# POLSKA AKADEMIA NAUK · ODDZIAŁ W KATOWICACH

KOMISJA OCHRONY ŚRODOWISKA CZŁOWIEKA REGIONÓW PRZEMYSŁOWYCH

STANISŁAW MIERZWIŃSKI, ZBIGNIEW POPIOŁEK

ANEMOMETRIA I JEJ ZASTOSOWANIE W BADANIACH MODELOWYCH PROCESÓW ODPYLANIA I WENTYLACJI

> WROCŁAW - WARSZAWA - KRAKÓW - GDAŃSK ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

POLSKA AKADEMIA NAUK · ODDZIAŁ W KATOWICACH

KOMISJA OCHRONY ŚRODOWISKA CZŁOWIEKA REGIONÓW PRZEMYSŁOWYCH

# STANISŁAW MIERZWIŃSKI, ZBIGNIEW POPIOŁEK

# ANEMOMETRIA I JEJ ZASTOSOWANIE W BADANIACH MODELOWYCH PROCESÓW ODPYLANIA I WENTYLACJI

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK 1980

Redaktor Wydawnictwa Kinga Kocimska Redaktor techniczny Bożena Pojasek

ANEMOMETRIA

Copyright by Zaklad Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1980 Printed in Poland

### ISBN 83-04-0054-5-X

Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1980. Nakład: 800 egz. Objętość: ark. wyd. 9,00, ark. druk. 9,50. Papier offset. kl. III, 70 g, 70 x 100. Oddano do drukarni w grudniu 1979. Druk ukończono w styczniu 1980. Wrocławska Drukarnia

Naukowa. Zam. 297/79 - T-3 Cena zl 27.-

# SPIS TREŚCI

1.	WST	ĘP ,	5						
2.	PROI	PROBLEMATYKA POMIAROWO-BADAWCZA W DZIEDZINIE							
	ODP	YLANIA GAZÓW I WENTYLACJI	9						
	2.1.	Tematyka badań	9						
	2.2.	Metody badawcze	15						
	2.3.	Charakter badanych przepływów	16						
3.	CHAI	RAKTERYSTYKA PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH STO-							
	SOW	ANYCH DO POMIARU PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU I ANA-							
	LIZY	SYGNAŁU PRĘDKOŚCI	22						
	3.1.	Wymagania stawiane anemometrom w badaniach procesów							
		odpylania i wentylacji	22						
	3.2.	Właściwości kierunkowe anemometrów	23						
	3.3.	Przegląd przetworników stosowanych do pomiaru prędkości							
		przepływu odpylania i wentylacji	28						
	3.4.	Przetworniki pomiarowe stosowane do analizy sygnału							
		prędkości	31						
4.	MET	ODY WZORCOWANIA ANEMOMETRÓW	38						
	4.1.	Wzorcowanie anemometrów w przepływie powietrza	39						
	4.2.	Wzorcowanie anemometrów w przepływie wody	50						
5.	ANE	MOMETR Z GORĄCYM DRUTEM	57						
	5.1.	Zasada działania anemometru z gorącym drutem	57						
	5.2.	Przygotowanie anemometru z gorącym drutem do pomiarów	60						
	5.3.	Czułość anemometru z gorącym drutem na fluktuacje oraz							
		na zmiany właściwości fizycznych powietrza	68						
	5.4.	Czułość kierunkowa anemometru z gorącym drutem	77						
	5.5.	Interpretacja sygnału anemometru z goracym drutem	82						

	5.6.	Sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej	
		w silnie burzliwych przepływach	95
6.	ANE	MOMETR LASEROWY	101
	6.1.	Właściwości pomiarowe anemometru laserowego	101
	6.2.	Metody generowania cząstek rozpraszających w anemometrii	
		laserowej	102
	6.3.	Przygotowanie anemometru laserowego do pomiarów	109
7.	ZAS	TOSOWANIE ANEMOMETRII DO BADAŃ MODELOWYCH	
	PRO	CESÓW ODPYLANIA I WENTYLACJI	112
	7.1.	Pomiary rozpływu powietrza wentylacyjnego	112
	7.2.	Pomiary prędkości ruchu powietrza w strefie roboczej	
		pomieszczeń wentylowanych	115
	7.3.	Badania struktury przepływu powietrza w strumieniach	
		wentylacyjnych	.117
	7.4.	Pomiary ruchu gazu w cyklonie	122
	7.5.	Badania przepływu w modelu płuczki kontaktowej	127
	7.6.	Pomiary opływu sond pyłowych	131
	7.7.	Pomiary pola prędkości aerozolu w modelu pieca szybo-	
		wego	134
8.	DOD	ATEK. DEFINICJE I PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI	138
9.	LITE	ERATURA	144
10.	ИЗЛО	жение	149
11	STIM	MARY	151

1. WSTĘP

W pracach nad udoskonaleniem procesów odpylania gazów i wentylacji pomieszczeń duże znaczenie mają badania aerodynamiczne, gdyż wciąż jeszcze wiele problemów projektowych i konstrukcyjnych z zakresu aerodynamiki można rozwiązać tylko eksperymentalnie.

Jedną z metod badawczych w tym zakresie jest modelowanie fizykalne, które pozwala znacznie ograniczyć uciążliwe i kosztowne eksperymenty w naturalnych obiektach, a przede wszystkim umożliwia prowadzenie eksperymentu na potrzeby projektowania nowych obiektów.

W badaniach modelowych konieczne jest jednak stosowanie właściwych metod i aparatury pomiarowej. Spośród mierzonych wielkości fizycznych szczególnie ważne są pomiary pól prędkości przepływu, dostarczając wielu informacji o badanym procesie. Skomplikowany charakter przepływów zmusza do stosowania złożonych metod pomiarowych. Metody te wchodzą w zakres anemometrii.

Zarówno modelowanie fizykalne, jak i potrzebne do jego realizacji metody anemometryczne wymagały w przypadku badań procesów odpylania i wentylacji daleko idącego przystosowania i wielostronnego rozwinięcia. Prace badawcze prowadzone od kilku lat w Zakładzie Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej zapoczątkowały i rozwinęły ten eksperymentalny kierunek badań w Polsce. Wiąże się to m.in. z badaniami w ramach problemu węzłowego 10.1.1 (lata 1972-1975), a obecnie problemu węzłowego 10.1. "Metody, instalacje i urządzenia ochrony powietrza atmosferycznego, wentylacji i klimatyzacji", koordynowanego przez OBR BAROWENT w Katowicach.

Szczególnie dużo uwagi poświęcono nowoczesnym metodom pomiaru prędkości, do których można zaliczyć termoanemometrię i anemometrię

laserową. Niniejsza monografia poświęcona jest głównie tym dwom metodom.

W Laboratorium Zakładu OWiOA przeanalizowano i eksperymentalnie zweryfikowano właściwości metrologiczne tych metod. Zastosowana do badań aparatura wymagała wykonania specjalnych urządzeń uzupełniających, jak stanowisk do wzorcowania anemometrów, układów przesuwu do zmiany współrzędnych położenia punktu pomiarowego, generatorów cząstek rozpraszających dla anemometru laserowego i innych.

W monografii omówiono uzyskane w tym zakresie doświadczenie w postaci oceny przydatności różnych układów przetwarzania sygnału anemometrów i interpretacji takich sygnałów w różnych warunkach. Oprócz metodologicznych informacji przedstawiono również niezbędne podstawy teoretyczne oraz niektóre badania i ich wyniki, stanowiące konkretne przykłady zastosowania metod anemometrycznych, doboru i przygotowania aparatury do pracy oraz interpretacji wyników pomiarów, z omówieniem ich dokładności.

Wiadomości zawarte w tej pracy mogą być wykorzystywane przez specjalistów również z innych dziedzin, zajmujących się aerodynamiką ekspęrymentalną. Jednakże, należy zaznaczyć, że zajmowano się głównie zagadnieniami pomiaru małych prędkości, poniżej kilkunastu m/s, w warunkach laboratoryjnych badań modelowych urządzeń odpylających i układów wentylacyjnych.

Autorzy mają nadzieję, że niniejsza monografia, pierwsza w Polsce w całości poświęcona anemometrii, przyczyni się do szerszego zastosowania tej nowoczesnej techniki pomiarowej, jak również będzie inspiracją do dalszego jej rozwoju.

#### Oznaczenia

А,	В -	współczynniki,
D	-	średnica [m],
F	-	powierzchnia,
K		współczynnik,
L	-	skala całkowa,
N	-	liczba próbek,

Nu	- liczba Nusselta,
P(S)	- dystrybuanta,
Pr	- liczba Prandtla lub prawdopodobieństwo,
R	- oporność $[\Omega]$ ,
Re	- liczba Reynoldsa,
R	- autokorelacja,
R <sub>\$152</sub>	- interkorelacja,
S	- zmienna losowa,
ŝ	- wartość średnia,
S'	- fluktuacja,
s' <sup>2</sup>	- wariancja,
s*	- wartość skuteczna,
T	- temperatura [K],
υ	- napięcie [V],
v	- natężenie przepływu [m <sup>3</sup> /s],
W	- prędkość m/s,
Φ(ω)	- funkcja gęstości widmowej mocy,
ε	- intensywność turbulencji,
a	- stopień nagrzania,
Ъ	- temperaturowy współczynnik zmiany oporności [%/deg] .
d	- odległość, średnica, wymiar charakterystyczny [m],
f	- częstotliwość [Hz],
g	- przyspieszenie ziemskie [m/s <sup>2</sup> ],
h	- wysokość [m],
m, n,	- wykładnik,
Р	- ciśnienie [N/m <sup>2</sup> ],
p(S)	- funkcja gęstości prawdopodobieństwa,
p1(S)	- funkcja rozkładu wartości chwilowych,
$p(S_1, S_2)$	- łączna gęstość prawdopodobieństwa,
r	- promień, odległość [m],
t	- temperatura [°C],
x, y, z	- współrzędne,
α	- kąt między kierunkiem śr. przepływu a normalną do
	włókna czujnika,
B	- współczynnik,

.

7

3	- kąt nachylenia,
Ý	- kąt odchylenia,
φ(ω)	- unormowana funkcja gęstości widmowej mocy,
λ	- współczynnik przewodności cieplnej [W/m·deg],
λ	- mikroskala długości [m],
8	- gęstość [kg/m <sup>3</sup> ],
8	- względny promień,
Ps	- współczynnik autokorelacji,
Paiso	- unormowana interkorelacja,
μ	<ul> <li>współczynnik lepkości dynamicznej [kg/m·s],</li> </ul>
τ	- czas [s],
2	- sympleks temperatury,
ω	- pulsacja [rd/s].

# indeksy

8

d	- dolna,
ef	- efektywna,
g	- górna, gaz,
i, j, k,	1 - liczby naturalne,
L	- linearyzator,
m	- mikroskala,
0	- osiowa, odniesienia,
р	- próbkowanie,
r	- promieniowa,
s	- styczna, włókno czujnika,
t	- gorące,
w	- wlotowy, wylewania,
х, у, z	- składowe we współrzędnych kartezjańskich,
z	- zimny, ziarno.

### 2. PROBLEMATYKA POMIAROWO-BADAWCZA W DZIEDZINIE ODPYLANIA GAZÓW I WENTYLACJI

Anemometria jako narzędzie badawcze w aerodynamice eksperymentalnej umożliwia uzyskanie istotnych informacji o polu prędkości przepływającego płynu. Może być źródłem informacji ilościowych o składowych wektora prędkości średniej, o wartościach skutecznych fluktuacji podłużnych i poprzecznych tego wektora, o korelacjach drugiego i wyższych rzędów między składowymi fluktuacji prędkości, o rozkładach prawdopodobieństwa wartości chwilowych prędkości, o szybkości i charakterze zmian prędkości w czasie i przestrzeni. Anemometria daje zatem szczegółową informację o strukturze turbulentnych przepływów. Stąd jej duże znaczenie w aerodynamice eksperymentalnej.

Znaczenie i możliwości anemometrii w badaniach procesów wentylacji i odpylania mogą być określone na podstawie analizy tematyki prac badawczych prowadzonych w tych dziedzinach.

#### 2.1. Tematyka badań

Skuteczność działania urządzeń odpylających, urządzeń chemicznego oczyszczania gazów odlotowych, urządzeń wentylacyjnych i klimatyzacyjnych oraz układów wentylacji pomieszczeń w wysokim stopniu zależy od właściwego ukształtowania przebiegu zjawisk aerodynamicznych, związanych z tymi procesami.

Zorganizowanie w odpylaczu ruchu samego gazu jako nośnika pyłu stwarza lepsze warunki do wykorzystania sił warunkujących ruch i separację zanieczyszczeń pyłowych. Podobnie ruch gazu w obrębie obudowy hermetyzującej źródło pylenia warunkuje skuteczność jej działania i jest ściśle związany m.in. z kształtem takiej obudowy.

W technice odpylania wykorzystuje się różne siły i mechanizmy działania do wytrącania pyłu z płynącego gazu. W elektrofiltrach są to siły pola elektrostatycznego, w mechanicznych odpylaczach – siły masowe, w mokrych odpylaczach – siły zderzeń międzyfazowych, w filtrach – dyfuzja, siły masowe i szereg innych. Przy hermetyzacji istotne jest unoszące działanie ukierunkowanych strumieni powietrza.

Wszystkie te zjawiska odbywają się w płynącym gazie. Zatem ruch samego gazu, struktura burzłiwości tego ruchu, ukształtowanie pola prędkości i ciśnień - mają istotne znaczenie. Znaczenie to wciąż wzrasta, w miarę jak chcemy uzyskać lepsze skuteczności działania, gdyż wtedý chodzi o coraz drobniejsze ziarna, o coraz delikatniejsze działania. Ważne jest to, czy ruch samego gazu jest odpowiednio uporządkowany w znaczeniu ukształtowania pola prędkości, stopnia turbulencji itp., czyli czy ruch ten sprzyja coraz to wraźliwszym procesom separacji pyłu.

Proces wentylacji polega głównie na zorganizowaniu ruchu powietrza w pomieszczeniu i na stworzeniu tam pożądanych pól prędkości i temperatur powietrza, do czego potrzebne są urządzenia wentylacyjne o odpowiednich charakterystykach aerodynamicznych.

Przewietrzalność obszarów zabudowy przemysłowej czy miejskiej wymaga poznania zjawisk opływu terenu przez wiatr i naturalnych ruchów powietrza atmosferycznego, a następnie wykorzystania sił towarzyszących tym zjawiskom.

Z podanego krótkiego przeglądu problematyki aerodynamicznej w dziedzinie odpylania i wentylacji można zorientować się, jak istotne jest jej znaczenie dla rozwoju wymienionych dziedzin. Bardziej szczegółową tematykę prac badawczych w tym zakresie ilustrują przykłady badań już zrealizowanych, względnie aktualnie prowadzonych w Zakładzie OWiOA, ujęte w grupy problemowe.

1. Poprawa kształtu elementów konstrukcyjnych urządzeń odpylających ze względu na uzyskanie wysokiej skuteczności procesu odpylania gazów w elektrofiltrach, płuczkach pianowych i uderzeniowych i w cyklonach (rys. 2.1 i 2.2).

2. Poprawa kształtu części szybowej pieca do wytopu kamienia mie-



Rys. 2.1. Wizualizacja przepływu w modelu elektrofiltra



Rys. 2.2. Spiralny tor ziaren pyłu w cyklonie



Rys. 2.3. Stanowisko badań modelowych pieca szybowego w skali 1:5



Rys. 2.4. Modelowanie pracy okapu elektrycznego pieca łukowego typu 21-m, skala modelu 1:7,2

dziowego w celu zmniejszenia ilości pyłu unoszonego przez gazy odlotowe (rys. 2.3).

 Badania nad usprawnieniem procesów chemicznego oczyszczania gazów odlotowych przez poprawę hydromechanicznych warunków przepływu w reaktorze.

 Modernizacja konstrukcji sondy zerowej dla izokinetycznego poboru próbki zapylonego gazu.

5. Wyznaczanie kształtu obudowy hermetyzującej i dobór warunków odciągu gazów dla elektrycznych pieców łukowych, krat wstrząsowych i węzłów przesypowych w transporcie materiałów sypkich (rys. 2.4).

6. Wyznaczanie ilości zasysanego powietrza przez spadający materiał sypki do wnętrza obudowy hermetyzującej węzły przesypowe.

