

Przemysław KATEUSZ, Zbigniew POPIOŁEK, Jerzy SZULIKOWSKI
Politechnika Śląska

BADANIA CHARAKTERYSTYK POMIAROWYCH ZWARTYCH RÓŻNICOWYCH SOND CIŚNIENIOWYCH

Streszczenie. Zwarte różnicowe sondy ciśnieniowe, przeznaczone do pomiaru prędkości gazu w przewodach przemysłowych instalacji gazów odlotowych, odznaczają się charakterystykami pomiarowymi, według których empiryczny parametr, tzw. liczba kształtu, jest wielkością zależną zarówno od poziomu prędkości, jak i stanu turbulencji strugi gazu, w której umieszczona jest sonda.

Dla wybranych konstrukcji sond ustalono eksperymentalnie charakterystyki pomiarowe uwzględniające powyższe wpływy warunków zewnętrznego przepływu gazu.

Sondy badano na stanowisku z tunelem aerodynamicznym, dającym możliwość uzyskiwania różnych stanów turbulencji wypływającego powietrza.

INVESTIGATION OF MEASURING CHARACTERISTICS OF COMPACT DIFFERENTIAL PRESSURE PROBES

Summary. So-called compact differential pressure probes, which are designed to measure gas velocity in the ducts of industrial waste gas installations, have their measuring characteristics according to which the shape factor, being an experimental parameter, depends both on the velocity level and on the state of turbulence of the gas stream a probe is located in.

Measuring characteristics of the selected probe designs were determined by an experiment, in which characteristics the influence of the above-mentioned outer gas flow conditions were included.

The probes were tested on a stand with a wind tunnel that allows to produce different turbulence states of discharging air streams.

1. Wstęp

W Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpyłania Politechniki Śląskiej w Gliwicach prowadzony jest główny cykl badań projektu finansowanego przez Komitet Badań Naukowych pt. „Badania wpływu turbulencji strugi gazu na dokładność pomiaru prędkości różnicowymi sondami ciśnieniowymi” (nr 8 T10C 005 11).

Prace mają charakter eksperymentalny, laboratoryjny. Ich celem jest wyjaśnienie niejednoznaczności pomiaru prędkości gazu dokonywanego za pomocą układów anemometrycznych ciśnieniowych z pewnego typu sondami różnicowymi, nazywanymi tu zwartymi. Odznaczają się one niewielkimi poprzecznymi wymiarami na całej swej długości. Jak inne sondy z tej rodziny, oparte są na zasadzie korelowania prędkości przepływającego gazu z mierniczą różnicą dwóch – odbieranych przez sondy w charakterystycznych miejscach – ciśnień.

Sondy zwarte znajdują zastosowanie w identyfikowaniu rozkładu prędkości gazu i stąd w ustalaniu jego strumienia objętości najczęściej w przemysłowych instalacjach gazów odlotowych, w grubościennych kanałach.

Zawarty w referacie materiał jest pierwszą syntezą wyników projektu badawczego, wykazującą zmienność charakterystyk pomiarowych przedmiotowych sond w zależności od stanu turbulencji strugi gazu, w której dana sonda jest lokowana dla zmierzenia jego prędkości.

2. Przedmiot badań

W celu prowadzenia kontroli emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych do atmosfery bądź ich unosu z urządzeń technologicznych, bądź też skuteczności ich eliminowania z gazów odlotowych naturalną procedurą pomiarową jest identyfikowanie strumienia objętości gazu przepływającego w kanałach przepływowych instalacji przemysłowych. Jedną z często stosowanych metod jest pomiarowe ustalanie rozkładu prędkości gazu w przekroju pomiarowym za pomocą różnicowych sond ciśnieniowych o zwartej poprzecznej budowie na całej swej długości.

Zalecane na świecie i w Polsce (przez odpowiednie zalegalizowane wytyczne) do takiego stosowania – mimo iż opisywane pod kątem swych właściwości aerodynamicznych i metrologicznych jedynie wrywkowo, bez uogólnień – są dwie konstrukcje sond zwartych: sonda walcowa i tzw. sonda typu S. Trzecią odmianą, będącą w szerokiej ofercie handlowej, jest sonda rombowa, której nie towarzyszą powszechnie dostępne, udokumentowane wyniki badań i formalne rekomendacje.

