

Procedura badawcza instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych

z użyciem elektronicznego mikromanometru MRK z sondą Prandtla

Doc. dr inż. JERZY MAKOWIECKI
Dr hab. inż. MARIAN ROSIŃSKI
Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji
Politechniki Warszawskiej

Instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne po wykonaniu, a przed przekazaniem do eksploatacji wymagają przeprowadzenia pomiarów aerodynamicznych i regulacji w aspekcie zapewnienia odpowiednich przepływów i parametrów powietrza. Pomiary takie i ewentualne przeregulowania mogą być również wymagane po zmianie założeń technologicznych, po modernizacji zakładu i instalacji, wreszcie na wniosek bezpośrednich użytkowników lub służb kontrolujących - w toku normalnego użytkowania obiektu. Może tu chodzić o badanie i ocenę warunków mikroklimatu i warunków zdrowotności w pomieszczeniach, o pomiary wydajności nawiewników i wywiewników, a także o badanie parametrów pracy, a w tym strumieni powietrza całych zespołów wentylacyjnych/klimatyzacyjnych lub ich części.

DO PRAKTYCZNYCH, realizowanych w warunkach terenowych, pomiarów prędkości przepływu, ciśnienia i wydatku powietrza w centralach i w przewodach odgałęzień zazwyczaj stosuje się różnych wymiarów sondy Prandtla połączone z mikromanometrami. Najczęściej stosowane obecnie w takich pomiarach są mikromanometry cieczowe.

Dlatego też z uznaniem należy powitać pojawienie się nowej propozycji mikromanometru elektronicznego, umożliwiającego bezpośredni odczyt ciśnienia i temperatury, a po wprowadzeniu do programu i automatycznym przeliczeniu - wilgotności względnej, prędkości i strumienia powietrza w przewodzie wentylacyjnym.

Po wprowadzeniu do programu danych: kształtu i wymiarów przewodu uzyskuje się podział przekroju poprzecznego przewodu na wymagane w pomiarach pola, otrzymuje się odległości sondy od ścianek przewodu w kolejnych punktach pomiarowych, a po dokonaniu w tych punktach pomiarów - otrzymuje się wydruk następujących wielkości fizycznych: gęstości powietrza, prędkości lokalnych, prędkości średniej i wartości strumienia objętości powietrza w przewodzie.

Omawiane rozwiązanie układu pomiarowego stanowi połączenie sondy Prandtla z mikromanometrem elektronicznym MRK firmy Unisens, o następujących zakresach pomiarowych:

temperatura: $-30^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}$

ciśnienie - 2 zakresy: $0 \div 100\text{Pa}$ i $0 \div 2500\text{Pa}$

Rozkład ciśnienia statycznego może być nierównomierny, zaś rozkład ciśnienia całkowitego w poszczególnych punktach poprzecznego przekroju przewodu jest nierównomierny i dlatego pomiar tych wielkości ciśnienia powinien być wykonywany w wielu punktach przekroju.

Praktycznie pomiarów dokonuje się w tych samych punktach, w których mierzy się ciśnienie dynamiczne do określenia prędkości przepływu powietrza.

Temperaturę powietrza w przewodzie określa się za pomocą czujnika temperatury, zamocowanego w sondzie pomiarowej, wstawionej w otwór wywiercony w ścianie przewodu. Sondę wsuwa się do wnętrza przewodu, możliwie głęboko, do jego osi.

Za pomocą sondy Prandtla mierzy się ciśnienie tylko w miejscu umieszczenia przyrządu pomiarowego. Ponieważ rozkład prędkości w przekroju prostym do kierunku przepływu strumienia powietrza, zazwyczaj jest nie tylko nierównomierny, ale często jest niesymetryczny względem osi przewodu, należy wyznaczyć średnią prędkość przepływu powietrza.

W czasie pomiaru ciśnienia rurkę Prandtla należy ustawić równoległe do kierunku przepływu strumienia, ale odchylenie sondy o $\pm 170^{\circ}$ w stosunku do kierunku wektorów prędkości, powoduje znikomy błąd pomiaru ciśnienia dynamicznego. Wielkość błędu w tym zakresie odchylenia kąta nie przekracza 1%.

Prędkość w danym punkcie przewodu wentylacyjnego mierzy się metodą pośrednią, określając za pomocą sondy Prandtla odpowiadającą tej prędkości wartość ciśnienia dynamicznego, a zatem:

$$w_i = \beta \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d}, \quad \text{m/s} \quad (1)$$

Biorąc pod uwagę układ profilu prędkości w przewodzie wentylacyjnym, do obliczenia prędkości średniej w przekroju należy określić prędkość w różnych punktach przekroju poprzecznego bez osi przewodu.