7. Opracowanie metod rozdziału powietrza w wentylowanych pomiesz-



Rys. 2.5. Wnętrze modelu wentylacji sali amfiteatralnej



Rys. 2.6. Model ogrzewania powietrznego pawilonu szklarniowego



Rys. 2.7. Stanowisko do badań modelowych aeracji walcowni rur z dachem gąsienicowym model wycinkowy w skali 1:50

czeniach dla uzyskania zamierzonego przestrzennego rozkładu temperatury i prędkości powietrza względnie stężeń zanieczyszczeń gazowych, zrealizowane do wentylacji sal amfiteatralnych i domów towarowych, do ogrzewania powietrznego hal przemysłowych i pawilonów szklarniowych, do wentylacji hal przemysłowych o różnych technologiach i obciążeniach ciepłem, wilgocią i zanieczyszczeniami oraz do wentyłacji pomieszczeń o wymaganym wysokim stopniu czystości powietrza (rys. 2.5 i 2.6).

8. Opracowanie układów wywietrzników i dachów hal o dużych zyskach ciepła, zapewniających skuteczną wymianę powietrza, a jednocześnie korzystnych z punktu widzenia konstrukcji budowlanej.

9. Wypracowanie metod badania parametrów ruchu powietrza w strumieniach swobodnych i we wtórnych przepływach do doboru uzbrojenia wentylacyjnych otworów nawiewnych.

10. Aerodynamiczna optymalizacja kształtu elementów urządzeń wentylacyjnych, np. aparatów ogrzewczo-wentylacyjnych, nawiewników elementów regulacyjnych.

#### 2.2. Metody badawcze

Charakterystyczną cechą wymienionych powyżej procesów jest duża różnorodność i zindywidualizowanie warunków geometrycznych oraz zjawisk aerodynamicznych i cieplnych, występujących w rozważanych obiektach, a zatem także różnorodność możliwych rozwiązań. Istotne jest również, że procesy te powinny być zdeterminowane już w projektach układów i konstrukcjach urządzeń odpylających lub wentylacyjnych.

Przy rozwiązywaniu zagadnień naukowych i technicznych w omawianych dziedzinach problemy aerodynamiczne stwarzają z reguły duże trudności, gdyż ich rozwiązanie przeważnie wymaga eksperymentu. Szczególnie potrzebny jest rozwój możliwości eksperymentalnego analizowania różnych koncepcji rozwiązań układów wentylacji czy odpylania, a także eksperymentalnego ustalenia korzystnego kształtu oraz zakresu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych urządzeń. Ujęcie badań oraz stosowane metody badawcze i pomiarowe muszą być różnorodne i często specyficzne z racji różnorodności praktycznych zagadnień, jakie trzeba rozwiązywać.

Należy tu nadmienić, że w omawianych dziedzinach problematyka aerodynamiczna w przemyśle i budownictwie jest zarówno obszerna oraz wielostronna, jak i często nie rozwiązywana prawidłowo właśnie z powodu braku danych eksperymentalnych. Warto też zaznaczyć, że problemy te wiążą się w przemyśle z angażowaniem dużych mocy energetycznych potrzebnych do kierowania dużymi masami powietrza, a także przy obecnej produkcji krajowej wynikają znaczne koszty i straty w wyniku niskich sprawności urządzeń odpylających lub wentylacyjnych.

Do rozwiązywania tego typu zagadnień, których stopień poznania jest w kraju niewystarczający, rozwinięto w Zakładzie OWiOA specjalne metody badawcze, a mianowicie:

 wyspecjalizowano się w zakresie fizycznego modelowania złożonych zjawisk aerodynamicznych i cieplnych oraz procesów w układach 2-fazowych, co pozwala na eksperymentalne analizowanie różnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych w dowolnym czasie, i to przed wybudowaniem rzeczywistego obiektu, w tym zwłaszcza analizowanie kształtu urządzeń /1/;  wypracowano szczególową metodykę aerodynamicznych badań elementów urządzeń odpylających;

 rozwinięto metody badania struktury przepływów swobodnych i ograniczonych, zwłaszcza indukowanych przepływów wtórnych o słabo zaznaczającym się kierunku, małych prędkościach średnich i dużych składowych poprzecznych;

 wypracowano i wypróbowano metody wizualizacji przepływów, w tym także w układach 2-fazowych gaz-ciecz (odpylacze mokre);

 rozwinięto metody oraz skompletowano aparaturę do pomiaru, rejestracji i przetwarzania danych związanych z badaniami pól temperatury, ciśnień, prędkości i struktury burzliwości w przepływach charakterystycznych dla omawianej tematyki;

 wypróbowano metody łączenia eksperymentu i analiz matematycznych do rozwiązywania zagadnień aparaturowych przy przepływach układu 2-fazowego.

Realizowanie tego kierunku badań eksperymentalnych jest możliwe dzięki stworzeniu specjalistycznego laboratorium Zakładu, dysponującego niezbędnym zestawem aparatury, wypracowanymi metodami badawczymi i wyszkoloną kadrą badaczy, obejmującą specjalistów z zakresu badanych procesów, elektroniki, fizyki i matematyki.

W działalności tego laboratorium duży wysiłek włożono w rozwój metod anemometrycznych i ich praktyczne zastosowanie.

#### 2.3. Charakter badanych przepływów

Aby scharakteryzować przepływy objęte badaniami, należy uwzględnić:

- rodzaj i liczbę faz przepływającego czynnika,
- temperaturę i prędkość czynnika,
- charakter zmian tych parametrów w czasie i przestrzeni.

W urządzeniach odpylających i układach wentylacji przepływającym czynnikiem jest powietrze lub inne gazy często unoszące różne zanieczyszczenia, które występują w stanie stałym, ciekłym i gazowym. Zanieczyszczenia pylowe mają różne stężenia i różny skład frakcyjny. W trakcie zachodzących procesów stężenie zanieczyszczeń może ulegać zmianie.

## Tabela 2.1

Wyszczególnienie	Temperatura Ciśnienie		Prędkość	Natężenie przepływu	Stężenie za- nieczyszczeń	Uwagi
E S DE S S S S S S	[K]	[N/m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[g/m <sup>3</sup> ]	
Urządzenia odpylające	135 31 1					
Mechaniczne urządzenia odpylające	290-575	600-1500	0,5-20	do 2,0	do 200	
elektrofiltry filtry tkaninowe mokre urządzenia	290-780 290-525	100-300 500-1500	0,1-1,5 0,1-1,0	do 150 do 20	do 150 do 50	dla jednej sekcji
odpylające	290-800	300-15000	0,5-120	do 3,0	do 200	
Hermetyzacja źródeł pylenia						
węzły przesypowe kraty wstrząsowe piece hutnicze	250-550 280-550 280-1500	1,0-100 1,0-200 0,5-300	0,0-5,0 0,0-15 0.0-15	do 3,0 do 25 do 15	do 30 do 5,0 do 10	
Wentylacja						
rozpływ powietrza w ha- lach	283-330	5,0-100	0,0-10	do 15	Kdop	
warunki wentylacji natu- ralnej	250-330	1,0-200	0,0-20	do 30	Kdop	
rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń i prze- wietrzalność terenów	240-330	1,0-500	0,0-25	do 25·10 <sup>4</sup>	do 2,0	

Przykłady stężenia pyłu w różnych procesach odpylania i wentylacji podano w tabeli 2.1. Zanieczyszczenia zawarte w gazach przy wystarczająco dużym stężeniu mogą spowodować zmiany w strukturze przepływu i stać się źródłem jej stabilizacji lub destabilizacji /2/.

Przedmiot badań może być:

- ruch nośnika (powietrza, gazu),

- ruch cząstek zanieczyszczeń (pyłów, cząstek ciekłych).

W wielu przypadkach celowe jest badanie eksperymentalne ruchu gazu, będącego nośnikiem zanieczyszczeń, natomiast z uwagi na trudności pomiarowe ruch samych zanieczyszczeń może być analizowany dodatkowo teoretycznie. Taka metoda jest szczególnie przydatna w rozważaniach ruchu pojedynczych ziaren w polu przepływu. W przypadku bardzo małego stężenia zanieczyszczeń, co ma przeważnie miejsce w procesach wentylacji, w badaniach modelowych można ograniczyć się do pomiaru ruchu czystego powietrza. Przy dużym stężeniu zanieczyszczeń pyłowych, jakie występują w urządzeniach odpylających, obecności tej fazy nie można pominąć w badaniach. Ponieważ pełne odtworzenie warunków takiego przepływu w modelu fizycznym jest trudne, badania najczęściej prowadzone są w rzeczywistych obiektach lub modelach w skali naturalnej. Niekiedy w takich przypadkach nawet zbudowanie modelu w mniejszej skali i przyjęcie jako czynnika roboczego jednorodnego płynu daje pożyteczne wyniki i umożliwia optymalizację urządzenia.

Można by więc przyjąć, że w badaniach modelowych procesów odpylania i wentylacji czynnikami roboczymi są jednorodne płyny: powietrze względnie woda.

Obecnie możliwości eksperymentalnego badania ruchu cząstek zanieczyszczeń, a zwłaszcza kropel cieczy, ograniczają się praktycznie do różnych metod, polegających na filmowaniu i fotografowaniu przepływu. Metody te mogą być również do pewnego stopnia źródłem informacji o ich prędkościach. Są to jednak informacje trudne do interpretacji i statystycznej analizy. Niewykluczone, że dalszy rozwój metod pomiarowych doprowadzi do tego, że będzie możliwy pomiar prędkości cząstek poruszających się w płynie z równoczesnym pomiarem ich wielkości i stężenia, a więc będzie możliwe dokładne badanie przepływów wielofazowych. Takie

18

nadzieje budzi zwłaszcza rozwój anemometrii laserowej i cyfrowych metod pomiaru częstotliwości Dopplera.

Z metrologicznego punktu widzenia w modelowaniu fizycznym procesów aerodynamicznych istotna jest nie tyle bezwzględna temperatura badanych czynników, co jej zmienność w czasie i w przestrzeni. Jeżeli przepływ jest izotermiczny lub kwazi-izotermiczny, to w badaniach modelowych można przyjąć czynnik roboczy o temperaturze zbliżonej do otoczenia, co jest bardzo wygodne. Czesto jednak występuje wymiana ciepła i przepływy są nieizotermiczne, jak np. w ogrzewaniu powietrznym czy w wentylacji gorących hal. W badaniach modelowych przepływy muszą być wtedy również nieizotermiczne. Taki przepływ nieizotermiczny charakteryzuje się określonym rozkładem przestrzennym średnich (w czasie) temperatur, występują różne gradienty temperatury. Jednocześnie w każdym punkcie takiego pola przepływu temperatura zmienia się w czasie, występują fluktuacje temperatury. Zmienność temperatury w czasie obrazuje widmo częstotliwościowe. Znajomość średnich temperatur, wartości fluktuacji temperatury, gradientów temperatury i granicznej częstotliwości w widmie fluktuacji temperatury jest interesująca i potrzebna nie tylko z uwagi na badany proces, ale również ze względu na dobór przetwornika pomiarowego do pomiaru prędkości przepływu, ponieważ wszystkie anemometry w mniejszym lub większym stopniu reagują również na zmiany temperatury. Pomiaru fluktuacji temperatury o częstotliwościach poniżej około 2 kHz dokonać można termometrem oporowym z czujnikiem z bardzo cienkiego drutu o średnicy 1 µm i długości 0,4 mm /4, 16/.

Dla scharakteryzowania przepływów nieodzowne są dane odnośnie do średniej prędkości ruchu oraz zmienności prędkości w czasie i przestrzeni. Przeciętne wartości średniej prędkości przepływu w różnych procesach odpylania i wentylacji zawarte zostały w tabeli 2.1. Przy fizycznym modelowaniu procesów zmieniają się te wartości ze względu na wprowadzenie skal modelowania i wynoszą od kilku cm/s do kilkunastu m/s /1/. Intensywność turbulencji zależy od rodzaju i rozmieszczenia czynników zakłócających w tym przepływie. W procesach odpylania i wentylacji spotkać można się z przepływami o bardzo małej intensywności turbulencji, poniżej 1% np. w tzw. wentylacji laminarnej, z przepływami o intensywności turbulencji od kilku do kilkunastu procent, jak np. w przepływach w kanałach i przewodach, a także z przepływami o intensywności turbulencji bardzo dużej, od około 20% do kilkuset procent, jak np. w indukowanych przepływach wtórnych. Znając intensywność turbulencji można oszacować, jakie będą zmiany chwilowych prędkości przepływu. Jeżeli przyjąć gaussowski rozkład prawdopodobieństwa wartości chwilowych fluktuacji, to wiadomo, że wartości fluktuacji prędkości z prawdopodobieństwem 95% mieszczą się w przedziale  $\stackrel{+}{-} 2 W_{\chi}^{*}$ , a więc wartości chwilowe wektora prędkości zmieniają się mniej więcej (nie uwzględniając rozkładów fluktuacji poprzecznych) w zakresie

$$W = \overline{W}(1 \pm 2\varepsilon), \qquad (2.1)$$

gdzie & oznacza intensywność turbulencji.

Przy dużej intensywności turbulencji chwilowe wartości prędkości zmieniają się więc w szerokim zakresie. Z tego typu przepływami mamy do czynienia np. w strefach roboczych większości pomieszczeń wentylowanych, gdy nie docierają do nich główne strumienie nawiewne.

Ważna jest również szybkość zmian fluktuacji prędkości w czasie, charakteryzowana przez funkcję autokorekacji i funkcję gęstości widmowej mocy. Widmo fluktuacji prędkości zawiera zwykle tym wyższe częstotliwości, im większa jest prędkość przepływu. W fizycznych modelach procesów odpylania i wentylacji górna częstotliwość widma fluktuacji prędkości nie przekracza zwykle kilku kHz, natomiast dolna jest rzędu 0,1 - 0,001 Hz. Szczególnie w niektórych typach wentylacji strumieniowej dochodzi do powolnych wahań przepływu o okresie kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu minut.

Niezbędna jest również informacja o wymiarze najmniejszych struktur (wirów) turbulentnych w przepływie. Struktury te charakteryzuje mikroskala turbulencji. Wynosi ona w przepływach o małych i średnich prędkościach parę milimetrów.

Przepływy turbulentne są z samej swojej natury trójwymiarowe, fluktuacje prędkości występują we wszystkich trzech kierunkach układu współrzędnych. Natomiast pola uśrednionych funkcji statycznych, opisujących przepływ, nie zawsze są trójwymiarowe. Można w tym przypadku rożróźnić: jedno, dwu i trójwymiarowe pole uśrednionych funkcji statystycznych przepływu. Właściwości przestrzenne pól przepływu mają związek z metodami pomiaru prędkości. Mogą m.in. informować nas o kierunku przepływu, a przynajmniej o płaszczyźnie, w której leży wektor prędkości średniej. Przy badaniu przepływów obierany jest zwykle kartezjański lub walcowy układ współrzędnych, a wektor prędkości średniej może być rozłożony na trzy składowe do siebie prostopadłe. W wielu przypadkach możemy założyć z góry, że jedna lub dwie składowe wektora prędkości średniej są równe zeru. Jeżeli nieznany jest kierunek wektora prędkości średniej, konieczne jest zastosowanie odmiennej metodyki pomiarowej. Należy najpierw znaleźć kierunek tego wektora albo dokonywać oddzielnych pomiarów składowych tego wektora.

1

# 3. CHARAKTERYSTYKA PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH STOSOWANYCH DO POMIARU PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU I ANALIZY SYGNAŁU PRĘDKOŚCI

lstnieje wiele światowych firm specjalizujących się w budowie anemometrów, jak np. DISA, THERMO-SYSTEMS INC, LAMBRECHT ANEMOSTAT, AIRFLOW DEVELOPMENT, PROMETRON i inne.

W Polsce seryjną produkcję anemometrów elektrycznych uruchomiono w zakładach MERA w Szczecinie, na podstawie opracowań Zakładu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie.

Każdy z produkowanych typów anemometrów ma specyficzne właściwości metrologiczne, z czym wiąże się ograniczony zakres celowości jego zastosowania do konkretnych badań.

3.1. Wymagania stawiane anemometrom w badaniach aerodynamicznych procesów odpylania i wentylacji

Wykorzystując wieloletnie doświadczenie pomiarowe można następująco sprecyzować wymagania, jakim powinny odpowiadać anemometry stosowane w omawianej dziedzinie badań:

zakres pomiarowy anemometru powinien być możliwie szeroki, tzn.
 musi istnieć możliwość pomiaru zarówno małych prędkości w zakresie od
 0,0 do 0,8 m/s, jak i prędkości większych od 0 do 20 m/s,

- jest pożądane, aby anemometr reagował jedynie na prędkość przepływu, a nie był wrażliwy na zmiany innych parametrów fizycznych, jak temperaturę, ciśnienie, wilgotność, lepkość itp., niewrażliwość na zmiany temperatury powinna być wprowadzona przynajmniej w zakresie 0÷60°C,

- wymiary czujnika anemometru powinny być jak najmniejsze, aby nie zniekształcał on pola przepływu, praktycznie powinny być mniejsze od wymiaru najmniejszych znaczących struktur turbulentnych w przepływie,

 układ anemometru powinien reagować również na najszybsze fluktuacje prędkości, jakie występują w przepływie, praktycznie powinien posiadać takie pasmo przenoszonych fluktuacji prędkości, by mierzył je poprawnie od 0 do kilku kHz,

- czujniki anemometru powinny charakteryzować się ściśle określonymi właściwościami kierunkowymi (p. rozdział 3.2), przy czym potrzebna jest możliwość dobierania czujników o właściwościach zgodnych z ich konkretnym zastosowaniem, co jest szczególnie ważne przy określaniu struktury pola prędkości,

 anemometr powinien być stabilny, aby podczas pomiaru nie zmieniały się jego właściwości,

 - czujnik anemometru powinien posiadać możliwie dużą wytrzymałość mechaniczną, powinien być odporny na starzenie i zanieczyszczenie się, aby uniknąć konieczności częstego wzorcowania,

 powinna istnieć możliwość bezpośredniego przyłączenia do anemometru urządzeń rejestrujących i dokonujących statystycznej analizy sygnahu prędkości.