Dwie pierwsze odmiany sond zwartych najczęściej służą do pomiaru prędkości w pojedynczych punktach wewnątrz kanału – analogicznie do sond ciśnieniowych nie

zwartych, o dużych wymiarach poprzecznych, powszechnie znanych jako rurki spiętrzające (typu L). Te dwie sondy zwarte pozwalają jako jedyne na penetrowanie (w czasie doraźnych pomiarów) przekrojów w kanałach o grubych ścianach, np. w kominach ceramicznych. Rzadziej, w aplikacjach typu wentylacyjnego, sondy walcowe są wykonywane w postaci układów jednoczesnego, wielopunktowego pomiaru prędkości w całym przekroju kanału. Z kolei sondy rombów – odwrotnie – znajdują zastosowanie właśnie w układach zwielokrotnionych, wielopunktowych, montowanych na stałe w kanałach, będących częścią systemów monitoringu przepływu zanieczyszczonego gazu w instalacjach.

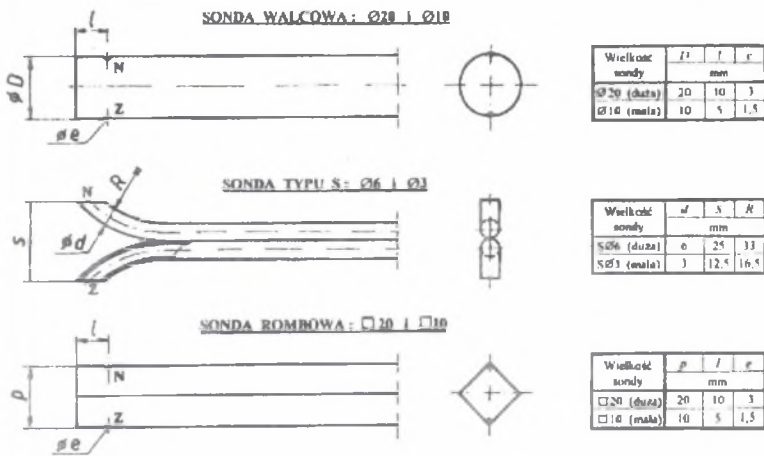
Badaniami laboratoryjnymi objęto każdy z tych typów sond zwartych. Przyjęto takie ich szczegółowe kształty i wymiary, które oddają w sposób najbardziej reprezentatywny najczęściej spotykane konkretne rozwiązania i wielkość. Każda z sond wykonana była w dwóch wariantach wielkościowych wg zasady wzajemnej jednokładności w stosunku 1:2 (dla wygody oba te warianty nazywane tu będą: „sondą dużą” i „sondą małą”). Badane sondy przedstawione są na rys. 1: pięć z nich to specjalnie wykonane egzemplarze badawcze, jedna to egzemplarz z produkcji seryjnej jednego z krajowych wytwórców (firma ZELMOT S.A. – Oddział ZAM Kęty).

Wszystkie różnicowe sondy ciśnieniowe, w tym także i te zwarte, stosowane są w praktyce jako elementy prostych, dobrze znanych w swej idei, układów anemometrycznych. W dwóch miejscach **N** i **Z** na powierzchni każdej sondy zwartej tkwiącej w strudze poruszającego się gazu odbierane są dwa ciśnienia. To odbierane w punkcie **N** jest ciśnieniem całkowitym (ciśnieniem spiętrzenia). To odbierane po zawiętrznej stronie w punkcie **Z** jest mniejsze od ciśnienia statycznego; notowane tam są ujemne wartości współczynników aerodynamicznych, zwanych też współczynnikami ciśnienia powierzchniowego. Oba sygnały pneumatyczne kierowane są do przyrządu mierzącego ich różnicę jako tzw. mierniczą różnicę ciśnień Δp_m . Użytkowanie układu anemometrycznego ze zwartą sondą różnicową wymaga znajomości pewnego empirycznego współczynnika B , zwanego liczbą kształtu danej sondy, występującego w formule obliczania prędkości w przepływającym gazu o znanej gęstości ρ na podstawie wyznaczonej mierniczej różnicy ciśnień:

$$w = \sqrt{\frac{2 \Delta p_m}{B \rho}} \quad (1)$$

Tak funkcjonująca liczba kształtu ma dla sond zwartych wartość większą od jedności. Jej wyznaczenie na drodze eksperymentalnej nakazują w obszarze zagadnień metrologii

przepływów zanieczyszczonych gazów odlotowych wytyczne w wielu krajach (np. [1], tyle że w odniesieniu do przekształconej liczby B). Według krajowej normy [2], dotyczącej grawimetrycznych pomiarów zapylenia gazów w przewodach, liczba kształtu ma być – jako wynik doświadczalnego wzorcowania sond – wyznaczana jako stosunek mierniczej różnicy ciśnień i ciśnienia dynamicznego mierzonego referencyjną rurką spiętrzającą typu L o konstrukcji wg [3].



