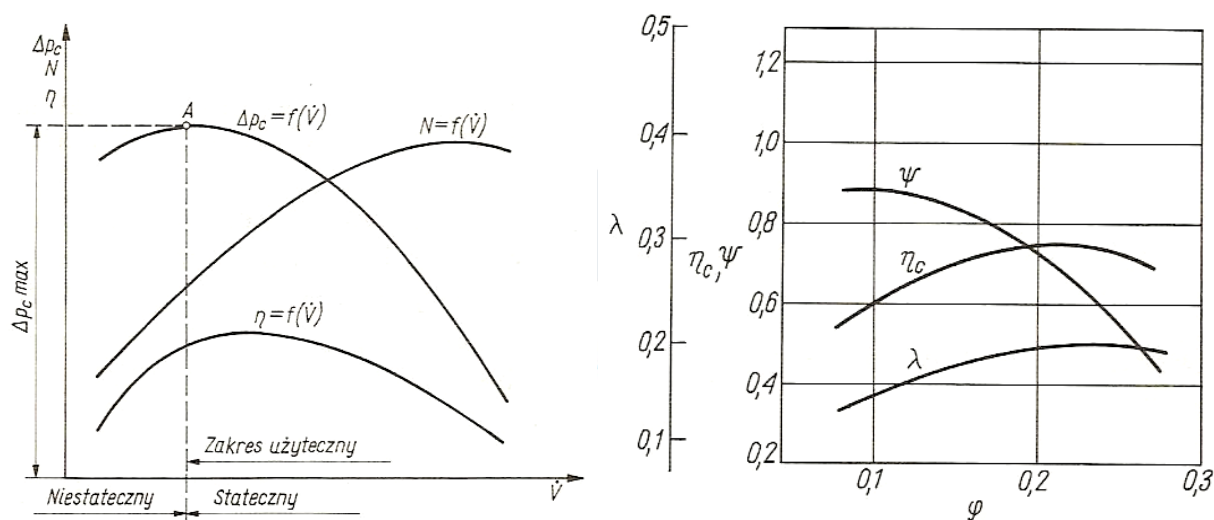
IV. Rodzaje charakterystyk wentylatorów.

Przyrost ciśnienia całkowitego Δp_c , sprawność η_w i moc pobierana przez wentylator N przy stałych obrotach zmienia się wraz z jego wydajnością q_v . Zależność przyrostu ciśnienia, zużycia mocy oraz sprawności od wydajności objętościowej lub masowej przy niezmienniej prędkości obrotowej i niezmiennych parametrach termodynamicznych nazywamy pełną charakterystyką wentylatora. Znajomość charakterystyki jest konieczna celem właściwego doboru wentylatora w pracach projektowych instalacji wentylacyjnej, przestrzegania właściwej eksploatacji jak również ocenie pracy.

Pełna charakterystyka wentylatora składa się więc z trzech charakterystyk: z charakterystyki podstawowej $\Delta p_c = f(q_v)$, zwanej krzywą charakterystyczną, charakterystyki sprawności $\eta_w = f(q_v)$ oraz charakterystyki mocy $N_{ef} = f(q_v)$. Charakterystyki te można wyznaczyć na drodze doświadczalnej lub analitycznej. Doświadczalnie wyznacza się charakterystyki

wentylatorów, mierząc ich wydajność q_v , przyrost ciśnienia Δp oraz przeliczając sprawność η przy różnych położeniach przepustnicy wbudowanej w przewód tłoczny.

Charakterystyka aerodynamiczna wentylatora dzieli się na dwa zakresy pracy: stateczny i niestateczny (pkt A na rys. 1). Użyteczny zakres pracy jest stateczny, gdy wraz ze zmniejszeniem się strumienia objętości gazu wzrasta jego spiętrzenie. Zakres pracy od strumienia objętości $q_v = 0$ do odpowiadającej maksymalnemu spiętrzeniu $\Delta p_{c \max}$ nazywa się niestatecznym. Praca wentylatora w tym zakresie nie jest wskazana, ze względu na niską sprawność, skłonność do powstawania pulsacji przepływającego czynnika, oraz możliwości wystąpienia silnych drgań elementów wentylatora zagrażających ich wytrzymałości.