Niestety nie ma obecnie anemometrów, które spełniałyby równocześnie wszystkie wymienione powyżej wymagania. Najdoskonalszy jest dwukolorowy anemometr laserowy, jednak jego wysoka cena sprawia, że jest on trudno dostępny.

Omówione w następnych rozdziałach właściwości metrologiczne anemometrów z gorącym drutem i anemometrów laserowych oraz podane przykłady zastosowań tych anemometrów do badań modelowych procesów odpylania i wentylacji mogą być pomocne przy doborze przetwornika pomiarowego w sposób właściwy dla danego problemu pomiarowego.

#### 3.2. Właściwości kierunkowe anemometrów

W rozdziale tym nieco więcej miejsca poświęcono właściwościom kierunkowym różnych przetworników stosowanych do pomiaru prędkości przepływu. Prędkość przepływu jest, jak wiadomo, wektorem. W przepływach turbulentnych zmienia się w czasie nie tylko moduł wektora prędkości





chwilowej, ale również jego kierunek w przestrzeni. Stąd też zmienia się chwilowa wartość sygnału wyjściowego z anemometru odpowiednio do zmian tych wielkości i ustawienia czujnika anemometru. Zakres możliwych zmian wartości i kierunku wektora prędkości chwilowej ilustruje rys. 3.1. Na rys. 3.1a przedstawiona jest taka zmienność występująca w osi rury przy przepływie turbulentnym o liczbie Re =  $5 \cdot 10^5$ , a na rys. 3.1b analogiczna zmienność w punkcie nazywanym promieniem połówkowym, w którym prędkość średnia jest równa połowie prędkości osiowej w strumieniu swobodnym. Wartości liczbowe przyjęto według /19/. Prawdopodobieństwo, że koniec wektora prędkości chwilowej będzie znajdował się w obszarze ograniczonym linią przerywaną wynosi 99%. Są to dwa jakże róźniące się przykłady przepływów. W pierwszym przypadku wektor pręd-



Rys. 3.2. Ilustracja czułości kierunkowej anemometrów reagujących na: a - jedną składową wektora prędkości B = 1, b - sumę geometryczną dwóch składowych wektora prędkości B = 2, c - moduł wektora prędkości B = 3

kości odchyla się o bardzo mały kąt od kierunku przepływu średniego, natomiast w drugim jego odchylenia mogą wynosić 180°.

W przepływach o niskiej intensywności turbulencji, do kilkunastu procent, wystarcza znajomość właściwości kierunkowych w stosunkowo niewielkim obszarze kątów napływu względem kierunku przepływu średniego. Natomiast w przepływach silnie burzliwych potrzebna jest pełna charakterystyka właściwości kierunkowych czujnika anemometru.

Rysunek 3.2 ilustruje właściwości kierunkowe różnych przetworników pomiarowych stosowanych do pomiaru prędkości przepływu. Wprowadzono przy tym pojęcie efektywnej prędkości. Jest to wskazywana przez anemometr chwilowa wartość prędkości, gdy kierunek wektora rzeczywistej prędkości chwilowej różni się od kierunku obranej głównej osi pomiarowej czujnika anemometru.

Do badania struktury przepływów turbulentnych są najkorzystniejsze przetworniki pomiarowe, które reagują na jedną składową wektora prędkości i posiadają rewersyjne wskazania. Do grupy tej należy np. anemometr laserowy wyposażony w modulator częstotliwości wiązek laserowych oraz anemometr wibracyjny (DISA LVA).

Jeżeli osią główną takiego anemometru jest oś x, to wówczas wartość chwilowa efektywnej prędkości wynosi

$$w_{ef} = w_{x'}$$
 (3.1)

w tym przypadku chwilowe wskazanie anemometru jest równe chwilowej

wartości składowej w<sub>x</sub> wektora prędkości. Jeżeli składowa w<sub>x</sub> ma znak ujemny, to wskazanie anemometru jest również ujemne. Czułość kierunkową takiego przetwornika pomiarowego przedstawioną w układzie biegunowym ilustruje rys. 3.2a. Odległość d od punktu na powierzchni bryły do środka układu współrzędnych jest czułością kierunkową w danym kierunku.

$$d = -\frac{w_{ef}}{w}, \qquad (3.2)$$

gdzie w jest chwilową wartością modułu wektora prędkości

$$w = \sqrt{\frac{2}{w_{x}^{2} + w_{y}^{2} + w_{z}^{2}}}$$
(3.3)

d = 1, gdy kierunek wektora prędkości jest zgodny z osią x;
d = 0, gdy kierunek wektora prędkości jest prostopadły do osi x.
Gdy składowa w jest ujemna, odległościom d należy przypisać znak ujemny, np. d = - 1, gdy zwrot wektora prędkości jest przeciwny do osi x.

Przyrządy o takich właściwościach kierunkowych nadają się dobrze do badania przepływów trójwymiarowych o bardzo dużej burzliwości i do badania przepływów oscylacyjnych. Jednakże ze względu na wymiary czujników, zakres pomiarowy i wymiary badanego obiektu nie zawsze anemometry podanych typów mogą być zastosowane. Istnieją również anemometry, np. anemometr laserowy dwukolorowy /20/, równocześnie dokonujące pomiaru dwóch składowych wektora prędkości. Dzięki temu w prosty sposób wyznaczyć można wartość interkorelacji między tymi składowymi. Anemometr laserowy nie posiadający modulatora częstotliwości wiązek laserowych reaguje na jedną składową wektora prędkości, lecz jest nieczuły na zmianę znaku składowej wektora prędkości, czyli jest nierewersyjny.

Do innego rodzaju anemometrów można zaliczyć anemometry reagujące na sumę geometryczną dwóch składowych wektora prędkości. Właściwości kierunkowe takiego przyrządu opisuje zależność

$$w_{ef} = \sqrt{\frac{2}{x} + \frac{2}{y}}.$$
 (3.4)

Takie właściwości kierunkowe posiada anemometr z gorącym drutem przy prędkościach przepływu powietrza powyżej około 20 m/s. Przy mniejszych

prędkościach anemometr ten może być traktowany jako anemometr reagujący na sumę geometryczną dwóch składowych tylko z pewnym przybliżeniem, które jest słuszne dla niewielkich kątów odchylenia wektora prędkości od kierunku normalnej do włókna (patrz rozdział 5.5).

Czułość kierunkową takiego anemometru ilustruje rys. 3.2b. W przepływie turbulentnym, przy założeniu, że wektor prędkości średniej pokrywa się z osią x, wektor prędkości chwilowej może być rozłożony na składowe

 $w_x = w + w'_x; w_y = w'_y; w_z = w'_z,$  (3.5)

i otrzymamy

$$w_{ef} = \sqrt{(w + w_{x}')^{2} + w_{y}'^{2}}$$
 (3.6)

Aby wyznaczyć wartość średnią  $w_{ef}$  i wartość wariancji  $w_{ef}^{2}$ , konieczne jest rozwinięcie zależności (3.6) w szereg. Biorąc pod uwagę cztery pierwsze wyrazy rozwinięcia otrzymuje się

$$w_{ef} = \overline{w_{ef}} + w_{ef}^{*} = \overline{w} + w_{x}^{*} + \frac{w_{y}^{*2}}{2\overline{w}} - \frac{w_{x}^{*}w_{y}^{*2}}{2\overline{w}^{2}} - \frac{w_{y}^{*4}}{8\overline{w}^{3}} + \frac{w_{x}^{*2}w_{y}^{*2}}{2\overline{w}^{3}} + \cdots$$
 (3.7)

Jeżeli intensywność turbulencji przepływu jest mała, w równaniu (3.7) można pominąć wszystkie wyrazy zawierające iloczyny między fluktuacjami prędkości rzędu drugiego i wyższych. Otrzymuje się wówczas

$$\overline{w}_{ef} + w'_{ef} = \overline{w} + w'_{x}$$

a więc

$$\overline{w}_{ef} = \overline{w}; \quad \overline{w'_{ef}^2} = \overline{w'_{\chi}^2}.$$
 (3.8)

Zatem takim anemometrem przy niskiej intensywności turbulencji przepływu można w prosty sposób zmierzyć wartość średnią prędkości i wartość wariancji fluktuacji podłużnych wektora prędkości.

Przy większej intensywności zależności (3.8) trzeba uznać za niewłaściwe i wówczas po uśrednieniu równania (3.7) uzyskuje się

$$\overline{w_{ef}} = \overline{w} \left[ 1 + \frac{\overline{w_{y}^{\prime 2}}}{2\overline{w}^{2}} - \frac{\overline{w_{x}^{\prime w} y^{\prime 2}}}{2\overline{w}^{3}} - \frac{\overline{w_{y}^{\prime 4}}}{8\overline{w}^{4}} + \frac{\overline{w_{x}^{\prime 2} w_{y}^{\prime 2}}}{2\overline{w}^{4}} \right]$$
(3.9)

oraz korzystając z (3.7) i (3.9)

$$\overline{w_{ef}^{\prime 2}} = \overline{w_{x}^{\prime 2}} + \frac{\overline{w_{x}^{\prime w} y}^{2}}{\overline{w}} - \frac{\overline{w_{x}^{\prime 2} w_{y}^{\prime 2}}}{\overline{w}^{2}} + \frac{\overline{w_{y}^{\prime 4} - w_{y}^{\prime 2}}}{4 \overline{w}^{2}}.$$
 (3.10)

Do pomiaru prędkości przepływu wykorzystywane są również anemometry niekierunkowe, tzn. reagujące na moduł wektora prędkości chwilowej. Właściwości kierunkowe takiego anemometru ilustruje rys. 3.2c. Takie właściwości posiadają między innymi anemometr z gorącym termistorem perełkowym /21/ oraz anemometr ze sferycznym czujnikiem foliowym /22/. Stosowane są one do pomiaru prędkości przepływu w obiektach wentylowanych. Anemometry takie dają znacznie więcej informacji o charakterze przepływu. Prędkość traktowana jest w tym przypadku jak wielkość skalarna. Wartość średnia prędkości otrzymana ze wskazań takiego anemometru jest średnią wartością modułu wektora prędkości, natomiast zmierzone fluktuacje odpowiadają fluktuacjom modułu wektora prędkości.

# 3.3. Przegląd przetworników stosowanych do pomiaru prędkości przepływu w badaniach procesów odpylania i wentylacji

Pomiar prędkości przepływu można uzależnić od przebiegu wielu zjawisk fizycznych zachodzących w przepływach. Opierając się na tych zjawiskach można zbudować różne typy anemometrów. Przykładowo, wykorzystuje się działanie sił parcia na elementy umieszczone w płynach do budowy anemometrów mechanicznych, zależność zjawiska konwekcyjnej wymiany ciepła od prędkości przepływu do budowy anemometrów kalorymetrycznych, a zjawisko zmiany częstotliwości promieniowania rozproszonego na cząsteczkach poruszających się w płynie do budowy anemometrów dopplerowskich. Każde z tych zjawisk może być wykorzystane w różny sposób, stąd też istnieje wielka rozmaitość budowanych obecnie anemometrów. Prezentowany przegląd anemometrów ograniczono tylko do rozwiązań obecnie praktycznie stosowanych. Pominięto wiele interesujących rozwiązań, które są obecnie albo rzadko stosowane, albo wykazują niewielką przydatność do badań w dziedzinie odpylania i wentylacji.

W tabeli 3.1 zestawiono właściwości najczęściej stosowanych prze-

28

# Tabela 3.1

Właściwości stosowanych przepływu ' +++ z ++ s - m	i różnych przetworników n do pomiaru prędkości zalecany stosowany niestosowany	Zakres míerzo- nych prędkości	Wymiary czuj- nika pomiaro- wego	Rodzaj właści- wości kierun- kowych czujni- ka	Częstotliwość graniczna mie- rzonych fluktu- acji prędkości	Pomiary w za- nieczyszczonym powietrzu	Pomiary w oblektach rzeczywistych	Pomiary w modelach fizykalnych	Stosowany w laboratorium Zaki, Ogrzewn. Went. i Ochr. Atm.	Źródio literaturowe
TYP PRZETWORNIKA POMIAROWEGO		W [m/s]	d [mm]	в	f [kHz]	15-11	1	-	414-11	1-1-18
	z gorącym drutem	od 0,1	0,5 do 5	~ 2	2 000	-	++	+++	tak	23,24, 16
1.8	z gorącą warstwą	od 0,1	1 do 2	~ 2	100	++	++	+++	tak	16,23
mom el	warstwowy sferyczny	0,05 do 1,0	2,6	3	0,008	-	+++	+++	nie	22
moan	wibracyjny	-0,3 do +0,3	5,25	1	0,1	-	++	++	tak	25
Te	oscylacyjny	0,1 do 30	5 do 40	1	-		++	. ++	tak	26
g . C .	termistorowy	0,05 do 50	0,5 do 8	~ 3	0,003	19 10	+++	+++	tak	27,21
Kz	statermometr	0,15 do 5	20	~ 3		+++	+++	-	tak	3
Ar	nemometr laser,owy	nicogra- niczony	0,01:0,3 <sup>×</sup>	1	1	++	-	+++	tak	20
	z mikromanometrami cieczowymi	od 4	3 do 20	~ 1	- 1	**	++	-	tak	
kı etr zające	z mikromanometrami pojemnościowymi	od 0,1	3 do 20	~ 1	0,1	++	++	+++	tak	8
split	z uchylną płytką spiętrzającą	0,03 do 30	8	~ 1	-	++	***	++	tak	29
i i	skrzydełkowe	0,2 do 20	20 do 100	~ 1		++	+++	++	tak	29
anemol try mo	czaszowe	1 do 50 .	50 do 150	~ 2		++	++		tak	29

tworników do pomiaru prędkości przepływu. W zestawieniu tym jako dolną granicę zakresu pomiaru prędkości przyjęto wartość 10% najmniejszego zakresu pomiarowego, jeśli wytwórca nie podawał inaczej.

Anemometr laserowy posiada praktycznie nieograniczony zakres pomiarowy. Jako częstotliwość graniczną mierzonych fluktuacji przepływu przyjmuje się zwykle częstotliwość, przy której następuje 3 dB spadek wzmocnienia. Z wyjątkiem anemometru laserowego wszystkie wymienione w tabeli 3.1 anemometry muszą być wzorcowane. Rurki spiętrzające i anemometry mechaniczne powinny być wzorcowane po wykonaniu. Nie wymagają one częstego wzorcowania, jeśli jest zachowana ich pełna sprawność techniczna. Natomiast termoanemometry wymagają częstego wzorcowania, praktycznie przed i po zakończeniu każdej serii pomiarowej.

Przydatność termoanemometrów i anemometrów laserowych do badań modelowych procesów odpylania i wentylacji omówiona zostanie bardziej szczegółowo w następnych rozdziałach. Rurki spiętrzające Prandtla, Pitota, Forth Manna, sondy cylindryczne, grzebieniowe i kulowe są w takich badaniach z uwagi na ich złe właściwości dynamiczne, duże wymiary, trudności w przekazywaniu sygnałów - rzadko stosowane. Mogą hyć stosowane w dużych modelach, w przepływach o niskiej intensywności turbulencji, przy niewielkich gradientach ciśnienia i prędkości. W tego typu przepływach mogą być wykorzystane do pomiaru średniej prędkości przepływu.