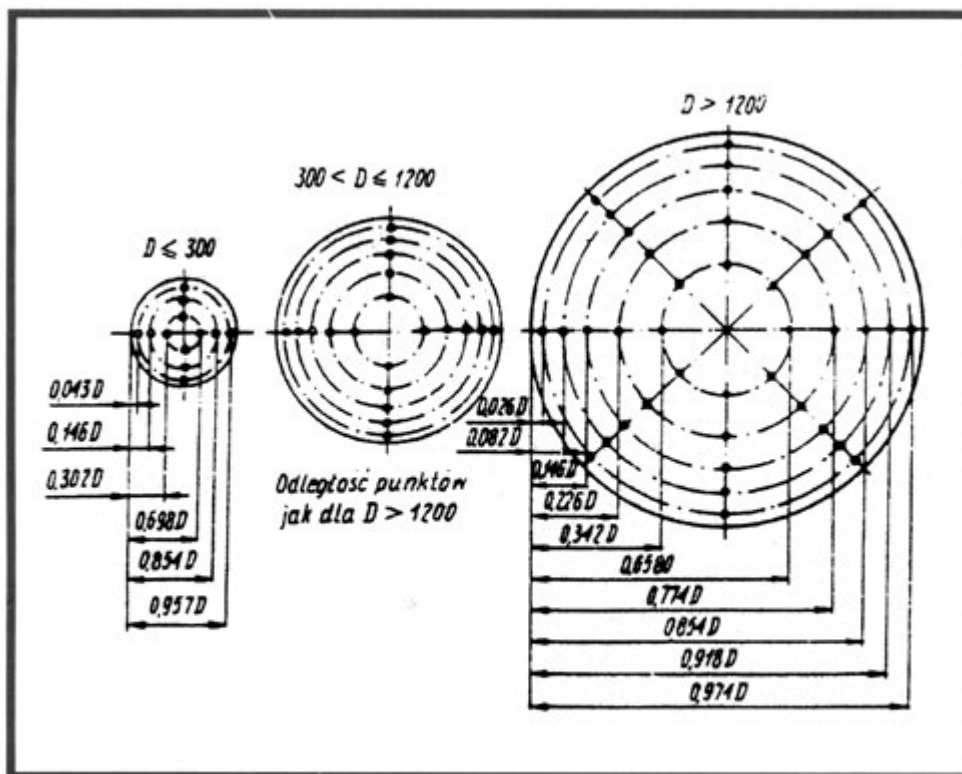
Jeśli przekrój poprzeczny przewodu jest prostokątny, jego powierzchnię dzieli się na szereg pól, o jednakowej powierzchni. Ciśnienie dynamiczne określa się w środku każdego z tych pól.

Jeśli przekrój poprzeczny przewodu jest kołowy, jego powierzchnię dzieli się na pola w kształcie koncentrycznych pierścieni w liczbie zależnej od średnicy przewodu. Ciśnienie dynamiczne określa się w dwóch lub czterech punktach każdego pierścienia, leżących na okręgu dzielącym powierzchnię pierścienia na dwie równe części.

Przy powiększeniu liczby pól, na jaką dzieli się powierzchnię przekroju poprzecznego przewodu, wzrasta dokładność określenia prędkości średniej.