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki aerodynamiczne wentylatora

IV. Metody regulacji wydajności wentylatorów.

Dla zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu technologicznego, w który włączony jest wentylator, wymaga się, by ciśnienie końcowe sprężenia lub wydajność były stałe lub zmieniały się w ograniczonych przedziałach przy zmiennych wartościach pozostałych parametrów. W zależności od potrzeb odbiorców sprężonego gazu wyróżnia się dwa zasadnicze zadania, które winna wypełniać regulacja:

- utrzymanie stałego ciśnienia końcowego przy zmiennej wydajności,
- utrzymanie stałej wydajności przy zmieniających się oporach w sieci.

Wymienione zadania mogą być realizowane przy zastosowaniu szeregu sposobów regulacji:

- 1) zmiana liczby obrotów silnika napędowego,
- 2) zmiana kątów ustawienia łopatek roboczych kół wirnikowych,
- 3) zmiana kątów ustawienia łopatek kierowniczych,
- 4) dławienie czynnika po stronie ssania,

- 5) dławienie czynnika po stronie tłoczenia,
- 6) wydmuch gazu do atmosfery lub recyrkulacja nadmiaru gazu do króćca ssawnego.

V. Przebieg realizacji ćwiczenia

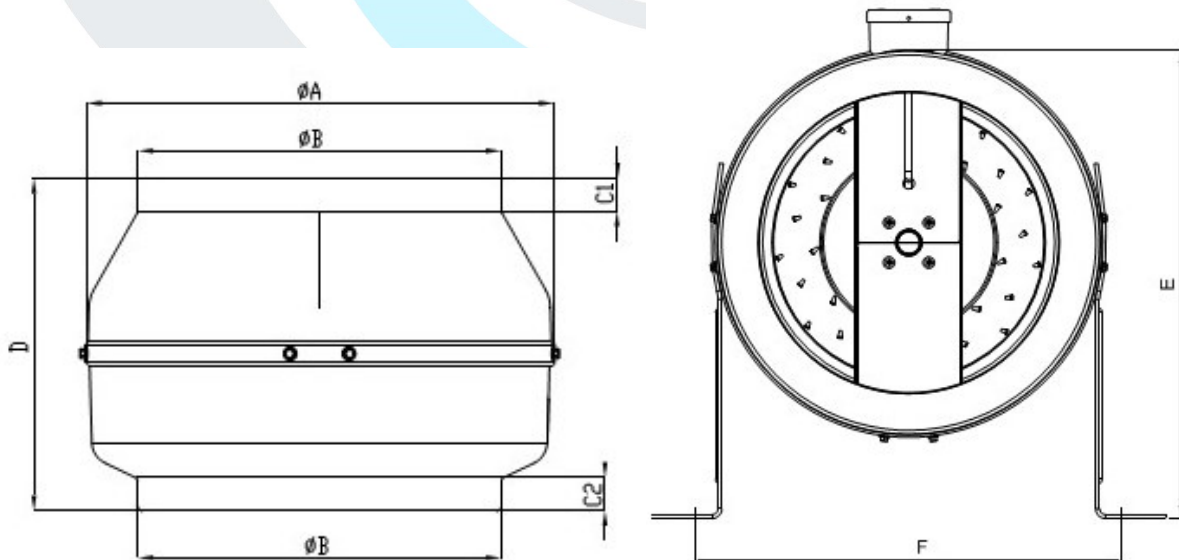
Na ćwiczeniu należy wyznaczyć pełną charakterystykę wentylatora promieniowego do kanałów okrągłych składającą się z charakterystyk:

1. podstawowej $\Delta p_c = f(q_v)$,
2. sprawności $\eta_w = f(q_v)$,
3. mocy $N_u = f(q_v)$.

Dodatkowo należy wyznaczyć charakterystykę bezwymiarową wentylatora składającą się z wskaźnika strumienia objętości φ , wskaźnik spiętrzenia (wskaźnik ciśnienia całkowitego) ψ , wskaźnik mocy λ i sprawności wentylatora.