Nieco większą przydatność do badań modelowych w omawianych dziedzinach posiadają mikrorurki spiętrzające, współpracujące z czułymi mikromanometrami pojemnościowymi. W tym przypadku możliwy jest pomiar małych prędkości już od ułamków m/s. Jeśli natomiast mikromanometr wyposażony jest dodatkowo w układ pierwiastkujący, linearyzujący zależność napięcia wyjściowego od prędkości, i posiada dość dobre właściwości dynamiczne, to mikrorurki spiętrzające mogą być wykorzystane do pomiaru w przepływach o dość znacznej intensywności turbulencji. Ich zaletą w porównaniu z termoanemometrami jest znacznie mniejsza czułość na zmiany temperatury płynu. Wynosi ona około 0,2 %/deg, co umożliwia pomiary w nieizotermicznych przepływach. Inne ich zalety to większa wytrzymałość mechaniczna, mała wrażliwość na zanieczyszczenia gazu, brak konieczności częstego wzorcowania. Anemometry mechaniczne skrzydelkowe i czaszowe mają również małą przydatność ze względu na duże wymiary, złe właściwości dynamiczne i małą czułość. Nieco szerzej stosowane mogą być mikromanometry skrzydełkowe o średnicy około 20 mm, wyposażone w przetworniki fotoelektryczne.

3.4. Przetworniki pomiarowe stosowane do analizy sygnalu prędkości

Jeżeli anemometr posiada dostatecznie szerokie pasmo przenoszonych fluktuacji prędkości, to sygnał wyjściowy z anemometru (zwykle napięciowy) będzie się zmieniał w takt zmian wartości wektora prędkości, jak również w takt zmian jego kierunku ze względu na czułość kierunkową czujnika. Charakter tych zmian w przepływach turbulentnych, jakie zazwyczaj występują w rozważanych tutaj procesach, jest stochastyczny. Sygnał z anemometru jest więc typowym procesem stochastycznym i dlatego analizuje się go metodami opisu statystycznego sygnałów stochastycznych. Zagadnienia pomiaru sygnałów stochastycznych zaliczają się do miernictwa dynamicznego /30, 31/.

Opis statystyczny sygnałów stochastycznych można podzielić na dwie grupy. Jedna z nich dotyczy opisu wartości wielkości zmiennych w czasie, druga określa prędkość zmian tych wielkości.

Do funkcji statystycznych opisujących wartości zmieniającego się sygnału należą:

- wartość średnia,
- wartość średniokwadratowa,
- wariancja (wartość średniokwadratowa fluktuacji),
- odchylenie standardowe (wartość skuteczna fluktuacji),
- funkcja rozkładu wartości chwilowych,
- gęstość prawdopodobieństwa wartości chwilowych,
- dystrybuanta.

Predkość zmian sygnału stochastycznego można scharakteryzować przez:

- funkcję gęstości widmowej mocy,
- funkcję autokorelacji.

Niektóre interesujące wielkości fizyczne charakteryzujące pole przepływu

(naprężenia styczne, skale turbulencji) można określić przez porównywanie sygnałów stochastycznych, czyli analizę korelacyjną. Ilościową miarę przydatną do porównywania sygnałów dają w tym wypadku

- funkcja korelacji wzajemnej (interkorelacja),
- łączna gęstość prawdopodobieństwa.

Definicje wyżej wymienionych funkcji stochastycznych oraz podstawowe związki między nimi podano w załączniku Dodatku. Pomiar wartości średniej 5 sprowadza się do dostatecznie długiego czasu uśredniania. Poszukiwana wartość może być uzyskana przez całkowanie i podzielenie otrzymanej wartości przez czas uśredniania  $T_r$ , czyli przez odtworzenie w skończonym czasie operacji matematycznej określonej równaniem (D.1). Według tej procedury działa np. układ całkujący produkowany przez firmę DISA typu 52B30 True Integrator.

Drugi sposób pomiaru wartości średniej polega na przepuszczaniu sygnału przez filtr dolnoprzepustowy (zwykle filtr RC) o dostatecznie niskiej częstotliwości granicznej, aby składowa zmienna na wyjściu filtra była nieznaczna w porównaniu ze składową stałą. Po upływie okresu czasu, równego 3 uo 4 stałych czasowych filtru sygnał wyjściowy staje się miarą szukanej wartości średniej. Ten proces uśredniania jest procesem ciągłym. W taki układ uśredniający zaopatrzony jest w woltomierz cyfrowy produkowany przez firmę DISA typ 55D31 Digital Voltmeter.

Wartość średnia może być również wyznaczona na podstawie przybliżonych wzorów sumacyjnych, będących praktyczną realizacją równania (D.9)

$$\overline{s} \simeq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{K} n_i \cdot s_i,$$
 (3.11)

gdzie

W praktyce czas uśredniania jest ograniczony, co powoduje występowanie różnic pomiędzy poszczególnymi pomiarami procesu stochastycznego. Warunki poprawnych pomiarów można wyznaczyć na podstawie znajomości dolnej i górnej częstotliwości granicznej sygnału, oznaczonych przez  $f_d$ i f. Czas uśredniania powinien spełniać warunek  $\tau_{\rm c} > 1/f_d$ . Jeżeli jest

 $N = \sum_{i=1}^{k} n_i$ 

to uśrednianie na zasadzie idealnego całkowania, czas pomiaru powinien być większy od  $1/f_d$ . Gdy uśrednianie odbywa się w obwodzie RC, to stałą czasową tego obwodu dobiera się z warunku, że  $\tau_o > 1/f_d$ , a wynik może być odczytany po czasie pomiaru  $\tau > (3 \text{ do } 4)/f_d$ .

Jeśli przy wyznaczaniu wartości średniej korzysta się z przybliżonych wzorów sumacyjnych, obowiązuje warunek  $\tau > 1/f_d$ , przy czym częstotliwość próbkowania powinna wynosić  $f_p \ge 2 f_g$ . Ponieważ liczba pobranych próbek wynosi N =  $\tau \cdot f_p$ , zatem powinno się spelnić nierówność N > 2  $f_g/f_d$ . Spelnienie warunku  $f_p \ge 2 f_g$  jest często trudne do zrealizowania. Okazuje się jednak, że jeżeli proces jest stacjonarny, to dokładność pomiaru wartości średniej zależy przede wszystkim od liczby pobranych próbek, a więc czas pomiaru powinien spelniać warunek

$$\tau = \frac{N}{f_p} > 2 \frac{f_g}{f_d} \cdot \frac{1}{f_p}.$$

Poniżej podano przykłady obliczeń potrzebnego czasu uśredniania przy zastosowaniu różnych metod pomiaru wartości średniej. Zakładając, że

$$f_{d} = 0,01 \text{ Hz}, \quad f_{g} = 100 \text{ Hz},$$

otrzymamy następujące czasy uśredniania:

- dla układu uśredniającego z idealnym całkowaniem

$$\tau > \frac{1}{0,01} = 100 \text{ s},$$

dla układu z obwodem uśredniającym RC

$$r > 3...4 \cdot \frac{1}{0.01} = 300...400 \text{ s},$$

- dla uśredniania przez próbkowanie zakładając, że f = 2 f = 200 Hz

$$\tau > 2 \cdot \frac{100}{0.01} \cdot \frac{1}{200} = 100 \text{ s},$$

- przy próbkowaniu z częstotliwością  $f_n = 100$  Hz

$$\tau > 2 \frac{100}{0,01} \cdot \frac{1}{100} = 200 \text{ s.}$$

Wariancję oraz wartość skuteczną fluktuacji mierzy się za pomocą wolto-

mierzy wartości skutecznej, takich jak np. DISA 55D35 RMS Voltmeter. Pomiar wykonywany jest następująco: wartość średnia sygnału odejmowana jest od wartości chwilowej, pozostała po odjęciu składowa zmienna sygnału podnoszona jest do kwadratu, a następnie uśredniona jednym z opisanych powyżej sposobów.

Korzystając z przybliżonych wzorów sumacyjnych można wariancję wyznaczyć następująco:

$$\overline{s'^{2}} \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{K} n_{i}(s_{i} - \tilde{s})^{2}, \qquad (3.12)$$

$$N = \sum_{i=1}^{K} n_{i}.$$

gdzie

Jeżeli częstotliwość próbkowania byłaby mniejsza od  $2f_g$ , może wystąpić zjawisko maskowania, polegające na nakładaniu się składowych o małej i dużej częstotliwości sygnału /31/. Eliminuje się je poprzez zwiększenie częstotliwości próbkowania lub zastosowanie filtru górnozaporowego o częstotliwości  $\frac{1}{2} f_p$ .

Przyrządy pomiarowe służące do pomiaru funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych działają na zasadzie opisanej równaniem (D.6). Mogą one posiadać jedno "okno" pomiarowe (klasę), wtedy w interwale czasu  $\tau_{r}$  zmierzone zostanie prawdopodobieństwo Pr[s<sr( $\tau$ ) < s +  $\Delta$ s]. Położenie tego "okna" może być płynnie zmieniane, co pozwala na pomiar funkcji rozkładu prawdopodobieństwa w całym zakresie zmian s( $\tau$ ). Budowane są również przyrządy posiadające kilkanaście "okien" pomiarowych wzajemnie się dopełniających, pokrywających cały zakres zmian sygnału s( $\tau$ ). Przyrząd ma tyle wyjść, ile okien pomiarowych. Wielkości wyjściowe są proporcjonalne do prawdopodobieństwa, że wartość chwilowa sygnału s( $\tau$ ) będzie zawarta w danym oknie

 $\Pr\left[s_{i} \leq s(\tau) < s_{i+1}\right].$ 

Na zasadzie "przesuwanego okna" działa analizator prawdopodobieństwa amplitudy DISA-SYSTEM 52B00, którego podstawowym elementem jest przyrząd 52B10 Amplitude Comparator.

Przedstawicielem drugiej grupy przyrządów jest klasyfikator KLA 2.

34



Rys. 3.3. Ilustracja zasady działania klasyfikatora KLA 2

W przyrządzie tym zakres zmienności sygnału s( $\tau$ ) jest podzielony na 12 przedziałów o stałej szerokości. Do pomiaru funkcji p<sub>1</sub>(s) wykorzystywana jest w nim metoda impulsowo-czasowa podobnie jak w woltomierzach cyfrowych (p. rys. 3.3). Wielkościami wyjściowymi z klasyfikatora KLA 2 jest liczba impulsów zliczona za pomocą liczników elektromechanicznych 6-dekadowych. Ostatnia dekada jest dekadą elektroniczną. Częstotliwość próbkowania może dochodzić do 400 Hz, ponieważ maksymalna częstotliwość zliczania dla liczników elektromechanicznych wynosi około 40 Hz, a ostatnia dekada jest elektroniczną. Przykładowo liczba impulsów zliczona przez klasę VII jest proporcjonalna do prawdopodobieństwa, że wartość chwilowa będzie w przedziale s<sub>6</sub>  $\leq$  s( $\tau$ ) < s<sub>7</sub>, czyli

 $\Pr\left[s_6 \leq s(\tau) < s_7\right] \approx \frac{n_7}{N},$ 

gdzie

n7 - liczba impulsów zliczona przez licznik Nr 7,

N - liczba wygenerowanych impulsów próbkujących.

Klasyfikator KLA2 może być również wykorzystany do wyznaczania dystrybuanty. Jak wynika z zależności (D.9), (D.10) i (D.11) z pomiaru gęstości prawdopodobieństwa wartości chwilowych wyznaczyć


Rys. 3.4. Układ do pomiaru funkcji gęstości widmowej mocy

można wartość średnią, wariancję i wartość średniokwadratową.

Gdy pomiar funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych wykonywany jest metodą z "przesuwnym oknem", rozkład ten może być automatycznie zarejestrowany na rejestratorze X-Y. Jeśli jednak sygnał zawiera składową zmienną o bardzo małych częstotliwościach, całkowity czas pomiaru funkcji może być bardzo długi, ponieważ obowiązuje żeby czas pomiaru przy jednym położeniu okna spełniał warunek  $\tau > 1/f_d$ . Przy pomiarach funkcji rozkładu wartości chwilowych w układzie z szeregiem dopełniających się wzajemnie "okien" czas potrzebny na pomiar tego rozkładu wynosi jedynie  $\tau > 1/f_d$ .

Zasadę pomiaru funkcji gęstości widmowej mocy sygnału stochastycznego przedstawia rys. 3.4. W układzie analizatora przedstawionym na tym rysunku, w idealnym filtrze pasmowym o paśmie przepuszczania  $(\omega_i - \Delta \omega/2, \omega_i + \Delta \omega/2)$  zostają zatrzymane wszystkie składowe sygnału leżące poza pasmem przepuszczania filtru. Następnie składowe przepuszczone są podnoszone do kwadratu i uśrednione. Wąskie pasmo przepuszczania filtru  $\Delta \omega$ , które jest konieczne do wykrycia ostrych szczytów w widmie częstotliwości, zwiększa czas pomiaru w określonym zakresie badanych częstotliwości.

Odpowiednio do opisanej procedury część całkowitej mocy sygnału, przypadająca średnio na przedział  $\Delta\omega$ , wynosi

$$\Phi (\omega_{i}) = \frac{s'^{2}(\omega_{i})}{\Delta \omega} \qquad (3.13)$$

Analizatory gęstości widmowej mocy realizują zależność (3.13). Wszystkie rzeczywiste filtry mają skończoną tłumienność w paśmie zaporowym. Dlatego przy obliczaniu funkcji gęstości widmowej mocy wariancję otrzymaną dla danej częstotliwości środkowej filtru należy podzielić przez zastępcze pasmo przepustowe takiego rzeczywistego filtru /30/.

Do analizy korelacyjnej niezbędne jest dysponowanie układem linii opóźniającej oraz układem mnożącym. W układach przetwarzania sygnału prędkości z anemometrów stosowane są również wzmacniacze pomiarowe, układy różniczkujące, magnetofony pomiarowe, linearyzatory i inne. Metody linearyzacji anemometrów z gorącym drutem omówiono w rozdziale 5.2, natomiast konkretne układy przetwarzania sygnału przedstawiono w rozdziale 7.

Na zakończenie tego rozdziału należy zaznaczyć, że przedstawione w niniejszej monografii metody analizy i pomiaru sygnału prędkości to w większości metody analogowe. Ze względu na małą dokładność i stabilność takich metod wypierane są one coraz bardziej przez metody cyfrowej analizy sygnałów. W układach cyfrowych szybkie przetworniki analogowo-cyfrowe zamieniają postać sygnału i wprowadzają go do pamięci komputerów, które dokonują jego dalszej analizy. Metody cyfrowej analizy sygnałów wprowadza się do badań przepływów również dlatego, że możliwe jest wówczas tzw. próbkowanie z warunkami w stępnymi (ang. conditional sampling). Przepływy turbulentne charakteryzują się bowiem pewną dwoistością zjawisk, które umykają uwadze przy normalnych metodach analizy sygnałów /5/.

## 4. METODY WZORCOWANIA ANEMOMETRÓW

Anemometry stosowane do pomiaru prędkości przepływu w badaniach modelowych w dziedzinie odpyłania i wentylacji muszą być wzorcowane w powietrzu w zakresie od kilku cm/s do około 30 m/s oraz w wodzie od kilku mm/s do około 5 cm/s, gdyż taki jest zakres mierzonych prędkości.

Stanowiska do wzorcowania powinny spełniać następujące wymagania:

 niedokładność wyznaczania prędkości przepływu nie powinna przekraczać 2%,

w przekroju poprzecznym przepływu w obszarze zajmowanym przez
czujnik anemometru prędkość przepływu powinna być stała, szerokość te go obszaru powinna wynosić przynajmniej kilka średnic czujnika,

 przepływ powinien charakteryzować się jak najmniejszą intensywnością turbulencji, nie większą niź kilka procent,

 powinna istnieć możliwość badania właściwości kierunkowych czujnika przez zmianę jego położenia w stosunku do przepływającego czynnika,

 pożądana jest możliwość zmiany parametrów fizycznych czynnika (temperatury, wilgotności, ciśnienia itp.) dla określenia ich wpływu na wskazania anemometru,

- wzorcowanie anemometru nie powinno być pracochłonne.

Spehienie równocześnie wszystkich wymienionych powyżej wymagań jest praktycznie trudno osiągalne, dlatego stosuje się szereg różnych metod wzorcowania.

Poniżej przedstawiono stanowiska do wzorcowania anemometrów elektrycznych, wykonane w specjalistycznym laboratorium Zakładu Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej. W dużym skrócie omówiono również inne metody wzorcowania, które mogą być stosowane do wzorcowania takich anemometrów w badaniach modelowych procesów odpylania i wentylacji. Należy podkreślić, że wzorcowanie anemometrów elektrycznych jest nieodzownym warunkiem ich właściwego wykorzystania.

#### 4.1. Wzorcowanie anemometrów w przepływie powietrza

Najprostszym sposobem wzorcowania jest porównanie wskazań anemometru ze wskazaniami rurki spiętrzającej Pitota lub Prandtla. Czujnik anemometru i rurka spiętrzająca umieszczone winny być w rejonie przepływu o stałej prędkości. Przepływ o stałej prędkości występuje np. na wypływie z tunelika aerodynamicznego. Metoda ta może być stosowana od kilku do kilkudziesięciu m/s.