Rys. 1. Badane zwarte różnicowe sondy ciśnieniowe
Fig. 1. Tested compact differential pressure probes

Autorzy pracy dysponowali przesłankami w postaci: wzmianek w literaturze [4, 5, 6], własnych przypadkowych obserwacji pomiarowych z przeszłości, czy też informacji innych użytkowników tego typu sond, wskazującymi na: 1° – niestabilność liczby kształtu na tle zmienności mierzonej prędkości gazu, 2° – różne wartości B dla tych samych konstrukcji. Pojawiła się w konsekwencji hipoteza, sygnalizowana już w [7], o istnieniu silnej zależności liczby B od ilościowego wyznacznika średniego przepływu gazu, czyli prędkości w lub liczby Re , oraz od jakości przepływu rozumianej jako stan turbulencji strugi, który to stan miałby być identyfikowany zgodnie z uznanymi, a zarazem dostępnymi narzędziami opisu tego zjawiska. Taką zależność przyjęto traktować jako charakterystykę pomiarową danej sondy.

Relacjonowane tu badania koncentrowały się na sprawdzeniu powyższej hipotezy poprzez ustalenie obrazu charakterystyk pomiarowych wspomnianych trzech typów sond zwartych.

3. Procedura badawcza

Tok eksperymentalnego wyznaczania charakterystyk pomiarowych przyjętych do badań sond, który stanowi kluczową część projektu badawczego, bazował na efektach realizacji wcześniejszych etapów projektu, w czasie których opracowano i przebadano odpowiednie stanowisko badawcze z jego technikami pomiarowymi i przygotowano właściwe narzędzia obliczeniowe.

Na stanowisku znajduje się otwarty tunel aerodynamiczny zasilany przez wentylator powietrzem czerpanym z wnętrza laboratorium i filtrowanym w celu zapewnienia czystości na wylocie. Za okrągłą dyszą tunelu, o kontrakcji powierzchniowej 1:4, znajduje się specjalnie spreparowany odcinek wypływowy w postaci prostego przewodu o stałym przekroju 224×224 mm. Ma on zmienną długość i wymienne układy turbulizatorów. W odległości 60 mm od płaszczyzny wylotu tego odcinka usytuowany jest przekrój roboczy strugi wypływowej (przemieszczającej się w wolnej przestrzeni otoczenia), w którym lokowane były badane sondy i najważniejsza aparatura pomiarowa. Układy turbulizatorów w postaci rzędów palisad zbudowanych z wzdłużnych elementów o różnym kształcie i wymiarze poprzecznym (okrągłe walce, listwy, graniastosłupy) generują w przekroju roboczym strugi powietrza o wyrównanym profilu prędkości, zróżnicowane pod względem stanu turbulencji. Produkowane w opisany wyżej sposób przepływy powietrza w przekroju roboczym na stanowisku laboratoryjnym odpowiadać mają turbulentnym przepływom gazów w przewodach instalacji przemysłowych w punktach, gdzie umieszczane są sondy do pomiaru prędkości, czyli poza bezpośrednim sąsiedztwem ścian. Należy wszakże otwarcie w tym miejscu zaznaczyć, że o ile zdefiniowanie stanu turbulencji przepływów we wnętrzach kanałów instalacji (poza warstwą lepka) poprzez intensywność turbulencji o wartości do kilkunastu procent można uznać za wiarygodne, to bliższy obraz realnych struktur wirowych jest trudny do opisanego tak z powodu różnorodności czynników sprawczych turbulencji w kanałach, jak i chociażby przez wzgląd na trudności i rzadkość prowadzenia odnośnych badań poligonowych.

W niniejszych badaniach funkcjonuje dziewięć wariantowych odcinków wypływowych, każdy z określonym układem turbulizatorów. Płynna regulacja obrotów silnika wentylatora zapewnia łatwą zmienność jego wydajności. W zależności od konstrukcji układu turbulizatorów (różna oporność hydrauliczna) maksymalna uzyskiwana prędkość powietrza

w przekroju roboczym osiąga poziom dwudziestu kilku do trzydziestu m/s. Za dolną granicę badawczego zakresu prędkości przyjęto 3 m/s.

Każdy odcinek wypływowy został uprzednio przebadany. W rezultacie znana jest jego charakterystyka przepływowa, tj. związek między prędkością (wyznaczaną z ciśnienia dynamicznego z wzorcowej mikrorurki spiętrzającej typu L) w środku przekroju roboczego a pewnym ciśnieniem korelacyjnym odbieranym w taki sposób z wybranego miejsca odcinka wypływowego, że nie ingeruje się w przekrój roboczy.