Obiekt badań

Na rysunku 5 przedstawiono schemat wentylatora HAVACO ICB-250/1250M a na rysunku 6 charakterystykę podawaną przez producenta. Obudowa wentylatora została wytłoczona z blachy stalowej, lakierowanej proszkowo. Wirnik wykonano z blachy ocynkowanej o łopatkach pochylonych do tyłu oraz wyważono dynamicznie. Wentylator połączono z silnikiem z wirującym stojanem, zasilany prądem jednofazowym 230V, 50Hz o sprawności $\eta_s = 96\%$



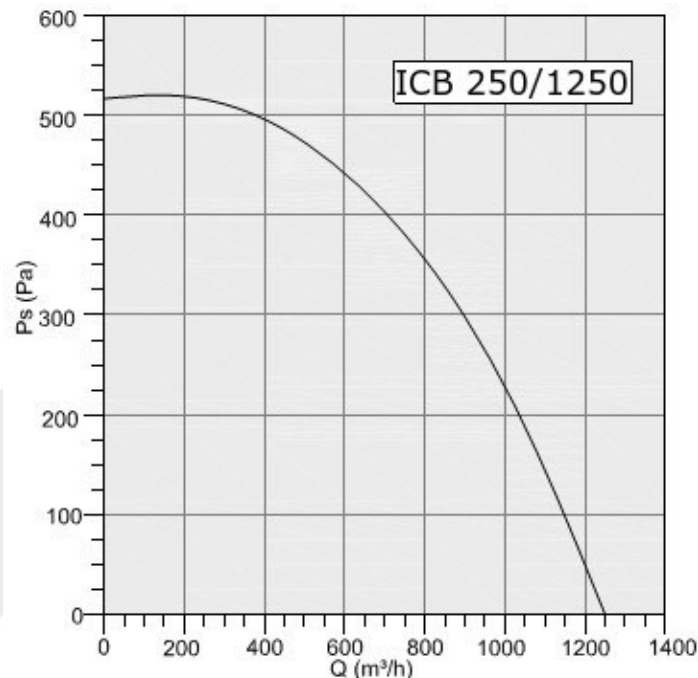
Rys. 5. Wymiary konstrukcyjne wentylatora HAVACO ICB-250/1250M [4]

Tab. 1. Wymiary wentylatora HAVACO ICB-250/1250M [4]

Typ	A	B	C1	C2	D	E	F
ICB-250/1250 M	330	247	30	28	227	380	352

Tab. 1 Dane techniczne wentylatora HAVACO ICB-250/1250M [4]

q_v [m ³ /h]	n [obr/min]	P [W]	I [A]	U [V]	Częstotliwość [Hz]	Kondensator [μF]	p_{akust} [dB(A)]	m [kg]
1150	2635	145	0,63	230	50	5,0	58	5,3



Rys. 6. Charakterystyka fabryczna badanego wentylatora HAVACO ICB-250/1250M [4]

Przepustnica typu IRIS

Do wyznaczenia wydatku objętościowego q_v [m³/h] wentylatora i regulacji przepływu wykorzystano przepustnicę typu IRIS 125. Przepustnica typu IRIS jest przeznaczona do okrągłych kanałów wentylacyjnych i zapewnia łatwą regulację natężenia przepływu powietrza poprzez płynną zmianę średnicy kryzy. Przepustnica typu IRIS może być stosowana zarówno w przewodach wywiewnych jak i nawiewnych. Jest wyposażona w dźwignie do regulacji średnicy otworu oraz w dwie końcówki umożliwiające podłączenie kontroli natężenia przepływu. Dźwignienka regulacyjna posiada dwie śruby, które blokują żądane ustawienie przepustnicy. Przepustnica typu IRIS jest wykonana z galwanizowanej stali i posiada dwie uszczelki gumowe umożliwiające szczelny montaż w przewodzie. W tabeli poniżej podano charakterystykę zwężki pomiarowej. Wydatek oblicza się ze wzoru:

$$q_v = k\sqrt{\Delta p},$$

Gdzie:

q - przepływ l/s,

Δp - zmierzone ciśnienie w Pa,

K – współczynnik.