Anemometry można wzorcować w przepływie wewnątrz tunelika aerodynamicznego (dyszy Venturiego) /34/. Prędkość przepływu określa się ze spadku ciśnienia w odcinku pomiarowym. Sposób ten może być wykorzystany w zakresie 1 + 200 m/s.

Anemometry wzorcuje się również w swobodnym wypływie z tunelika (dyszy). Czujnik umieszcza się w odległości 1 do 2 średnic otworu wylotowego. Prędkość przepływu wyznacza się na podstawie pomiaru róźnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem tunelika i otoczeniem. Sposób ten jest wykorzystywany w tuneliku TCS-2 /35/ oraz w stanowisku firmy DISA typ 55 D 90 /36/. Stanowisko do wzorcowania DISA 55 D 90 umożliwia wzorcowanie w zakresie od 0,5 m/s do 330 m/s. Wyposażenie tego stanowiska umożliwia automatyczną rejestrację krzywej wzorcowania za pomocą rejestratora X-Y. Ponadto konstrukcja układu pozwala na rejestrację charakterystyki kierunkowej czujnika poprzez zmianę jego położenia kątowego względem strumienia powietrza.

Firma TSI produkuje układ do wzorcowania typ 1125, w którym układ przepływowy posiada kaskadowo zmniejszający się przekrój. Pełny zakres wzorcowania wynosi od 3 cm/s do około 1 Ma /16/. W odróźnieniu od układu DISA 55D90, w którym dla zmiany zakresu wzorcowania wymienia się dyszę, w układzie TSI 1125 zmienia się położenie czujnika z jednego do drugiego przekroju przepływu. Układ TSI 1125 ma szerszy zakres wzorcowania, ale nie umożliwia automatycznej rejestracji krzywej wzorcowania i pomiaru kątowych charakterystyk czujników anemometrów.

W zakresie bardzo małych prędkości przepływu, poniżej 1 m/s, najczęściej stosuje się metodę wzorcowania w rozwiniętym laminarnym przeplywie powietrza przez rurę i metody, w których czujnik anemometru porusza się względem nieruchomego powietrza.

W Zakladzie Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej zbudowano i stosuje się stanowiska do wzorcowania wykorzystujące obie wymienione metody.

# Stanowisko do wzorcowania anemometrów w rozwiniętym laminarnym przepływie powietrza w rurze

Przy wzorcowaniu anemometru w rozwiniętym laminarnym przepływie powietrza jego czujnik umieszcza się w osi rury, dzięki czemu znajduje się on w przepływie o prędkości dwa razy większej od prędkości średniej.

Przepływ powietrza przez rurę wzorcowniczą zwykle wymuszany jest za pomocą tłoka wodnego lub aspiratora wodnego.

W układzie z tlokiem wodnym średnią prędkość przepływu można wyznaczyć przez pomiar masy wody wypierającej powietrze ze zbiornika do rury /6/. W układzie z aspiratorem wodnym przez pomiar wysokości wody i czasu jej wypływu ze zbiornika.

Przy projektowaniu stanowiska zdecydowano się na wymuszanie przepływu przez aspirator wodny, ponieważ zastosowanie tłoka wodnego pociąga za sobą konieczność osuszenia powietrza przed jego doprowadzeniem do czujnika.

Schemat stanowiska przedstawia rys. 4.1. Przyjęto maksymalną prędkość wzorcowania równą 1 m/s, zastosowano rury o średnicach 22 i 30 mm, alternatywnie podłączane do zbiornika aspiracyjnego o średnicy 174 mm. Maksymalny i minimalny poziom wody w zbiorniku przyjęto na wysokości 1,5 m i 0,2 m, przy czym przewidziano odcinki rozbiegowe. Następnie obliczono średnice trzech dysz wypływowych ze zbiornika wodnego. Dokładny tok obliczeń podano w pracy /7/. Po wykonaniu stanowiska sprawdzono wymiary rur i dysz, których średnice wynosiły w rzeczywistości 9,52, 6,02. 3.52 mm.



Rys. 4.1. Stanowisko do wzorcowania anemometrów w rozwiniętym laminarnym przepływie powietrza w rurze: 1 - zbiornik aspiratora, 2 - rury wzorcownicze, 3 - dysze wypływowe, 4 - zbiornik dolny, 5 - pompa

Prędkość w osi rury jest funkcją wysokości słupa wody w zbiorniku aspiratora

$$W_{0} = f(h).$$
 (4.1)

Rozpatrując równanie ciągłości strugi dla odpowiednich przekrojów (oznaczenia zgodnie z rys. 4.1) otrzymuje się

$$F_1 \cdot W_{1 \pm r} = F_2 \cdot W_2, \qquad (4.2)$$

czyli

$$W_{o} = 2 \frac{F_{2}}{F_{1}} \cdot W_{2}.$$
 (4.3)

Można założyć z pewnym przybliżeniem, że w przypadku swobodnego wypływu ze zbiornika prędkość opadania zwierciadła wody zmienia się w zależności od wysokości jej słupa w zbiorniku zgodnie z równaniem

$$W_2 = K_2 \sqrt{h},$$
 (4.4)

czyli

42

$$-\frac{dh}{d\tau} = \kappa_2 \sqrt{h}.$$
 (4.5)

Po scalkowaniu równania 4.5 i przyjęciu, że w chwili początkowej T = 0 wysokość słupa wody jest maksymalna i wynosi h max oraz, że po upływie czasu wylewania  $T_w$  wysokość słupa wody zmaleje do h min, można wyznaczyć wspólczynnik K, następująco

$$K_2 = 2 \frac{\sqrt{h_{max}} - \sqrt{h_{min}}}{\tau_w}$$
. (4.6)

Ostatecznie otrzymuje się zależność na prędkość w osi rury

$$W_{o} = 4 \frac{\sqrt{h_{max}} - \sqrt{h_{min}}}{\tau_{w}} \cdot \frac{F_{2}}{F_{1}} \sqrt{h}. \qquad (4.7)$$

Dokładność wyznaczenia prędkości W zależy głównie od dokładności wyznaczenia współczynnika  $K_2$ , który zależy od wysokości słupa wody i związanych z tą wysokością zmian współczynnika wypływu. Dobór współczynników  $K_2$  może być głównym źródłem błędów. Błędy wynikające z niedokładności pomiaru średnic, wysokości i czasu mogą być pominięte. Konieczne było więc eksperymentalne wyznaczenie zmian tego współczynnika z wysokością i porównanie ich z wartościami wyznaczonymi dla h<sub>max</sub> = 1,5 m i h<sub>min</sub> = 0,2 m.

Jak wynika z danych tabeli 4.1, względna różnica wartości współczynnika  $K_2$  nie przekracza + 2%. Jeżeli założy się wymaganą dokładność wzorcowania anemometru w granicach + 2%, nie ma potrzeby uwzględniania zmian współczynnika  $K_2$  z wysokością. Wystarczy wyznaczyć go przez pomiar czasu wylewania od 1,5 do 0,2 m.

Wykonane stonowisko do wzorcowania anemometrów w rozwiniętym laminarnym przepływie powietrza z aspiratorem wodnym posiada podzakresy prędkości podane w tabeli 4.2. Czas wypływu wody ze zbiornika aspiratora jest rzędu 3 min dla dyszy 9,52 mm, 8 min dla dyszy 6,02 mm i 20 min dla dyszy 3,52 mm. Wzorcowanie anemometru w pełnym zakresie prędkości jest więc dość czasochłonne. Przy długotrwałym użytkowaniu układu dysze wodne mogą ulegać korozji i pokrywają się osadem. Dlatego należy okresowo korygować współczynnik K<sub>2</sub>. Należy również

Tabela 4.1. Względna różnica wartości wspólczynnika K<sub>2</sub> wyrażona w %

Średnica dyszy [mm]	Zmiana wysokości od h <sub>max</sub> do h <sub>min</sub> [m]						
	1,5 do 1,3	1,3 do 1,1	1,1 do 0,9	0,9 do 0,7	0,7 do 0,5	0,5 do 0,3	0,3 do 0,1
ø 3,52	- 1,15	- 1,06	- 0,88	- 0,35	+ 0,78	+ 0,86	+ 3,47
Ø 6,02	- 1,84	- 1,53	- 0,64	- 0,75	+ 0,09	+ 0,68	+ 2,69
Ø 9,52	- 1,39	- 1,14	- 0,60	- 0,33	+ 0,88	+ 1,53	+ 2,18

Średnica	Średnica rury				
dyszy [mm]	0 30 mm	Ø 22 mm			
Ø 3,52	3,5 + 10 cm/s	6,5 + 18 cm/s			
Ø 6,02	10 ÷ 28 cm/s	18 + 50 cm/s			
Ø 9,52	25 ÷ 70 cm/s	45 ÷ 110 cm/s			

Tabela 4.2. Podzakresy prędkości

okresowo kontrolować szczelność układu, aby mieć pewność, że powietrze zasysane jest tylko przez rurę z wzorcowanym czujnikiem anemometru. Rysunek 4.2 ilustruje sposób instalowania czujnika w rurze tak, aby jego oś pokrywała się z osią rury.



Rys. 4.2. Sposób instalowania wzorcowanego czujnika anemometru w rurze: 1 - obsadka czujnika, 2 - czujnik anemometru, 3 - pierwszy segment rury wzorcowniczej, 4 - drugi segment rury wzorcowniczej zakończony tuleją posiadającą szczelinowe wycięcie

Dla umożliwienia badania wpływu konwekcji własnej czujnika z gorącym drutem na wskazania anemometru, wprowadzono w omawianym układzie możliwość połączenia rur pomiarowych ze zbiornikiem wodnym za pomocą elastycznego przewodu. Dzięki temu można zmieniać położenie rury względem kierunku pionowego. Wyniki badania wpływu konwekcji własnej czujnika z gorącym drutem zamieszczono w rozdziale 5.4. Dość powszechnie stosowany sposób wzorcowania anemometrów w rozwiniętym przepływie laminarnym budzi pewne wątpliwości. Trudno bowiem jest w praktyce sprawdzić, czy w rurze jest rzeczywiście w pełni rozwinięty przepływ laminarny, a ponadto w obszarze zajmowanym przez czujnik profil prędkości nie jest wyrównany.

Dla omawianego stanowiska średnica obszaru wokół osi rury, w którym prędkość przepływu jest mniejsza od osiowej nie więcej niż o 1%, wynosi teoretycznie 3 względnie 2,2 mm (0,1 średnicy rury). Wymiary standardowych czujników z gorącym drutem wynoszą około 1 mm, zatem przy umieszczeniu ich w osi rury są one praktycznie w strefie wyrównanej prędkości. Dla wyjaśnienia podanych wątpliwości przeprowadzono badania porównawcze, które są omówione w końcowej części niniejszego rozdziału.

# Stanowisko do wzorcowania anemometrów za pomocą przesuwu czujnika w nieruchomym powietrzu<sup>\*</sup>

Ruch czujnika względem nieruchomego powietrza stanowi dobry wzorzec prędkości przepływu. Jednakże sposób ten jest dość trudny w praktycznej realizacji ze względu na wymagany stabilny i pozbawiony drgań ruch czujnika oraz z uwagi na trudności w przekazywaniu sygnału z poruszającego się czujnika.

W laboratorium Zakładu Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej postanowiono jednak zbudować takie stanowisko zakładając, że jego posiadanie:

pozwoli na zwiększenie dokładności wzorcowania do około - 1 %,

 umożliwi automatyczną rejestrację krzywej wzorcowania, a przez to skróci czas wzorcowania i wszystkich operacji pomocniczych do około kilku minut,

umożliwi badanie właściwości kierunkowych czujników anemometrów
w zakresie bardzo małych prędkości,

 umożliwi wzorcowanie anemometrów z czujnikami o większych wymiarach,

\* Zastrzeżenie patentowe NP 1436/150

- umożliwi wzorcowanie czujników w dowolnej potrzebnej temperaturze powietrza.

Czujnik wzorcowany może poruszać się w nieruchomym powietrzu ruchem wahadlowym, obrotowym i liniowym. W ruchu wahadłowym wzorcowane mogą być jedynie anemometry o dobrych właściwościach dynamicznych, gdyż wahadło wykonuje ruch periodyczny i prędkość zmienia się w czasie. Zachodzi więc konieczność rejestrowania wskazań anemometru za pomocą szybkich rejestratorów. Przy określaniu prędkości ruchu wahadła zakłada się zwykle, że ruch jego jest harmoniczny, co jest słuszne jedynie dla małych kątów odchylenia, oraz że ruch jest nietłumiony. Konieczność przyjęcia tych założeń upraszczających, a zwłaszcza trudności w rejestracji sygnału spowodowały, że od realizacji tego układu odstąpiono. Pozostał więc wybór pomiędzy ruchem obrotowym i liniowym. Zdecydowano się na ruch liniowy, gdyż w ruchu obrotowym w obszarze zajmowanym przez czujnik występuje gradient prędkości oraz nie wiadomo, w jaki sposób działanie siły odśrodkowej zmienia warunki wymiany ciepła czujników termoanemometrów.

Wykonane stanowisko charakteryzuje się tym, że:

- czujnik wzorcowanego anemometru porusza się ruchem prostoliniowym,

 sygnal z czujnika jest przekazywany do anemometru bezstykowo za pomocą dwóch kabli elektrycznych koncentrycznych,

- czujnik porusza się z prędkością dowolną w zakresie 0 do 1 m/s.

- niedokladność pomiaru prędkości ruchu czujnika wynosi 1 mm/s,

- istnieje możliwość zarejestrowania krzywej wzorcowania anemometru na ogólnie dostępnych rejestratorach X-Y formatu A3, tak że całkowity błąd rejestracji łącznie z błędem dynamicznym rejestratora nie przekracza <sup>+</sup> 3% przy prędkościach powyżej 0,1 m/s.

Gabaryty wykonanego stanowiska przedstawione są na rys. 4.3, natomiast uproszczony schemat kinematyczny napędu czujnika i sposób prowadzenia kabli na rys. 4.4. Na rysunkach 4.5 i 4.6 przedstawiono omówione stanowisko: widać układ napędo zy posuwu czujnika i komorę pomiarową. Wózek, na którym umieszczony jest wzorcowany czujnik anemonetru, porusza się po szynach. Za wózkiem prowadzone sa dwa koncen-



Rys. 4.3. Gabarytowe wymiary stanowiska do wzorcowania anemometrów z przesuwem czujnika w nieruchomym powietrzu: 1 - obudowa zewnętrzna, 2 - komora pomiarowa, 3 - komora napędu, 4 - podstawa



Rys. 4.4. Uproszczony schemat kinematyczny napędu czujnika i kabla pomiarowego, S - silnik, P - przekładnia, PR<sub>1</sub> - prowadnice wózka pomiarowego, PR<sub>2</sub> - prowadnice bloku napędowego, K - kabel, W - wózki, B bębny napędowe



Rys. 4.5. Wnętrze komory pomiarowej stanowiska do wzorcowania anemometrów

tryczne kable. Jeden z bloków napedowych napedzany jest poprzez wielostopniową przekładnię zębatą i przekładnię łańcuchową silnikiem bocznikowym pradu stałego. Silnik ten sterowany jest za pomocą tyrystorowego układu regulacji prędkości obrotowej. W celu określenia predkości ruchu wózka wystarczy znajomość predkości obrotowej silnika, ponieważ w układzie nie może wystąpić poślizg elementów napędzających. Stosowane są trzy niezależne układy pomiaru predkości obrotowej, a to:

prądnica techometryczna
z cyfrowym wyświetlaczem,
przetwornik fotoelektryczny.



Rys. 4.6. Wózek pomiarowy z zainstaiowanym czujnikiem





- prototypowy przetwornik obrotowo-odkształceniowy z tensometrami. Stanowisko ma pulpit sterowniczy, na którym umieszczono również wskaźniki prędkości wzorcowanego czujnika oraz temperatury wewnątrz zamkniętego kanału. Układ wyposażony jest w wyłączniki graniczne, zatrzymujące wózek w skrajnych położeniach. Zmniejszenie drogi hamowania uzyskano przez automatyczne przełączanie silnika przy jego skrajnym położeniu na pracę w układzie prądnicy ze zwartymi zaciskami wyjściowymi.

Wyniki wzorcowania anemometru z gorącym drutem typu DISA 55M12 z czujnikiem 55P81 na stanowisku w rozwiniętym laminarnym przepływie powietrza w rurze o średnicy 30 mm i na omawianym powyżej stanowisku do wzorcowania z liniowym przesuwem czujnika w nieruchomym powietrzu - przedstawiono porównawczo na rys. 4.7 w typowym układzie współrzędnych U<sup>2</sup> -  $\sqrt{W}$ . Uzyskano dobrą zgodność wyników. Okazało się, że wzorcowanie w przepływie laminarnym jest wystarczająco dokładne, jeżeli wymiary czujnika anemometru nie przekraczają 5% średnicy rury.