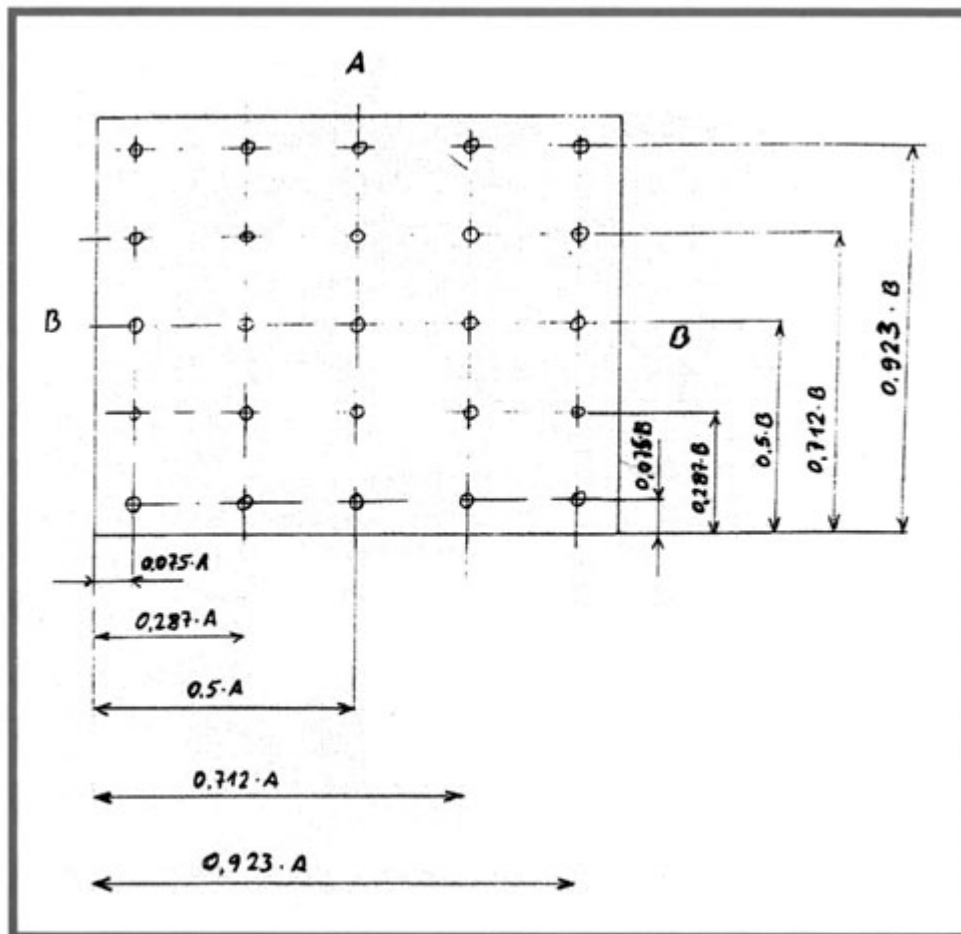
Jeśli w przewodach o przekroju kołowym występuje nierównomierny rozkład prędkości, ciśnienie dynamiczne mierzy się w dwóch wzajemnie prostopadłych osiach przekroju poprzecznego.

Praktyczny sposób rozmieszczenia punktów pomiarowych dla przewodów kołowych o różnych średnicach przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych dla różnych średnic przewodów kołowych

Liczba punktów pomiarowych zależy od średnicy przewodu: dla średnic $D \leq 300$ mm należy powierzchnię przewodu kołowego dzielić na 3 współśrodkowe pierścienie, zaś dla $D > 300$ mm na pięć pierścieni. Dla średnic przewodów $D \leq 1200$ mm punkty pomiarowe rozmieszcza się wzdłuż dwóch, wzajemnie prostopadłych do siebie średnic, natomiast dla $D > 1200$ mm wzdłuż czterech średnic przesuniętych o 45° .



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych dla przewodów prostokątnych

Praktyczny schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych dla przewodów prostokątnych (kwadratowych) pokazano na rys. 2. W tym przypadku, niezależnie od wymiarów przewodów proponuje się 25 punktów pomiarowych.

W przypadku przewodów o przekroju kołowym średnicę wewnętrzną D przewodu należy przyjąć jako średnią arytmetyczną, z co najmniej czterech pomiarów, a więc:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i}{4} \quad (2)$$

gdzie D_i - zmierzone wartości średnicy wewnętrznej przewodu.

W przypadku przewodów o przekroju poprzecznym prostokątnym (kwadratowym), w celu określenia F mierzy się czterokrotnie wewnętrzne długości boków przewodu, a więc:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i}{4} \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 B_i}{4} \quad (3)$$

gdzie F - średnie (zmierzone) pole poprzecznego przekroju przewodu prostokątnego o wewnętrznych wymiarach boków A i B , m².

Algorytm obliczeniowy średniej prędkości i strumienia objętości powietrza w przewodzie

Algorytm obejmuje zakres działań od wykonania bezpośrednich pomiarów wielkości fizycznych do obliczenia, przez fazy pośrednie, strumienia objętości powietrza ze wzorów końcowych.

Prędkości lokalne (miejscowe) po wykonaniu pomiarów miejscowych ciśnień dynamicznych (zgodnie z rys. 1 i 2) w warunkach badania, określa się przy użyciu wzoru (1):

$$w_i = \beta \sqrt{\frac{2}{\rho} p_{d_i}}, \quad \text{m/s}$$

gdzie:

p_{d_i} - zmierzone wartości lokalnych ciśnień dynamicznych, Pa,

ρ - gęstość powietrza, określona z tabeli, kg/m³,

β - współczynnik korygujący - dla rurek Prandtla $\beta = 1$

Gęstość właściwa powietrza wilgotnego:

$$\rho = \frac{(1+x)p}{462(0,622+x)T}, \quad \text{kg/m}^3 \quad (4)$$

gdzie:

p - bezwzględne ciśnienie statyczne powietrza przepływającego w przewodzie, Pa,

T - bezwzględna temperatura powietrza w miejscu określenia gęstości ($T = 273 + t$), K
 x - zawartość wilgoci w powietrzu, kg/kg.