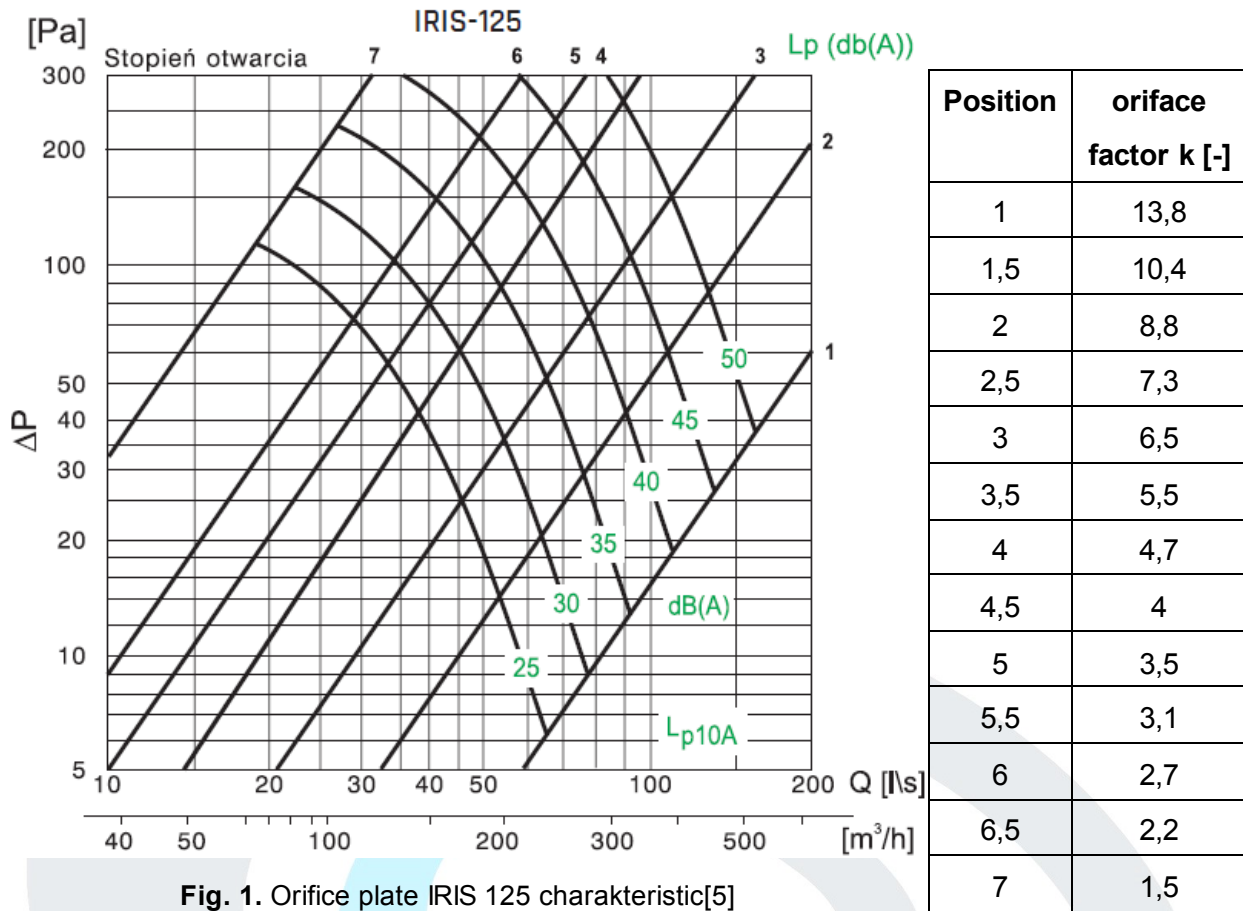


Fig. 1. Orifice plate IRIS 125 characteristic[5]