Dzięki wyposażeniu laboratorium w dwa omówione poprzednio stanowiska, dla wzorcowania anemometrów w zakresie od kilku cm/s do około 1 m/s oraz w stanowisko DISA 55D90 i tunelik TCS-2 możliwe jest w tym laboratorium wzorcowanie różnych anemometrów w zakresie prędkości, potrzebnym w badaniach modelowych procesów wentylacji i odpylania, oraz badanie innych metrologicznych właściwości anemometrów.

#### 4.2. Wzorcowanie anemometrów w przepływie wody

Woda jest obok powietrza drugim często stosowanym czynnikiem roboczym w badaniach modelowych procesów odpylania i wentylacji. Zachodzi więc często potrzeba wzorcowania anemometrów używanych do pomiaru w wodzie. Dotyczy to zwłaszcza termoanemometrów. Spośród znanych firm jedynie TSI produkuje takie stanowiska. Stanowisko tej firmy Model 1127 /16/ umożliwia wzorcowanie anemometrów w zakresie od 0,006 do 10 m/s.

Stanowiska laboratoryjne do wzorcowania budowane są również we własnym zakresie. Stosuje się do tego celu różne metody wzorcowania, a mianowicie:

 wzorcowanie w wirującym zbiorniku wypełnionym wodą /9/, dla zakresu prędkości od 0,05 do 2 m/s,

- wzorcowanie w strumieniu wody wypływającym ze zbiornika otwartego /10/, dla zakresu od 2 do 5 m/s oraz ze zbiornika ciśnieniowego /11, 12/, dla prędkości od 0,5 m/s,

wzorcowanie w laminarnym przepływie wody przez rurę /13/,
w zakresie poniżej 1 m/s,

- wzorcowanie na wypływie z dyszy w zatopionym strumieniu wody /14/, w zakresie od 0,003 do 0,43 m/s,

- wzorcowanie przez przesuw czujnika w nieruchomej. wodzie /9, 11/.



Rys. 4.8. Schemat stanowiska do wzorcowania anemometrów w wodzie na wypływie z dyszy w strumieniu zatopionym 1 - rotametry, 2 - zawory regulacyjne, 3 - pompa, 4 - źbiornik, 5 - dysza, 6 - siatki, 7 - ulownica, 8 - czujnik, 9 - zawór, 10 - otwór odpowietrzający, 11 - komora wlotowa

W Zakładzie Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej zaprojektowano i wykonano stanowisko do wzorcowania anemometrów na wypływie z dyszy w zatopionym strumieniu wody. Umożliwia ono wzorcowanie w zakresie od 0,005 do 5 m/s. Schemat tego stanowiska przedstawiono na rys. 4.8. Wykonano dwie dysze o średnicach d = 24,4 i 7,9 mm. W odległości 0,5 do 1 od wylotu z dyszy 5 (rys. 4.8) montuje się wzorcowany czujnik 8 anemometru. Przepływ wody wymuszony jest za pomocą pompki 3. Natężenie przepływu mierzy się rotometrami i reguluje za pomocą zaworów 2 oraz zaworu 9 znajdującego się na obejściu pompki. Woda wpływa do zbiornika wyrównawczego 11, w którym znajdują się siatki fosforobrązowe 6 oraz ulewnica 7, służące do wyrównania przepływu i zmniejszenia intensywności turbulencji przed dyszą 5. Gęstość siatek została dobrana eksperymentalnie.

Prędkość wody w osi strumienia na wypływie z dyszy wylicza się z zależności

$$W_{o} = \frac{\dot{V} \cdot \beta}{F} = W_{sr} \cdot \beta \qquad (4.8)$$

gdzie F oznacza pole przekroju wylotowego dyszy, a  $\beta$  stosunek prędkości osiowej do średniej w przekroju wylotowym dyszy. Stosunek  $\beta$  zmienia się z prędkością, ponieważ zmienia się charakter przepływu i jego wartość trzeba wyznaczyć eksperymentalnie.

Prędkość osiową można by zmierzyć przez pomiar ciśnienia dynamicznego, przy użyciu rurki spiętrzającej. Jednakże metoda ta zawodzi przy małych prędkościach. Inny sposób wyznaczania współczynnika β polega na zastosowaniu liniowego anemometru, którego charakterystykę opisać można w następujący sposób:

$$U = S_{T} \cdot W, \qquad (4.9)$$

znając profil prędkości wyznaczyć można średnią prędkość przepływu z zależności d/2

$$W_{\text{sr}} = \frac{4 \int_{0}^{4/2} W(r) \cdot 2 \pi r \, dr}{\pi a^2} . \qquad (4.10)$$

Po uwzględnieniu równania (4.9) zależność (4.10) przekształci się do postaci

$$W_{\text{śr}} = \frac{8}{S_L d^2} \int_{0}^{d/2} U(r) \cdot r \, dr.$$
 (4.11)

Przyjmując następnie, że U  $_{o} = S_{L} W_{o}$ , uzyskuje się wyrażenie na stosunek  $\beta$ 

$$\beta = \frac{W_o}{W_{\text{sr}}} = \frac{d^2}{\frac{d/2}{8\int\limits_0^{\infty} \frac{U(r) r \, dr}{U_o}}} . \tag{4.12}$$

W równaniu tym redukuje się współczynnik wzmocnienia statycznego. Fakt ten wykorzystano w /14/ stosując do pomiaru profilu zlinearyzowany anemometr z gorącym drutem. Współczynnik  $\beta$  wyznaczany był iteracyjnie. Najpierw przyjęto  $\beta = 1$  w układzie zlinearyzowano anemometr orientacyjnie. Następnie dokonano pomiarów profilu prędkości, wykorzystując przy tym możlwiość jego rejestracji na rejestratorze X-Y. Z otrzymanych wyników wyznaczono zależność  $\beta$  od prędkości z pierwszym przybliżeniem, potem ponownie zlinearyzowano anemometr, zmierzono profile i wyznaczono wartość  $\beta$  z drugim przybliżeniem. Ta metoda okazała się szybkozbieżna i po trzeciej serii pomiarów ostatecznie określono zależ-



Rys. 4.9. Stanowisko pomiarowe podczas badania układu do wzorcowania anemometrów w wodzie za pomocą anemometru laserowego

ność stosunku ß od prędkości.

Szczególnie dobrze do tego celu nadaje się anemometr laserowy, który w ogóle nie wymaga linearyzacji (p. rozdział 6.1). Wobec tego współczynnik  $\beta$  wyznaczony może być z jednokrotnego pomiaru profilu prędkości.

Ponieważ laboratorium Zakładu Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej dysponuje anemometrem laserowym, zdecydowano się zastosować go do wzorcowania zbudowanego stanowiska. Dlatego też ścianki zbiornika wodnego 4 wykonane zostały ze szkła organicznego, aby umożliwić przejście wiązkom promieni lasera. Stanowisko do wzorcowania podczas badań za pomocą anemometru laserowego przedstawiono na rys. 4.9.

Uzyskaną z badań zmienność współczynnika  $\beta$  w funkcji średniej prędkości w przekroju wylotowym przedstawiono na rys. 4.10. Szacuje się, że dokładność wyznaczania prędkości przepływu wody, jaką można uzyskać przy użyciu wykonanego stanowiska, jest w zakresie prędkości od 5 do 0,05 m/s lepsza od  $\stackrel{+}{-}$  2%, a przy prędkościach mniejszych jest ona lepsza od  $\stackrel{+}{-}$  0,001 m/s.

W trakcie wzorcowania stanowiska uzyskano cenne doświadczenia



Rys. 4.10. Zależność współczynnika B od średniej prędkości przepływu

odnośnie do zastosowania anemometru laserowego do pomiaru prędkości w wodzie. Pomiarów prędkości anemometrem laserowym w wodzie można dokonać bez dodawania do niej dodatkowych cząstek rozpraszających, mierzac predkość naturalnych zanieczyszczeń zawartych w wodzie. W przypadku potrzeby zwiększenia stosunku sygnału do szumu należy zwiększyć stężenie cząstek rozpraszających. Do wody dodaje się wtedy odpowiedniej substancji, najczęściej jest to mleko, sproszkowana śmietana, kuleczki polistyrenu, dwutlenek tytanu /49, 50, 51/. W trakcie wykonywania omawianych pomiarów stosowano cząsteczki rozpraszające w postaci zawiesiny dwutlenku tytanu TiO2. TiO2 w sypywano do szklanki i po odstaniu przez kilka godzin zawiesinę pozostałą ostrożnie przelewano do zbiornika wodnego stanowiska. Jeżeli woda z cząsteczkami rozpraszającymi pozostaje w układzie kilka dni należy liczbę cząstek uzupełnić przez dolanie zawiesiny. Próbowano również stosować mleko w liczbie kilku kropel na litr. Jednakże stwierdzono krótki czas przydatności tego roztworu (mniej niż 1 doba). Po dłuższym czasie powstaje bogata, widoczna flora bakteryjna, a cały układ trzeba codziennie opróżniać i dokładnie przepłukiwać.

Szerokość stanowiska do wzorcowania wymusiła pewien rozstaw pomiędzy elementami anemometru laserowego, układem optycznym i fotopowielaczem. W wyniku tego kąt przecięcia wiązek w wodzie nie mógł być większy niż 7<sup>0</sup>10'. Rzutowało to następnie na zakres mierzonych prędkości. Ponieważ w stosowanym procesorze częstotliwości Dopplera minimalny zakres mierzonych częstotliwości wynosi 15 kHz przy błędzie pomiaru 1%, przy prędkościach poniżej okolo 0,02 m/s konieczne było sto-



Rys. 4.11. Stanowisko podczas wzorcowania prędkościomierza termistorowego

sowanie modulatora częstotliwości wiązek laserowych, a dokładność pomiaru prędkości nie przekraczała  $\stackrel{+}{-}$  0,0005 m/s. Dlatego też ostatni pomiar profilu prędkości, z którego korzystano do wyznaczania wspólczynnika  $\beta$ , wykonany zostal przy prędkości średniej około 0,02 m/s. W zakresie poniżej 0,02 m/s współczynnik  $\beta$  określono bezpośrednio, dzieląc wartość prędkości zmierzonej w osi dyszy przez prędkość średnią obliczoną z natężenia przepływu (metody tej nie stosowano dla prędkości powyżej 0,02 m/s ze względu na większy błąd dochodzący do  $\stackrel{+}{-}$  3%).

Na rys. 4.11 przykładowo jest pokazane omawiane stanowisko podczas wzorcowania prędkościomierza termistorowego na wypływie z dyszy 24,4 mm. W trakcie wzorcowania termoanemometrów zaobserwowano, podobnie jak to podaje /15/, że na powierzchni czujnika wytrącają się pęcherzyki powietrza, zmieniające wymianę ciepła i znacznie zakłócające pomiar. Pamiętać należy również, że zwykła woda jest cieczą przewodzącą prąd elektryczny, a więc należy właściwie uziemić obwód anemometru, aby nie uszkodzić czujnika w przypadku zniszczenia ochronnej warstwy kwarcowej. Wykonane w laboratorium Zakładu stanowisko do wzorcowania anemometrów w wodzie może być również wykorzystane do wzorcowania ich w innych cieczach, ale po ponownym wyznaczeniu wartości  $\beta$ , z uwagi na zmianę grubości warstwy przyściennej.

### 5. ANEMOMETR Z GORĄCYM DRUTEM

### 5.1. Zasada działania anemometru z gorącym drutem

Anemometr z gorącym drutem jest odmianą termoanemometru najczęściej stosowaną w badaniach aerodynamicznych. Niektórzy autorzy nawet identyfikują te dwie nazwy.

Gorący element najczęściej wykonany jest z cienkiego drutu o średnicy od 0,6 do 7 µm, długości od 0,1 do 5 mm, z wolframu, platyny i jej stopów lub niklu. Rozpięty jest on na sztywnych wspornikach, poprzez które zasila się go prądem elektrycznym. Szeroko stosowane są również czujniki warstwowe foliowe. Gorącym elementem jest w tym przypadku cienka warstwa platyny lub niklu o grubości około 10 nm naniesiona na podłoże wykonane ze szkła lub kwarcu.

Gorącym elementem może być również termistor perełkowy NTC, o średnicy od 0,1 do 2 mm,względnie spiralka grzejna wykonana z drutu.

Element taki może pracować w różnych układach. Rysunek 5.1a ilustruje charakterystyki prądowo-napięciowe przy bezpośrednim ogrzewaniu prądem elektrycznym gorącego elementu o dodatnim temperaturowym współczynniku zmiany oporności. Rysunek 5.1b przedstawia analogiczne charakterystyki dla elementu o dużym ujemnym temperaturowym współczynniku zmiany oporności (termistor).

Pomiędzy gorącym elementem i jego otoczeniem zachodzi wymiana ciepła, głównie na drodze konwekcji, w pewnym stopniu drogą promieniowania. Pewna ilość ciepła odprowadzona jest przez przewodzenie do wsporników względnie podłoża w przypadku czujników warstwowych.

Dla pomiaru prędkości przepływu czujnika istotna jest konwekcyjna wymiana ciepła elementu. Zależy ona głównie od:

- prędkości przepływu czynnika,



Rys. 5.1. Przebieg charakterystyk prądowo-napięciowych gorących elementów termoanemometrów: a - element o dodatnim temperaturowym współczynniku zmiany oporności, b - element o dużym ujemnym temperaturowym współczynniku zmiany oporności termistor

- różnicy temperatury pomiędzy czynnikiem i gorącym elementem,
- właściwości fizycznych czynnika,
- ksztaltu i wymiarów gorącego elementu.

Dowolnie wybrana wielkość, charakteryzująca ilość ciepła odprowadzanego do płynu, może być miarą prędkości przepływu, co znalazło swój wyraz w różnych rozwiązaniach termoanemometrów.

Wymiana ciepła gorącego elementu jest zjawiskiem na tyle skomplikowanym, że nie udaje się teoretycznie obliczyć zależności pomiędzy strumieniem oddawanego ciepła a predkością przepływu. Jednakże zależność taką można wyznaczyć eksperymentalnie.

### Układy pracy anomometrów z goracym drutem

Zagadnienie wymiany ciepła między gorącym drutem i przepływającym płynem było wielokrotnie badane i jest szeroko opisane w literaturze [5, 17-19, 32, 33, 38, 39]. Ilość ciepła odprowadzana z równomiernie nagrzanego nieskończenie długiego walca na drodze konwokcji wymuszonej może być w zakresie  $0.3 \le \text{Re} \le 70$  z zadowalającą zgodnością opisana





równaniem zaproponowanym przez Kramersa

$$Nu = 0,42 Pr^{0,20} + 0,57 Pr^{0,33} Re^{0,50}, \qquad (5.1)$$

gdzie

$$\operatorname{Re} = \frac{\operatorname{wd}}{\gamma}, \quad \operatorname{Pr} = \frac{\operatorname{C}_{p} \cdot \mu}{\lambda}, \quad \operatorname{Nu} = \frac{\operatorname{d} \cdot \operatorname{d}}{\lambda} = \frac{\dot{Q} \cdot \operatorname{d}}{\lambda \cdot F \cdot \Delta T} \quad (5.2)$$

wartości  $\lambda, \mu, C_p, \rho$ , należy przyjąć dla temperatury warstwy granicznej  $T_m$ 

$$\Gamma_{\rm m} = \frac{1}{2} \left( \Gamma_{\rm g} + \Gamma_{\rm st} \right).$$
 (5.3)

W równaniu tym zakłada się nieskończoną długość drutu, nie uwzględnia się wymiany ciepła na drodze konwekcji swobodnej i promieniowania oraz pomija ciepło odprowadzone do wsporników. Dłatego dla stosowanych czujników anemometrów z gorącym drutem równanie to sluszne jest jedynie z pewnym przybliżeniem i w ograniczonym zakresie prędkości. Jednakże często jest praktycznie wykorzystywane do analizy wpływu różnych czynników na pracę anemometru z gorącym drutem.

Inne rozwiązania tego zagadnienia można znaleźć w podanej powyżej literaturze.

Na rys. 5.2 przedstawiono schematy dwu najczęściej stosowanych układów pracy anemometrów z gorącym drutem. Rysunek 5.2a przedstawia układ anemometru stałoprądowego (CCA), a rys. 5.2b, układ anemometru stałotemperaturowego (CTA). Właściwości obu układów są także wystarczająco opisane w literaturze /19, 39/.

W ostatnich latach stałotemperaturowy układ anemometru zdobył sobie całkowitą przewagę z uwagi na następujące zalety:

 posiada większy zakres mierzonych częstotliwości fluktuacji prędkości, przy specjalnych wykonaniach, graniczna ich wartość dochodzi do 2 MHz,

- ma szeroki zakres mierzonych prędkości,
- możliwa jest łatwa kompensacja temperaturowa wskazań anemometru.