Drugim elementem poczynionego wcześniej rozpoznania każdego z 9 odcinków wypływowych była identyfikacja parametrów generowanej przez niego turbulencji strugi w przekroju pomiarowym. Zastosowana tu została technika termoanemometryczna. Czujnik w formie gorącego mikrowłókna odbierał informacje o fluktuacjach wzdłużnych prędkości jako tych, które są dominujące w turbulentnych przepływach gazów w przewodach. Na potrzeby ustalenia intensywności turbulencji czujnik lokowany był w wielu punktach przekroju roboczego dla wielu poziomów prędkości. Z kolei ustalenie parametrów struktury turbulencji przeprowadzono dla środka przekroju i trzech poziomów prędkości reprezentatywnych dla całego danego jej zakresu. W rezultacie odbierania sygnału napięciowego przez mostek, następnie cyfrowego notowania go przez kartę przetwornika A/C w komputerze, transformowania go do przebiegu prędkościowego (dzięki charakterystykom czujników permanentnie weryfikowanym w kolejnych seriach pomiarowych), w końcu dzięki obróbce statystycznej tego przebiegu poprzez narzędzie obliczeniowe przygotowane w arkuszu Excel – wyznaczano m.in. wartości następujących parametrów: intensywności turbulencji ε , makroskali przestrzennej turbulencji Λ (rozmiary dużych form wirowych) i mikroskali przestrzennej turbulencji λ (rozmiary małych form wirowych). Triadę tych parametrów przyjęto w niniejszej prezentacji wyników badań za identyfikator danego tła gazowego, w którym w określony sposób zachowują się poszczególne sondy.

Przepływające tło gazowe do badania sond zwartych odznaczało się w swoich dziewięciu wariantowych stanach zróżnicowaną globalnie turbulencją o następujących wartościach (w różnych konfiguracjach) parametrów: intensywności ε w zakresie $0,4 \div 18\%$, makroskalą długości Λ w zakresie $14 \div 32$ mm i mikroskalą długości λ na poziomie 5 mm.

W obrębie badań zasadniczych, tj. dających rozpoznanie charakterystyk pomiarowych badanych sond zwartych, w każdej z dziewięciu odmiennych co do stanu turbulencji strug powietrza sytuowane były w środku przekroju roboczego kolejno wszystkie z 6 badanych zwartych sond ciśnieniowych. W odpowiedniej odległości za przekrojem roboczym

umieszczone były czujniki temperatury (pomiar rezystancyjny) i ciśnienia statycznego (pobocznica mikrorurki spiętrzającej typu L podłączonej do cyfrowego miernika ciśnienia bezwzględne), a także higrometr włosowy. Tak pozyskiwane parametry powietrza służyły do kontroli jego gęstości. W pełnym dostępnym zakresie prędkości mierzona była (za pomocą cyfrowego mikromanometru różnicowego) charakterystyczna różnica ciśnień Δp_m danej sondy. Wartości prędkości w i ciśnienia dynamicznego p_d , którym odpowiadała aktualnie notowana wartość Δp_m , pochodzą z na bieżąco mierzonego ciśnienia korelacyjnego i znajomości charakterystyki przepływowej danego układu wypływowego.