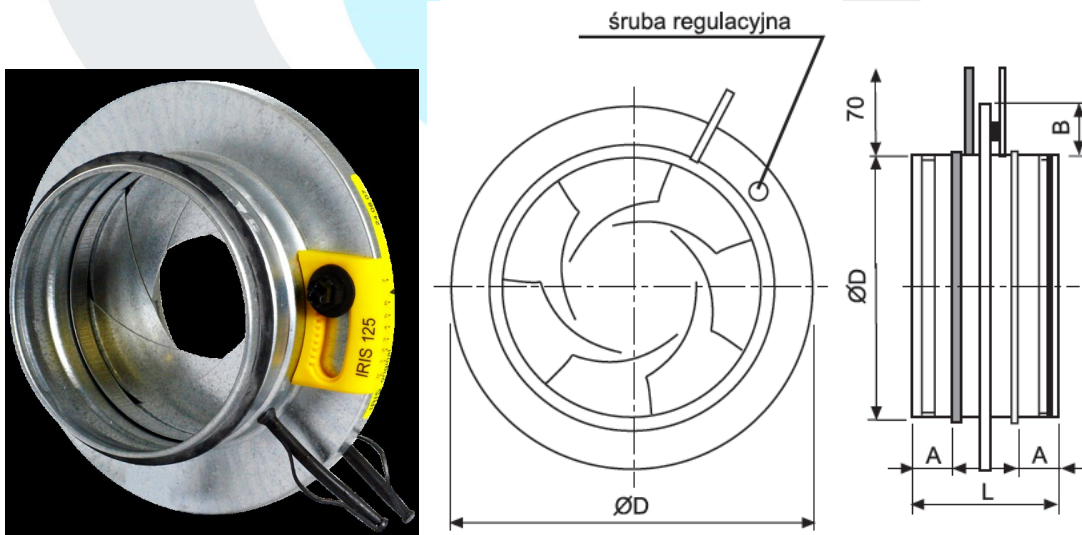


Fig. 2. Orifice plate IRIS 125 [5]

Przebieg obliczeń

1. Moc elektryczna pobierana przez silnik: $N_{el} = I \cdot U \cdot \cos \Phi$ [W]
2. Moc na wale wentylatora: $N = N_{el} \cdot \eta_s$ [W]
3. Spadek ciśnienia na kryzie: $\Delta p = n_1 \cdot \rho \cdot g \cdot l_d$ [Pa]
4. Przyrost ciśnienia statycznego: $\Delta p_{st} = n_2 \cdot \rho \cdot g \cdot l_{st}$ [Pa]
5. Wydatek wentylatora: $q_v = k \sqrt{\Delta p}$ [l/s]

Δp - zmierzone ciśnienie [Pa]

k – współczynnik kryzy

6. Prędkość średnia w rurociągu: $C_{sr} = \frac{q_v}{A}$ [m/s]

7. Gęstość powietrza w rurociągu w warunkach pomiaru:

$$\rho_{air} = \rho_n \frac{(p_1 - \varphi \cdot p_s) \cdot T_n}{P_n t_1} + \varphi \cdot \rho'' \quad [\text{kg/m}^3]$$

$T_n = 273,15$ K

$P_n = 101325$ Pa

$\rho_n = 1,292923$ kg/m³

Φ – wilgotność względna powietrza

p_s - ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze t_1 odczytać z tabeli 4.

ρ'' - gęstość pary wodnej nasyconej w temperaturze t_1 odczytać z tabeli 4.