5.2. Przygotowanie anemometru z gorącym drutem do pomiarów

Przygotowanie anemometru z gorącym drutem do pomiarów należy rozpocząć od wyboru czujnika. Wybór ten powinien być uzależniony od:

- rodzaju płynu, jego temperatury i stopnia zanieczyszczenia,
- zakresu mierzonych prędkości,
- wymaganej przestrzennej zdolności rozdzielczej,
- zakresu mierzonych parametrów.

Zwykle można przy tym korzystać z danych katalogowych podawanych przez producentów anemometrów /16, 23/. Z wyborem czujników związany jest często wybór układu mostka anemometru. Korzysta się przy tym również z danych katalogowych producenta /4/. Czujniki anemometrów z gorącym drutem mają zwykle małą oporność, rzędu kilku omów, porównywalną z opornością wsporników czujnika, obsadki i kabla. Aby właściwie nastawić temperaturę pracy gorącego drutu, konieczne jest skompensowanie oporności wszystkich doprowadzeń. Po wykonaniu tych czynności przystępuje się do wzorcowania. Wzorcowanie jest niezbędne nie tylko z uwagi na niemożność teoretycznego obliczenia zależności napięcia wyjściowego z anemometru od prędkości przepływu, ale również z powodu braku powtarzalności wykonania czujników oraz ze względu na zachodzące starzenie się i zanieczyszczanie czujników.

Metody wzorcowania anemometrów przedstawiono w rozdziale 4. W przypadku anemometrów stałotemperaturowych jeszcze przed przystąpieniem do wzorcowania konieczne jest dokonanie wyboru tzw. stopnia nagrzania a, który wiąże z sobą oporność gorącego i zimnego czujnika.

$$R_{st} = (1 + a) \cdot R_{sz}$$
 (5.4)

Najczęściej w powietrzu a = 0,8, natomiast w wodzie a =  $0,08 \div 0,14$ .

Znając temperaturę, w której była mierzona oporność zimnego czujnika t $_{sz} = t_{o}$ , oraz oporności R $_{sz}$  i R $_{st}$  można obliczyć temperaturę gorącego elementu. Zależność oporności drutu do temperatury jest w szerszym zakresie temperatur nieliniowa, dlatego przy obliczaniu temperatury gorącego elementu korzysta się z zależności /40/

$$t_{st} = t_o + (R_{st} - R_{sz})/R_{s20} \cdot b,$$
 (5.5)

przy czym

$$R_{s20} = R_{sz} / [1 + b_{20}(t_o - 20)].$$
 (5.6)

Dla czujników z wolframu platerowanego należy przyjąć b =  $4 \cdot 10^{-3} 1/{^{\circ}C}$ ; b<sub>20</sub> =  $3, 6 \cdot 10^{-3} 1/{^{\circ}C}$ . Na rys. 5.3 przedstawiono przykładowo wyniki wzorcowania anemometru DISA 55M10 z czujnikiem z gorącym drutem typu 55P11 w przepływie powietrza przy stopniach nagrzania a = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8. Krzywe wzorcowania przedstawione są w układzie U - W. Jak widać, tak przedstawiona charakterystyka anemometru z gorącym drutem jest silnie nieliniowa i trudno jest posłużyć się nią do dokonania matematycznego opisu krzywej wzorcowania. Rozwiązanie Kramersa (równ. 5.1) w przypadku anemometru stałotemperaturowego można przekształcić do postaci

$$U^2 = A + B \sqrt{W}. \tag{5.7}$$

Na rys. 5.4 przedstawiono te same wyniki wzorcowania anemometru z go-



Rys. 5.3. Krzywe wzorcowania anemometru DISA 55M10 z czujnikiem 55P11 dla różnych wartości stopnia przegrzania

rącym drutem w układzie  $U^2$ .  $\sqrt{W}$ . Otrzymana zależność jest prawie liniowa, można więc wyniki wzorcowania z pewnym przybliżeniem opisać równaniem 5.7. Dokładniejszy opis matematyczny krzywych wzorcowania daje jednak równanie

$$U^2 = A + B W^n.$$
 (5.8)

Współczynnik A w równaniu 5.8 powinien odpowiadać kwadratowi napięcia wyjściowego z anemometru przy zerowej prędkości przepływu. W rzeczywistości odpowiada on kwadratowi napięcia mniejszego od niego c-krotnie:

$$A = U_0^{\prime 2}$$
, (5.9)

$$U_{o}' = c \cdot U_{o}. \tag{5.10}$$



Rys. 5.4. Krzywe wzorcowania anemometru DISA 55M10 z czujnikiem 55P11 w układzie współrzędnych U<sup>2</sup> –  $\sqrt{W}$ 

Opis krzywych wzorcowania równaniem 5.8 w zakresie prędkości bliskich zoru nie jest bowiem poprawny i w tym zakresie krzywe wzorcowania mają przebieg w przybliżeniu paraboliczny.

Korzystając z 5.8 i 5.9 można wyliczyć, że

$$\left(\frac{U}{U_0'}\right)^2 - 1 = \frac{B}{A} W^n.$$
 (5.11)

Dwustronnie zlogarytmowane powyższe równanie ma postać

$$\lg\left[\left(\frac{U}{U_o}\right)^2 - 1\right] = \lg \frac{B}{A} + n \lg W.$$
 (5.12)

Webec tego wyniki wzorcowania przedstawione na papierze podwójnie logarytmicznym w układzie  $\left(\frac{U}{U_0'}\right)^2 - 1 = f(w)$  powinny tworzyć zależność liniową.

Sposób przedstawiania krzywych wzorcowania jest podany poniżej na przykładzie wybranego czujnika standardowego typu DISA 55P11 Nr wewn. 2.



Rys. 5.5. Wyniki wzorcowania anemometru DISA 55M10 z czujnikiem 55P11 (2) w podwójnie logarytmicznym układzie współrzędnych (dokładny opis w tekście)

Wzorcowano go w powietrzu o temperaturze  $t_0 = 22.0^{\circ}$ C,  $R_{sz} = 3.52 \Omega$ , wybrano stopień przegrzania a = 0,8, korzystając z równania 5.4 otrzymano  $R_{st} = 6.34 \Omega$ , obliczono na podstawie wzorów 5.5 i 5.6, że włókno tego czujnika przegrzane było o  $\Delta T = t_s - t_o = 202^{\circ}$ C, czyli że średnia jego temperatura wynosiła  $t_{st} = 224^{\circ}$ C. Przy prędkości równej zeru napięcie wyjściowe z anemometru wynosiło U = 2,778 V. Aby uzyskać opis charakterystyki wzorcowania równaniem 5.8, przedstawiono uzyskane wyniki na papierze podwójnie logarytmicznym, odkładając na osi rzędnych  $(U/U_0')^2 - 1$ , a na osi odciętych prędkość W. Napięcie U ' dobrano metodą kolejnych przybliżeń, tak aby wyniki wzorcowania w jak najszerszym zakresie prędkości układały się wzdłuż lini prostej. Przyjęta ostatecznie wartość napięcia U ' równała się 0,925 U i wynosiła U ' = 2,57 V. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.5. W zakresie od około 0,15 do 20 m/s odchyłka od aproksymującej linii prostej nie przekracza <sup>+</sup> 2%. Równanie 5.8 w tym przypadku przyjmuje postać

 $U^2 = 6,605 + 3,732 W^{0,467}$ .

Powyższy sposób opisu krzywej wzorcowania anemometru z gorącym drutem jest obecnie uważany za klasyczny. Niestety nie jest on zbyt dokładny w szerszym zakresie prędkości, zwłaszcza powyżej 40 m/s /41, 42/. W tym szerszym zakresie dokładniejszy opis daje równanie

$$J^{2} = A + B W^{n(w)} = A + B W^{\overline{m(w)}}$$
 (5.13)

lub /42, 43/

$$U^{2} = A + B \sqrt{W} + C W.$$
 (5.14)

W zakresie prędkości poniżej 20 m/s, jakie najczęściej występują w badaniach modelowych odpylania i wentylacji, ten klasyczny sposób wyrażony równaniem 5.8 jest wystarczająco dokładny. Ilustrują to otrzymane wyniki oraz inny materiał zgromadzony przez autorów.

Linearyzacja wskazań anemometru z gorącym drutem stosowana jest często dla ułatwienia odczytu wyników pomiaru. Można np. tak ustawić linearyzator, aby przy prędkości średniej 10 m/s woltomierz dołączony do wyjścia wskazywał 10 V, a przy 5 m/s - 5 V itp. Czułość anemometru zlinearyzowanego na fluktuacje prędkości nie zależy od średniej prędkości przepływu. Linearyzacja ponadto umożliwia uzyskanie jednakowej czułości przy różnych czujnikach, co jest bardzo potrzebne, gdy stosuje się czujniki typu X lub V.

Wpływ linearyzacji na dokładność pomiaru prędkości średniej w przepływach o dużej intensywności turbulencji został omówiony w rozdziale 5.5.

Jeśli charakterystykę anemometru przedstawia ogólnie postać

$$U = F(W),$$
 (5.15)

to linearyzator powinien realizować funkcję odwrotną do funkcji F

$$U_{L} = F^{-1}(U),$$
 (5.16)

aby zachodziło

$$U_{L} = S_{L} \cdot W. \tag{5.17}$$

Produkuje się kilka typów linearyzatorów, które mogą być stosowane do linearyzacji sygnału anemometru z gorącym drutem. W stosunkowo najprostszych funkcja odwrotna  $F^{-1}(U)$  realizowana jest za pomocą aproksymacji odcinkowej. Przykładem może być linearyzator TSI 1055, w którym funkcję tę można realizować za pomocą 10 odcinków. Dokładność linearyzacji za pomocą tego linearyzatora wynosi  $\stackrel{+}{-} 3\%$ . Stosuje się również wielomianową aproksymację funkcji  $F^{-1}(U)$ , np. w TSI Polynomial Linearizer 1052. W ten sposób uzyskuje się dokładność  $\stackrel{+}{-} 2\%$ . Jednak najczęściej wykorzystywane są linearyzatory specjalnie zbudowane do celów anemometrui z gorącym drutem. Realizują one albo funkcję odwrotną do 5.8

$$u_{\rm L} = K (U^2 - A)^{\frac{1}{n}},$$
 (5.18)

jak np. linearyzator DISA 55D10 /44/, albo funkcję odwrotną do 5.13 z dodatkową jeszcze możliwością linearyzacji anemometru wokół prędkości równej zeru,

$$U_{L} = K_{1}(U + U_{o})^{m(w)}(U - U_{o})^{m(w)} + K_{2}(U - U_{o})^{\overline{2}},$$
 (5.19)

jak linearyzator DISA 55M25 /45/.

Linearyzator realizujący funkcje 5.18 będzie dokładnie linearyzował anemometr w takim zakresie prędkości, w jakim równanie 5.8 dokładnie opisuje krzywą wzorcowania. Z wykonanych pomiarów wynika, że może on być stosowany w zakresie np. od 0,15 do 20 m/s. Natomiast linearyzator realizujący funkcję 5.19, jak to podaje firma DISA, dokładnie linearyzuje anemometry z gorącym drutem w zakresie 2,5 dekady, z błędem mniejszym od 0,05% zakresu + 0,5% wartości mierzonej.

Oprócz przedstawionych powyżej sposobów analogowej linearyzacji wskazań anemometrów mogą być również zastosowane cyfrowe metody linearyzacji. Jeśli do pomiaru i przetwarzania sygnału z anemometru jestużywany system pomiarowo-informacyjny z szybkim przetwornikiem analogowo-cyfrowym, jak np. HP 3052 A Automatic Data Acquisition System /46/, rolę linearyzatora może spełniać kalkulator wchodzący w skład tego systemu.

Strojenie obwodów anemometru konieczne jest do uzyskania jak najszerszego pasma przenoszenia fluktuacji prędkości. Polega ono na kompensacji impedancji kabla łączącego czujnik z anemometrem oraz na właści-



Rys. 5.6. Sygnał odpowiedzi anemometru z gorącym drutem na test falą prostokątną

wej nastawie wzmocnienia servowzmacniacza i filtrów w pętli sprzężenia zwrotnego. Strojenie to wykonuje się zgodnie z instrukcją obsługi anemometru.

Niezwykle trudno jest sztucznie wywołać ściśle określone zmiany prędkości przepływu o znanej amplitudzie i częstotliwości. Dlatego właściwości dynamiczne anemometrów z gorącym drutem bada się najczęściej przez doprowadzenie elektrycznego sygnału prostokątnego do mostka i obserwowanie odpowiedzi. Generatory fali prostokątnej wbudowywane są zazwyczaj do układu anemometru. Typowy przebieg czasowy odpowiedzi anemometru na falę prostokątną przedstawiono na rys. 5.6. Nie ma zgodności co do inte pretacji tego sygnału. Według firmy DISA /47/ graniczną częstotliwość, przy której następuje spadek wzmocnienia o 3 dB, wyznacza się mierząc czas  $T_1$  (rys. 5.6) z zależności

$$f = \frac{1}{2 \pi \tau_1}.$$
 (5.20)

Według firmy TSI /16/, która powołuje się na badania Freymuth'a, należy korzystać z zależności

$$f = \frac{1}{1,5\tau_2}.$$
 (5.21)

Zależności te dają rozbieżne wyniki. Wykonano dla sprawdzenia przykładowy test falą prostokątną anemometru DISA 55M10 z czujnikiem 55P11 przy W = 0 m/s i otrzymano  $\tau_1$  = 33 µs,  $\tau_2$  = 38 µs. Stąd według równania 5.20 częstotliwość graniczna wynosi 4,8 kHz, a według równania 5.21 17,5 kHz.

Częstotliwość graniczna przenoszonych fluktuacji zależy od prędkości przepływu i rośnie ze wzrostem prędkości. Zasady pomiaru charakterystyk amplitudowych i fazowych anemometrów z gorącym drutem podane są w pracy /48/. Do badań procesów odpylania i wentylacji przeważnie wystarcza pasmo przenoszenia anemometru 5 kHz, gdyż w tego typu przepływach nie występują szybsze fluktuacje prędkości.

# 5.3. Czułość anemometru z gorącym drutem na fluktuacje prędkości oraz na zmiany właściwości fizycznych powietrza

Jeśli czujnik anemometru z gorącym drutem umieszczony zostanie w przepływie turbulentnym, będzie zmieniać się wartość chwilowa sygnahu wyjściowego z anemometru. Można to zapisać:

$$U = \overline{U} + U'$$
. (5.22)

W przepływie zmienia się również kierunek wektora prędkości chwilowej, dlatego wprowadza się pojęcie tzw. efektywnej prędkości chwilowej W<sub>ef</sub>. Jest to prędkość przepływu odpowiadająca chwilowej wartości sygnału wyjściowego anemometru, zgodnie z jego charakterystyką statyczną. Wobec tego równanie 5.8 należy zapisać w postaci

$$U^2 = A + B W_{ef}^n$$
. (5.23)

Jak wykazano, równanie to w pewnym ograniczonym zakresie, np. 0,15 ÷ 20 m/s, z wystarczającą dokładnością opisuje charakterystykę statyczną anemometru, uzyskaną przez wzorcowanie. Można więc z niego skorzystać od wyznaczenia czułości anemometru na fluktuacje prędkości

$$\frac{\partial U}{\partial W_{ef}} = \frac{n}{2} \frac{U^2 - A}{U \cdot W_{ef}} .$$
 (5.24)



Rys. 5.7. Zależność czułości anemometru DISA 55M10 z czujnikiem 55P11 (2) na fluktuacje prędkości przepływu powietrza od prędkości przepływu

Korzystając z równania 5.23 można wyznaczyć również względną czułość anemometru

$$\frac{\partial U}{U} \left/ \frac{\partial W_{ef}}{W_{ef}} - \frac{n}{2} \frac{U^2 - A}{U^2} \right.$$
 (5.25)

Na rys. 5.7 przedstawiono przykład krzywej czułości anemometru z gorącym drutem na fluktuacje prędkości przepływu, wyznaczoną według równań 5.24 i 5.25 dla wybranego czujnika.

Jak widać, czułość anemometru na fluktuacje prędkości ∂U/∂W<sub>ef</sub> bardzo silnie maleje ze wzrostem średniej prędkości przepływu. Jednakże względna czułość anemometru rośnie wraz ze wzrostem prędkości średniej.