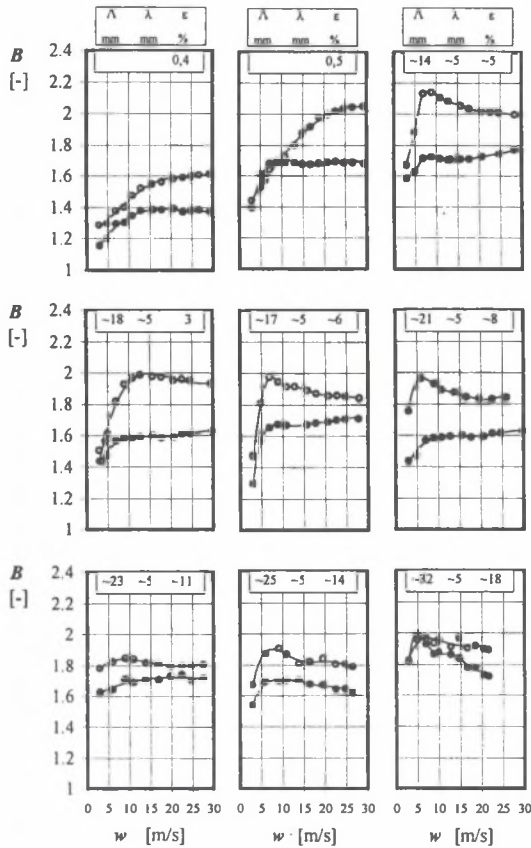
4. Wyniki badań

Na rys. 2 ÷ 4 zestawiono obrazy kształtowania się liczby B . Dany rysunek dotyczy jednej konstrukcji sondy zwartej (kolejno: walcowej, typu S i rombowej). Każdy z dziewięciu wykresów zawartych na rysunku przedstawia zmienność liczby B wraz ze zmianą prędkości gazu w dla dwóch wariantów sond: dużej i małej. Jeden wykres odpowiada określonemu stanowi turbulencji strugi, w której tkwiła badana sonda. Opisuje go zestaw trzech parametrów: intensywności turbulencji ε , makroskali długości A i mikroskali długości λ , których wartości zamieszczone są w ramce w górnej części wykresu.

Liczba kształtu B wyliczana tu jest jako stosunek mierniczej różnicy ciśnień Δp_m odbieranej z sondy i ciśnienia dynamicznego p_d . Istota turbulentnych przepływów (szczególnie tych o dużej intensywności ε) skutkowałą pewną niestabilnością obu mierzonych wielkości Δp_m i p_d ; stąd konieczne było uśrednianie sygnałów ciśnieniowych w ich miernikach z okresem 20 ÷ 30 s. Prędkość gazu występująca na wykresach wyliczana była z tak mierzonego ciśnienia dynamicznego.

Powietrze w strugach wypływowych miało w całym cyklu badań parametry: ciśnienie 971 ÷ 998 hPa, temperaturę 14 ÷ 30 °C i wilgotność na poziomie 30%.

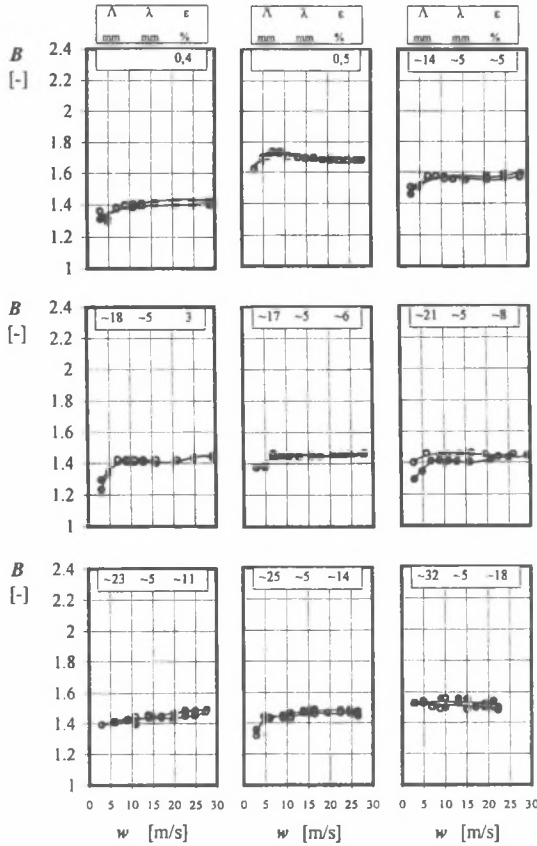
Ogólny obraz zachowania się empirycznego parametru B badanych sond jest następujący: liczba kształtu sond walcowej i rombowej nie jest wielkością stałą. Po pierwsze, zależy ona od wartości prędkości, którą dana sonda ma mierzyć. Szczególnie silnie zmienna, rosnąca, jest w obszarze prędkości poniżej ok. 10 m/s. Dla prędkości większych występuje tendencja do stabilizowania się wartości B wraz ze wzrostem w . Po drugie; funkcja $B(w)$ nie jest jednoznaczna; jest różna dla różnych stanów turbulencji przepływającego gazu.