Zawartość wilgoci w powietrzu (wilgotność bezwzględna masowa):

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (5)$$

gdzie:

φ - wilgotność względna powietrza (zmierzona),

p_s - ciśnienie nasycenia, odczytane z tablic dla zmierzonej temperatury powietrza t, Pa.

Gęstość właściwą powietrza dla różnych wartości temperatury i stałej wartości ciśnienia bezwzględnego powietrza $p = 100\ 000$ Pa oraz dwóch wartości zawartości wilgoci w powietrzu przedstawiono w tabeli.

Temperatura powietrza wilgotnego t, 0C	Bewzględna temperatura powietrza wilgotnego T, K	Gęstość powietrza dla przeciętnych zimowych warunków pracy instalacji bez nawilżania powietrza		Gęstość powietrza dla letnich warunków pracy instalacji lub warunków zimowych z nawilżaniem powietrza	
		x, kg/kg	ρ , kg/m ³	x, kg/kg	ρ , kg/m ³
20	253	0,0028	1,37	0,012	1,36
-15	258	0,0028	1,35	0,012	1,34
-10	263	0,0028	1,32	0,012	1,31
-5	268	0,0028	1,30	0,012	1,29
0	273	0,0028	1,27	0,012	1,26
5	278	0,0028	1,25	0,012	1,24
10	283	0,0028	1,23	0,012	1,22
15			1,21	0,012	1,20
20			1,18	0,012	1,17
25			1,16	0,012	1,16
30			1,145	0,012	1,14
35			1,13	0,012	1,12

Do obliczeń ρ przyjęto następujące wartości x:

- dla instalacji wentylacyjnej pracującej w warunkach zimowych bez nawilżania powietrza przyjęto:

$$x = 0,0028 \text{ kg/kg}$$

- dla instalacji wentylacyjnej pracującej w przeciętnych warunkach letnich lub przy nawilżaniu powietrza w zimie przyjęto:

$$x = 0,012 \text{ kg/kg}$$

Jeżeli ciśnienie bezwzględne statyczne powietrza w warunkach badania jest inne niż $p = 100\ 000$ Pa, wówczas gęstość odczytaną z tabeli należy przeliczyć wykorzystując następujący wzór:

$$\rho_1 = \rho \frac{p_1}{p} \quad (6)$$

ρ - gęstość powietrza odczytana z tab., kg/m³,
 p - bezwzględne statyczne ciśnienie, $p = 100\,000$ Pa,
 p_1 - wartość statycznego ciśnienia bezwzględnego zmierzonego dla powietrza przepływającego w przewodzie, Pa.

Prędkość średnia w warunkach badania:

$$w_{\acute{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}, \quad \text{m/s} \quad (7)$$

gdzie n liczba pomiarów prędkości miejscowej, przy czym dla przekroju prostokątnego $n = 25$, zaś dla przekrojów kołowych n zależy od średnicy przewodu.

Strumień objętości powietrza wentylacyjnego w warunkach badania:

1. dla przewodów kołowych

$$V = w_{\acute{s}r} \frac{\Pi D^2}{4}, \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (8)$$

lub

$$V = 3600 w_{\acute{s}r} \frac{\Pi D^2}{4}, \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (8a)$$

przy czym

$$D = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i}{4}, \quad \text{m}$$

gdzie D - jak we wzorze (2)

2. dla przewodów prostokątnych

$$V = w_{\acute{s}r} F, \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (9)$$

lub

$$V = 3600 w_{\acute{s}r} F, \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (9a)$$

przy czym

$$F = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i}{4} \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 B_i}{4}, \quad \text{m}^2$$

gdzie F - jak we wzorze (3).

Przy zastosowaniu mikroprocesorowego manometru MRK wszystkie obliczenia wykonuje wbudowany komputer. Po zdefiniowaniu kształtu przewodów wentylacyjnych, ich wymiarów oraz wilgotności i ciśnienia atmosferycznego, przyrząd określa punkty przekroju, w których należy umieścić sondę pomiarową. Po wykonaniu pomiarów MRK podaje i oblicza następujące wielkości fizyczne: temperaturę, ciśnienie statyczne, ciśnienie dynamiczne w poszczególnych punktach, gęstość powietrza, lokalne prędkości przepływu, średnią prędkość i strumień objętości przepływającego powietrza w badanym przekroju poprzecznym przewodu.

Wyniki mogą być zapisane w pamięci urządzenia lub wydrukowane na drukarce HP z portem podczerwieni.

W laboratorium Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej przeprowadzono weryfikację wskazań mikromanometru elektronicznego MRK, współpracującego z sondą Prandtla, na wzorcowym stanowisku pomiarowym z płynną regulacją strumienia objętości powietrza. Wykonane pomiary pozwalają stwierdzić, że dokładność wskazań badanego układu odpowiada klasie przyrządów pomiarowych dokładnych.