8. Przyrost ciśnienia dynamicznego: $\Delta p_d = \frac{\rho_{air} \cdot C_{sr}^2}{2}$ [Pa]

9. Przyrost ciśnienia całkowitego: $\Delta p_c = \Delta p_{st} + \Delta p_d$ [Pa]

10. Moc użyteczna: $N_u = \Delta p_c \cdot q_v$ [W]

11. Sprawność wentylatora:

$$\eta_w = \frac{N_u}{N} \cdot 100 \quad [\%]$$

Tab. 4. Wyciąg z tablic pary nasyconej H₂O uszeregowanych wg temperatur

t	p_s	ρ'	ρ''	h'	h''	r	s'	s''
[°C]	[kPa]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kgK]	[kJ/kgK]
0,00	0,6108	0,0010002	206,0	0,04	2501,0	2501,0	0,0002	9,1564
0,01	0,6112	0,0010002	206,18	0,00	2501,0	2501,0	0,0000	9,1562
1	0,6566	0,0010001	192,62	4,17	2502,8	2498,6	0,0153	9,1299
2	0,7054	0,0010001	179,93	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,7575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,8129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,8719	0,0010000	147,16	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0257
6	0,9346	0,0010000	137,77	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	1,0012	0,0010001	129,06	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	1,0721	0,0010001	120,96	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	1,1473	0,0010002	113,43	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	1,2271	0,0010003	106,42	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9008
11	1,3118	0,0010003	99,90	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	1,4015	0,0010004	93,83	50,38	2523,1	2472,7	0,1805	8,8525
13	1,4967	0,0010006	88,17	54,57	2524,9	2470,3	0,1952	8,8286
14	1,5974	0,0010007	82,89	58,75	2526,7	2468,0	0,2098	8,8050
15	1,7041	0,0010008	77,97	62,94	2528,6	2465,6	0,2243	8,7815
16	1,8170	0,0010010	73,38	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	1,9364	0,0010012	69,09	71,31	2534,2	2460,9	0,2533	8,7363
18	2,063	0,0010013	65,09	75,50	2534,0	2458,6	0,2677	8,7125
19	2,196	0,0010015	61,34	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898
20	2,337	0,0010017	57,83	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
21	2,485	0,0010019	54,56	88,04	2539,5	2451,5	0,3105	8,6452
22	2,642	0,0010022	51,49	92,23	2541,4	2449,1	0,3247	8,6232
23	2,808	0,0010024	48,62	96,41	2543,2	2446,8	0,3389	8,6013
24	2,982	0,0010026	45,93	100,59	2545,0	2444,4	0,3530	8,5797
25	3,166	0,0010029	43,40	104,77	2546,8	2442,1	0,3670	8,5583
26	3,360	0,0010032	41,03	108,95	2548,6	2439,7	0,3810	8,5370
27	3,654	0,0010034	38,81	113,13	2550,5	2437,3	0,3949	8,5159
28	3,778	0,0010037	36,73	117,31	2552,3	2435,0	0,4088	8,4950
29	4,004	0,0010040	34,77	121,48	2554,1	2432,6	0,4227	8,4743
30	4,242	0,0010043	32,93	125,66	2555,9	2430,3	0,4365	8,4537
31	4,491	0,0010046	31,20	129,84	2557,7	2427,9	0,4503	8,4334
32	4,754	0,0010049	29,57	134,02	2559,5	2425,5	0,4640	8,4132
33	5,029	0,0010053	28,04	138,20	2561,4	2423,2	0,4777	8,3931
34	5,318	0,0010056	26,60	142,38	2563,2	2420,8	0,4913	8,3733
35	5,622	0,0010060	25,25	146,56	2565,0	2418,4	0,5049	8,3536
36	5,940	0,0010063	23,97	150,74	2566,8	2416,0	0,5184	8,3341
37	6,274	0,0010067	22,76	154,91	2568,6	2413,7	0,5319	8,3147
38	6,624	0,0010070	21,63	159,09	2570,4	2411,3	0,5453	8,2955
39	6,991	0,0010074	20,56	163,27	2572,2	2408,9	0,5588	8,2765

Literatura:

- [1] Praca zbiorowa: *Pomiary cieplne cz.II*, WNT, Warszawa 1993.
[2] WITKOWSKI Andrzej: *Sprężarki wirnikowe*, Skrypty uczelniane nr 1539, Gliwice 1990.
[3] TULISZKA Edmund: *Sprężarki, dmuchawy i wentylatory*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1969.
[4] www.ventia.pl/
[5] www.venture.pl

Przykładowe zagadnienia:

1. Wentylatory definicja i ich podział.
2. Praca równoległa i szeregową wentylatorów oraz ich charakterystyki
3. Wielkości charakteryzujące prace wentylatorów
4. Wielkości bezwymiarowe pracy wentylatorów
5. Charakterystyki wentylatora
6. Zasada działania wentylatora
7. Metody regulacji wentylatorów

Wykaz oznaczeń:

Poz. obc. – pozycja przepustnicy obciążającej
 n – obroty silnika wentylatora
 N_{el} – moc pobierana przez silnika wentylatora
 N – moc na wale wentylatora
 n_1, n_2 – przełożenie mikromanometru
 l_d – długość słupa cieczy (ciśnienie dynamiczne)
 Δp – spadek ciśnienia na kryzie
 l_s – długość słupa cieczy (ciśnienie statyczne)
 t – temperatura powietrza,
 p_{atm} – ciśnienie atmosferyczne
 IR – pozycja przepustnicy pomiarowej
 q_v – wydatek wentylatora
 c_{sr} – średnia prędkość w rurociągu,
 Δp_c – spiętrzenie całkowite wentylatora
 N_u – moc użyteczna wentylatora
 η_s – sprawność wentylatora
 A – pole przekroju rurociągu

Opracowanie: dr inż. Michał Gęca

Projekt i wykonanie stanowiska: mgr inż. Krzysztof Skiba