Rys. 2. Zależność liczby kształtu (B) od prędkości (w) i turbulencji (A , λ , ϵ) przepływającego gazu – dla sondy walcowej: $\varnothing 10$ (•••) i $\varnothing 20$ (••••)

Fig. 2. Dependence of the shape factor (B) on velocity (w) and turbulence (A , λ , ϵ) of flowing gas – for the cylindrical probe: $\varnothing 10$ (•••) and $\varnothing 20$ (••••)

Szczególnie odmienne są jej przebiegi dla słabo turbulentnych przepływów (na rys. 2 i 3 trzy górne wykresy dla ϵ poniżej $3 \div 5\%$ przy różnej A poniżej $14 \div 18$ mm), a także – choć w mniejszym stopniu – dla silnie turbulentnych przepływów (prawy dolny wykres dla ϵ ok. 18% przy A ok. 32 mm). Po trzecie: uzależnienie B od prędkości i turbulencji strugi gazu jest wyraźnie odmienne dla sondy dużej i dla sondy małej – małe sondy odznaczają się generalnie większymi wartościami B . Analiza trzech górnych wykresów dla nisko turbulentnych przepływów wskazuje na prawdopodobny zanik uzależnienia przebiegu $B(w)$ od wielkości sondy dla wyidealizowanego przepływu bez turbulencji.



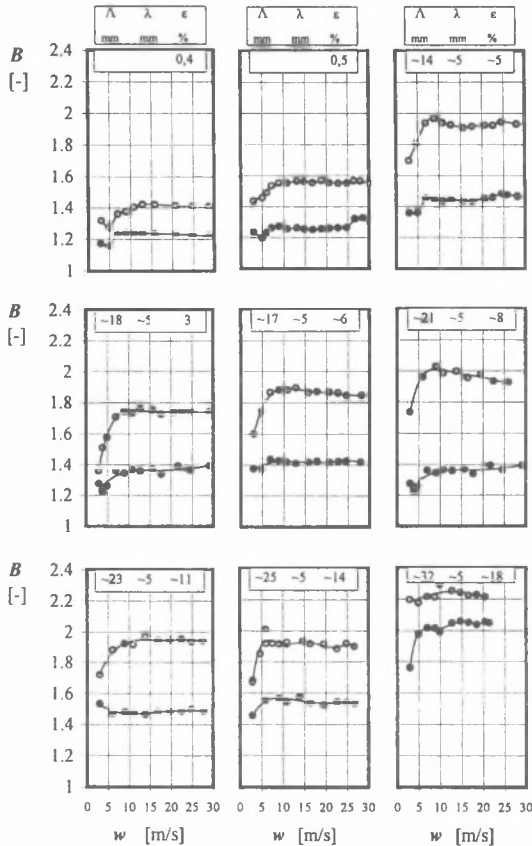
Rys. 3. Zależność liczby kształtu (B) od prędkości (w) i turbulencji (Λ , λ , ϵ) przepływającego gazu – dla sondy typu S: $\varnothing 3$ (•••) i $\varnothing 6$ (••••)

Fig. 3. Dependence of the shape factor (B) on velocity (w) and turbulence (Λ , λ , ϵ) of flowing gas – for the type S probe: $\varnothing 3$ (•••) and $\varnothing 6$ (••••)

Generalnie zaobserwowano rozpiętość wartości liczby kształtu: dla sondy walcowej od 1,16 do 2,14 (zakres 59% w stosunku do wartości średniej); dla sondy rombowej od 1,16 do ok. 2,25 (zakres 64% w stosunku do wartości średniej). Dla porównywalnych prędkości zaobserwowano następujące maksymalne rozbieżności wartości B na tle różnych stanów turbulencji i różnych wielkości sond: dla sondy walcowej od 1,30 do 2,14 (dla $w \approx 7,5$ m/s); dla sondy rombowej od 1,23 do 2,25 (dla $w \approx 10$ m/s).

Dla danej wielkości konkretnej konstrukcji sondy walcowej czy rombowej, rozpatrując prędkości powyżej ok. 10 m/s, można wyodrębnić pewien „zakres sturbulizowania” przepływającego gazu, w którym charakterystykę $B(w)$ można by traktować jako względnie stałą, tj. lokującą się w akceptowalnym pasie wartości B . Dla sondy walcowej $\varnothing 10$ mm

mogłyby to być np. przepływy o intensywności turbulencji $6 \pm 14\%$ przy największych strukturach wirowych rzędu kilkunastu do dwudziestu kilku mm (wykresy od piątego do ósmego). Przyjęty tu za reprezentatywny, jeden przebieg $B(w)$ byłoby wtedy uśrednieniem z maksymalnym błędem względnym wartości B rzędu $\pm 5\%$. Dla sondy rombowej $\square 20$ mm podobne uśrednienie byłoby reprezentatywne dla niższych intensywności turbulencji, ok. $3 \pm 11\%$. Dla innych przypadków takie uśrednienia dają dużo większe błędy.



Rys. 4. Zależność liczby kształtu (B) od prędkości (w) i turbulencji (Λ , λ , ϵ) przepływającego gazu – dla sondy rombowej: $\square 10$ (○) i $\square 20$ (●)

Fig. 4. Dependence of the shape factor (B) on velocity (w) and turbulence (Λ , λ , ϵ) of flowing gas – for the rhombic probe: $\square 10$ (○) and $\square 20$ (●)

Sonda typu S daje obraz kształtowania się liczby B odmienny w stosunku do sond walcowej i rombowej. Parametr B nieznacznie zmienia się z prędkością gazu; za dolną granicę względną stałości można by przyjmować już wartość ok. 5 m/s. Obrazy funkcji $B(w)$

są w przybliżeniu podobne w dość szerokim zakresie intensywności turbulencji niezależnie od jej struktury; odbiegają natomiast od generalnej tendencji dla niskich intensywności poniżej 0,5%. Najbardziej interesującą prawidłowością jest praktyczna niezależność charakterystyki B (w) od wielkości bezwzględnej sondy (krzywe dla sond dużej i małej można uznać w zasadzie za pokrywające się). Gdyby przyjąć jedną reprezentatywną krzywą B (w), to mogłaby obowiązywać ona dla przepływów turbulentnych we wspomnianym zakresie intensywności $3 \div 18\%$ i prędkości > 5 m/s, niezależnie od wielkości sondy, z maksymalnym błędem uśrednienia ok. 5%.

5. Wnioski

1°. Udokumentowana i wyjaśniona została niejednoznaczność wartości empirycznego parametru, tzw. liczby kształtu B zwartych różnicowych sond ciśnieniowych typu walcowego i rombowego. Nie jest to wielość stała. Po pierwsze, liczba B w dużym stopniu zależy od turbulencji i prędkości przepływającej strugi gazu, w której dana sonda jest lokowana jako czujnik układu anemometrycznego. Zjawisko takie tłumaczyć można odmiennym kształtowaniem się warstwy przyściennej (m.in. jej oderwaniem) i w konsekwencji rozkładu ciśnień na powierzchni mniej lub bardziej opływowych ciał – w różnych co do turbulencji przepływach zewnętrznych. Po drugie, liczba B zależy od bezwzględnej wielkości sondy. Ta ostatnia obserwacja potwierdza prawdopodobnie ogólniejszą prawidłowość, tj. skorelowanie B ze wzajemnym związkiem wymiarowym: wielkość opływającego ciała \leftrightarrow jakiś, bliżej nieznan, wskaźnik o wymiarze długości cechujący globalnie wielkość wirów w przepływie.

2°. Wykazano bardzo słaby wpływ tak prędkości, jak i stanu turbulencji przepływającego gazu, a także bezwzględnej wielkości sondy na jej liczbę kształtu dla konstrukcji znanej jako typ S. Dla prędkości poniżej ok. 8 m/s występuje niewielka zmienność B z w ; dla prędkości wyższych przebieg B (w) wyraźnie stabilizuje się.

3°. Jeżeliby kontynuować dotychczas realizowaną koncepcję praktycznego stosowania sond walcowych i rombowych oparta na jednej wartości B lub jednej charakterystyce B (w), to należałoby się zgodzić na poczyniony z założenia błąd jej uśrednienia w obrębie różnorodnych stanów turbulencji. Ustalanie takiej charakterystyki w procedurze wzorcowania musiałoby się odbywać na specjalnych stanowiskach symulujących przepływy turbulentne o intensywności co najmniej 3%. W przeciwnych przypadkach, typowych dla

dotychczasowych procedur, kiedy to tłem gazowym są nisko turbulenty ($\varepsilon < 0,5\%$) strugi wypływające z dysz tuneli aerodynamicznych, otrzymywane zależności $B(w)$ mogą odbiegać swymi wartościami maksymalnie o ok. $40 \div 45\%$ od tych, jakie otrzymano by dla strug turbulentnych, tj. odpowiadających realnym warunkom aplikacji sond. Ponadto wzorcowaniu podlegać musiałyby indywidualnie poszczególne wielkości bezwzględne sond.

W przemysłowej praktyce pomiarowej nie ma możliwości identyfikowania turbulencji przepływu gazu w kanale (poprzez precyzyjny pomiar jej parametrów); nie ma zatem możliwości przypisania konkretnej zastanej sytuacji przepływowej właściwej charakterystyki $B(w)$. Stąd też istnienie wspomnianej jednej uśrednionej zależności $B(w)$ dla danej wielkości sondy byłoby jedynym rozwiązaniem w omawianej tu koncepcji. Takie uśrednienie wprowadzałoby naturalny błąd, który w całym zakresie prędkości $3 \div 30$ m/s sięgałby maksymalnie: dla sond walcowych $\pm 11\%$, dla sond rombów $\pm 18\%$.

W świetle powyższych spostrzeżeń, ze względu na niedogodności wzorcowania sond walców i rombów oraz na niezadowalający poziom ich dokładności pomiarowej rysuje się negatywna ocena przydatności tych czujników do standardowych pomiarów prędkości gazu w kanałach.

4°. Za dogodnie do powszechnej praktyki pomiarowej należy uznać sondy typu S. Mimo iż wzorcowanie tych czujników powinno dla pewności osiąganych wyników przebiegać na stanowiskach generujących tła gazowe o intensywności turbulencji ponad 3%, to za korzyść należy uważać jednolitą postać charakterystyki pomiarowej $B(w)$. Wynikiem wzorcowania w zakresie prędkości $3 \div 30$ m/s, uniwersalnym dla wszystkich wielkości danej konstrukcji sondy tego typu, może być jedna funkcja $B(w)$ wynikająca z uśrednienia z błędem maksymalnym ok. $\pm 5\%$. Wypracowana w niniejszych badaniach technika generowania testowych strug turbulentnych może być podstawą procedur wzorcowania.

5°. Wobec nieodzownych potrzeb dysponowania w pomiarach przemysłowych w przypadkach grubościennych kanałach sondami o zwartej poprzecznej budowie, za akceptowalne wyjście należy uznać stosowanie sond typu S o dokładności odbioru sygnału ciśnieniowego (mierniczej różnicy ciśnień) podanej w p. 4°. Skutkuje to dokładnością wyznaczania prędkości gazu na poziomie $\pm 2,5\%$. Ze względu na pewną zmienność funkcji $B(w)$ dla niższych prędkości (< 8 m/s) za składnik procedury pomiarowo-obliczeniowej należy przyjąć prostą operację iteracyjnego dochodzenia do wartości w (jest ona praktycznie zbędna dla wyższych prędkości).

LITERATURA

1. ISO 9096 - Stationary source emissions – Determination of concentration and mass flow rate of particulate material in gas-carrying ducts – Manual gravimetric method.
2. PN-Z-04030/ 7:1994 - Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną
3. PN-81/M-42364 - Pomiary przepływu płynu. Rurki spiętrzające.
4. Ower E., Pankhurst R.C.: The Measurement of Air Flow. Pergamon Press, Oxford 1977.
5. Ryszka E.: Pomiary zapylenia gazów w przewodach. Śląsk, Katowice 1972.
6. Teisseyre M.: Pyłomierze przemysłowe. Pomiary i Aparatura. FOPA, Warszawa 1995.
7. Kateusz P., Popiołek Z., Szulikowski J.: Problemy pomiaru prędkości gazu zwartymi różnicowymi sondami ciśnieniowymi. Materiały V Ogólnopolskiego Sympozjum "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Inżynierii Środowiska '97"; Gliwice-Wiśła 24-26.04.1997 (Organizator: Kat. Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania Politechniki Śląskiej w Gliwicach).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza

Abstract

The paper gives the first presentation of the results of the tests carried out at the Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, on the behaviour of so-called compact pressure differential probes in gaseous turbulent flows. These probes of different types and commonly used, typical designs are elements of pressure anemometers that serve to measure gas velocity in ducts in industrial waste gas installations. Three following types of probes were selected for tests: a cylindrical one, a type S one and a rhombic one.

In order to make a measurement of gas velocity by means of a given probe one must know – besides the measuring differential pressure and the gas density – the value of so-called shape factor (B).

The shape factor is a quantity determined by experimental calibration. In these investigations, this factor was proven to be a function of: the scale of a probe, the level of velocity to be measured, the state of turbulence of the outer gas flow.

The state of turbulence were here expressed through turbulence intensity, micro length scale and macro length scale. For this identification a hot wire anemometry technique was applied. Different turbulence states of air streams the probes were tested in were generated in a stand with an open wind tunnel equipped with special palisades of turbulizers of miscellaneous shapes and configurations.

The tests showed that calibration of such probes must not be performed in discharging gas streams in low turbulence wind tunnels because the obtained curves considerably differ from those attributed to turbulent flows, typical for real industrial conditions.

Since there is no possibility to identify the gas turbulence state in site measurements of ducted gas velocity, this unknown parameter is the reason of great uncertainty of taking the B value in calculations and thus the reason of great uncertainty of determining the velocity. It is larger for cylindrical and rhombic probes than for type S ones. Depending on global velocity range considered, the uncertainty of B is formed anywhere from ten to twenty % for the former probes and a few % for the latter.