Przykład: załóżmy, że chcemy zarejestrować fluktuacje prędkości o wartościach równych 1/100 prędkości średniej, co można zapisać:

$$\frac{\partial W_{ef}}{W_{ef}} \approx \frac{W'_{ef}}{\overline{W}_{ef}} = 0.01$$

Korzystając z równania 5.24

$$U' = \frac{\partial U}{\partial W_{ef}} \cdot W_{ef}' = \frac{\partial U}{\partial W_{ef}} \cdot 0,01 \overline{W}_{ef}'$$

przyjmując dane z rys. 5.7 otrzymamy dla

$$\overline{W}_{ef} = 0,2 \text{ m/s} \qquad U' = 1,4 \text{ mV}, \\ \overline{W}_{ef} = 1 \text{ m/s} \qquad U' = 2,5 \text{ mV}, \\ \overline{W}_{ef} = 10 \text{ m/s} \qquad U' = 6,0 \text{ mV}.$$

Przykład ten ilustruje zarazem, jaka jest wartość skuteczna fluktuacji napięcia wyjściowego z anemometru z gorącym drutem w przepływach o intensywności turbulencji rzędu 1%.

Znając względną czułość anemometru można również oszacować, jaka powinna być dokładność woltomierza mierzącego wartość średnią napięcia wyjściowego, np. przy jego wzorcowaniu.

Przykład: W zakresie bardzo małych prędkości założyć można taką dokładność pomiaru napięcia wyjściowego anemometru, aby możliwe było rozróżnienie prędkości rzędu <sup>+</sup> 0,005 m/s. Zatem przy prędkości 0,1 m/s czułość anemometru powinna wynosić

$$\frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{\partial U}{U} / \frac{\partial W}{W} \cdot \frac{\Delta W}{W} = 0,1\%.$$

Natomiast można założyć, że przy większych prędkościach woltomierz powinien rozróżnić prędkości różniące się od siebie więcej aniżeli o 1%, Na przykład dla W = 0,5 m/s potrzebna byłaby czułość

$$\frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% \approx 0,07\%$$
, dla W = 10 m/s  $\frac{\Delta U}{U}$  = 0,15%.

Przykład ten wskazuje, że przy wzorcowaniu anemometru należy posłużyć się woltomierzem przynajmniej klasy 0,05, a więc najlepiej woltomierzem cyfrowym czteromiejscowym. Dokładność takiego woltomierza wynosi zazwyczaj 0,01% zakresu + 1 cyfra.

Jeżeli anemometr z gorącym drutem został zlinearyzowany, to wówczas obowiązuje równanie

$$U_{L} = S_{L} \cdot W_{ef'}$$
(5.26)

$$\frac{\partial U_{L}}{\partial W_{L}} = S_{L} , \qquad (5.27)$$

natomiast względna czułość wynosi

$$\frac{\partial U_{L}}{U_{L}} / \frac{\partial W_{ef}}{W_{ef}} = 1.$$
 (5.28)

Zwykle przy nastawianiu linearyzatora uzyskuje się czułość anemometru zlinearyzowanego rzędu 0,1  $\div$  1 V/ms<sup>-1</sup>. W tym przypadku

$$U_{L}' = S_{L} \cdot W_{ef}' = (0, 1 \div 1) W_{ef}'$$

Przykład: Jeżeli chcemy zarejestrować fluktuacje prędkości równe 1/100 prędkości średniej, to wówczas

$$U_{1}' = (0, 1 \div 1) \cdot 0, 01 \overline{W}_{of},$$

a więc przy

$$\begin{split} \overline{W}_{ef} &= 0,2 \text{ m/s} & U_{L}' &= (0,2 \div 2) \text{ mV}, \\ \overline{W}_{ef} &= 1 \text{ m/s} & U_{L}' &= (1 \div 10) \text{ mV}, \\ \overline{W}_{of} &= 10 \text{ m/s} & U_{1}' &= (10 \div 100) \text{ mV}. \end{split}$$

Produkowane obecnie woltomierze wartości skutecznej mają najmniejszy zakres mierzonych fluktuacji napięcia równy 1 mV. Ta czułość, jak widać, wystarcza przeważnie do pomiaru fluktuacji prędkości przy intensywności turbulencji większej od 1%, zarówno dla anemometru niezlinearyzowanego, jak i zlinearyzowanego.

Względna czułość anemometru zlinearyzowanego jest równa jedności, a zatem przy założeniu, że dokładność pomiaru średniej prędkości ma wynosić 1%, woltomierz mierzący wartość średnią napięcia wyjściowego anemometru musi mieć dokładność również 1%. Taką dokładność najlepiej zapewni woltomierz cyfrowy trzymiejscowy, którego błąd pomiaru zwykle wynosi 0,1% zakresu <sup>±</sup> 1 cyfra.

Zmiany temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza znajdują swój wyraz we wskazaniach anemometru z gorącym drutem. Rozpoznanie wpływu zmian tych parametrów fizycznych powietrza na wskazania anemometru jest niezbędne, ponieważ często pomiary prędkości wykonywane są w innych warunkach aniżeli te, w których anemometr był wzorcowany. Zwłaszcza często występują przepływy nieizotermiczne, w których dodatkowo


Rys. 5.8. Krzywe wzorcowania anemometru DISA 55M10 dla różnych temperatur powietrza przy stałej oporności gorącego drutu

rozkład temperatury powietrza może zmieniać się w czasie. Zachodzi więc konieczność odpowiedniego wyeliminowania błędów, jakie mogą być spowodowane zmianami właściwości fizycznych powietrza, względnie oszacowania wartości tych błędów.

Rysunek 5.8 ilustruje zmiany wskazań anemometru z gorącym drutem na skutek zmian temperatury powietrza. Kompleksowa teoretyczna analiza wpływu zmian wymienionych trzech parametrów fizycznych powietrza na wskazania anemometrów z gorącym drutem jest zawarta w pracy /40/. Jednakże eksperymentalnie sprawdzono tylko wpływ temperatury i ciśnienia. Natomiast nie weryfikowano wpływu wilgotności. Jednakże, jak wynika z pracy /52/ w zakresie prędkości 0,05  $\pm$  25 m/s i temperatur 20  $\pm$  30<sup>°</sup>C jest on mały i może być pominięty w analizowanych tutaj przypadkach.

W związku z tym poniżej zajęto się jedynie zależnością, która opisuje woływ temperatury i ciśnienia powietrza na wskazania anemometru. Ma ona postać /40/

$$U^{2} = A_{o}(1 - 0.84 \eta) + B_{o}(1 - 1.09 \eta) \left(\frac{p}{p_{o}} W_{ef}\right)^{\overline{2,3}}, \quad (5.29)$$

gdzie

$$\eta = \frac{\frac{t_g - t_o}{t_{st} - t_o}}{\frac{t_g - t_o}{t_{st} - t_o}}$$

jest bezwymiarowym sympleksem tempratury. Współczynniki  $A_o$ ,  $B_o$  otrzymywane są z pomiaru charakterystyki statycznej anemometru w warunkach odniesienia  $t_g = t_o$ ,  $p = p_o$ , np. 30°C i 760 mmHg przy temperaturze drutu  $t_{st}$ . Korzystając z równania 5.29 wyznaczyć można charakterystykę statyczną anemometru w warunkach odmiennych od warunków odniesienia. Ponieważ współczynniki  $A_o$  i  $B_o$  zależą od temperatury gorącego drutu  $t_{st}$ , za pomocą równania 5.29 nie można bezpośrednio analizować wpływu zmian temperatury gorącego drutu na wskazania anemometru. Skądinąd wiadomo jednak, że właśnie poprzez zmiany temperatury gorącego drutu, które śledzą zmiany temperatury powietrza, najczęściej kompensuje się temperaturowe zmiany wskazań anemometru. Do opisu charakterystyki statycznej anemometru stałotemperaturowego z gorącym drutem przy róźnych temperaturach powietrza i gorącego drutu wykorzystać można często stosowane /19, 53/ przekształcenie równania Kramersa, które ma następującą postać

$$U^{2} = \left(1 - \frac{R_{sz}}{R_{st}}\right) (R_{1} + R_{st})^{2} (A_{1} + B_{1} W^{n}), \qquad (5.30)$$

gdzie R1 jest opornością stosunkową mostka.

W pracy /53/ sprawdzano to równanie w zakresie temperatur 20  $\div$  60°C i prędkości 3,5  $\div$  30 m/s. Stwierdzono, że w tym zakresie B<sub>1</sub> i n nie zależą od temperatury. Natomiast A<sub>1</sub> nieznacznie rośnie z temperaturą. Otrzymane wyniki są zgodne z teoretycznymi rozważaniami przeprowadzonymi w pracy Hinzego /19/, ale można przyjąć, że w stosunkowo wąskim przedziale temperatur również współczynnik A<sub>1</sub> jest stały.

Korzystając z równania 5.30 można oszacować błąd pomiaru prędkości związany ze zmianą temperatury powietrza z t na t . Latwo wykazać, że wynosi on

$$\frac{\Delta W}{W} \approx -\frac{R_{sg} - R_{so}}{n (R_{st} - R_{so})} \left(\frac{1}{\frac{B_1}{A_1} W^n} + 1\right).$$
(5.31)

Do oszacowania wartości tego błędu przyjąć można liniową zależność zmian oporności gorącego drutu z temperaturą

$$R_{s} = R_{so} \left[ 1 + b_{o}(t_{g} - t_{o}) \right]$$
 (5.32)

oraz że n = 0,5. Stosunek B<sub>1</sub>/A<sub>1</sub> nie zależy praktycznie od temperatury i waha się w granicach od 0,5 do 0,6. Przyjmując B<sub>1</sub>/A<sub>1</sub> = 0,55 otrzymamy ostatecznie

$$\frac{\Delta W}{W} \Big/ {t_{g} - t_{o}} = -\frac{2}{t_{st} - t_{o}} \left( \frac{1}{0,55 \ \gamma W} + 1 \right)$$
(5.33)

Wartości tego błędu wyrażone w procentach na jeden stopień różnicy temperatur zestawiono w tabeli 5.1. Różnica temperatur t<sub>st</sub> - t<sub>o</sub> równa 200 deg odpowiada w przybliżeniu stopniowi przegrzania a = 0,8. Jak więc wynika z danych tabeli 5.1, przy stopniu przegrzania a = 0,8 zmiana temperatury powietrza o <sup>+</sup> 0,5 deg powoduje błąd wskazań anemometru mniejszy niż <sup>+</sup> 2% i w tym zakresie zmian temperatury anemometr z gorącym drutem nie musi być praktycznie kompensowany. Gdy zmiany temperatury są większe, temperaturowa kompensacja wskazań anemometru staje się niezbędna.

Tabela 5.1.

W [m/s]	$\frac{\Delta W}{W} / (t_g - t_o) \\ [\%/deg]$				
	dla t <sub>st</sub> - t				
	100 deg	200 deg			
0,25	- 9,3	- 4,6			
1	- 5,6	- 2,8			
9	- 3,2	- 1,6			
25	- 2,7	- 1,4			

W praktyce często stosuje się sposób polegający na utrzymywaniu stałego stopnia nagrzania a = const. Korzystając z równań (5.30) i (5.4) otrzymamy

$$U^{2} = \frac{a}{a+1} \left[ R_{1} + R_{sq}(1+a) \right]^{2} (A_{1} + B_{1} W^{n}).$$
 (5.34)

Gdyby zachodziła nierówność  $R_1 \gg R_{so}$ , to przy zmianie temperatury powietrza i utrzymywaniu stałego stopnia nagrzania nie zmieniałoby się napięcie wyjściowe anemometru. Jednak w zależności od typu czujnika i doboru elementów w mostku anemometru stosunek  $R_{so}/R_1$  zmienia się od 10 do 0,02. Przy tym dla standardowych czujników z gorącym drutem najczęściej  $R_{so}$  wynosi około 3,5 $\Omega$ , natomiast oporność stosunkowa mostka  $R_1$  często wynosi 50  $\Omega$  (DISA 55M10, 55M12). Stąd bardzo często  $R_{so}/R_1 \approx 1/15$ .

Przy zmianie temperatury powietrza z t<sub>o</sub> na t<sub>g</sub> ulega zmianie napięcie wyjściowe anemometru, co jest źródłem błędu, którego wartość jest łatwo wykazać:

$$\frac{\Delta W}{W} \approx \frac{2(a+1)}{n} \frac{R_{sg} - R_{so}}{R_1 + R_{so}(1+a)} \left(\frac{1}{\frac{B_1}{A_1} w^n} + 1\right) . \quad (5.35)$$

Jeśli skorzystamy z równania (5.32) mamy

$$\frac{\Delta W}{W} / {t_{g} - t_{o}} = \frac{2(a+1)}{n} \frac{b_{o} \frac{R_{so}}{R_{1}}}{1 + \frac{R_{so}}{R_{1}}(1+a)} \left(\frac{1}{\frac{B_{1}}{A_{1}}}W^{n} + 1\right).$$
(5.36)

Przyjmując przykładowo:  $R_{so}/R_1 = 1/15$ ,  $b_o = 4 \cdot 10^{-3}$  1/deg, a = 0.8, n = 0.5  $B_1/A_1 = 0.55$ , otrzymamy

$$\frac{\Delta W}{W} / {\binom{1}{(t_g - t_o)}} = 0,17 \left(\frac{1}{0,55 \sqrt{W}} + 1\right) \%.$$
(5.37)

Wartości tego błędu wyrażone w procentach na jeden stopień różnicy temperatur zestawiono w tabeli 5.2.

Przykład ten ilustruje, że przy stopniu przegrzania a = 0,8 i stosunku oporów  $R_{00}/R_{1} = 1/15$  kompensacja temperaturowa wskazań anemoTabela 5.2.

W [m/s]	e + datate bead	0,25	1	9	25
$\frac{\Delta W}{W} / (t_{g} - t_{o})$	[%/deg]	0,80	0,48	0,27	0,23

metru na zasadzie utrzymywania stałego stopnia przegrzania a = const ogranicza temperaturowy błąd wskazań anemometru do  $\stackrel{+}{-}$  2% w zakresie zmian temperatury powietrza  $\stackrel{+}{-}$  3 deg.

Stała wartość stopnia nagrzania utrzymywana jest najczęściej ręcznie. Co pewien czas kontroluje się wartość oporności zimnego czujnika i nastawia się nową wartość oporności gorącego czujnika. Metoda ta może być jednak stosowana tylko wtedy, gdy temperatura powietrza zmienia się bardzo wolno. Przy pomiarach nieizotermicznych przepływów powietrza, gdy występują szybkie fluktuacje temperatury powietrza, mogą być zastosowane jedynie metody automatycznej kompensacji temperaturowej wskazań anemometru. Wówczas w pobliżu włókna czujnika musi być umieszczony drugi element reagujący na zmiany temperatury. Element ten powinien mieć jak najmniejszą bezwładność, aby mógł śledzić zmiany temperatury. Jeżeli elementem tym jest cienki drut, można uzyskać jego stałą czasową około 5 ms, oraz poprawną kompensację temperaturową w zakresie  $20 \div 80^{\circ}C/4/.$ 

Automatyczna temperaturowa korekcja wskazań anemometru z gorącym drutem jest obszernym zagadnieniem, dlatego nie będzie tutaj szczegółowo omówiona. Wiele informacji na ten temat można uzyskać w literaturze /16, 53-55/.

Wpływ zmian ciśnienia powietrza na wskazania anemometru może być analizowany na podstawie równania (5.29). Latwo wykazać, że jeśli ciśnienie powietrza zmienia się o  $\Delta p$ , a wpływ tej zmiany na charakterystykę statyczną anemometru nie uwzględnia się, to popełnia się błąd pomiaru prędkości równy

$$\frac{\Delta W}{W} \approx \frac{\Delta p}{p}$$
. (5.38)

W badaniach procesów wentylacji i odpylania nie należy zatem obawiać się znaczących blędów z tego powodu.

Praktycznym sposobem zmniejszenia błędów, spowodowanych zmianami parametrów fizycznych powietrza, a także takimi czynnikami jak starzenie i zanieczyszczenie się czujników – jest częste sprawdzanie charakterystyki statycznej anemometru. Stąd konieczność posiadania w laboratorium stanowisk umożliwiających wzorcowanie w każdej chwili, i to możliwie przy parametrach fizycznych powietrza takich samych, jakie mają wystąpić w czasie pomiarów.

#### 5.4. Czułość kierunkowa anemometru z gorącym drutem

Właściwości kierunkowę różnych anemometrów omówiono już w rozdziale 3.2. Obecnie nieco dokładniej zostaną przeanalizowane właściwości kierunkowe anemometru z gorącym drutem. Jego sygnał wyjściowy zależy m.in. od kierunku wektora prędkości względem czujnika. W zakresie bardzo małych prędkości aktywizuje się również zależność od kierunku przepływu powietrza względem pionowego strumienia konwekcji własnej czujnika.

Wpływ konwekcji własnej na wskazania anemometru może być zbadany za pomocą stanowiska do wzorcowania anemometrów w rozwiniętym łaminarnym przepływie powietrza, omówionym w rozdziałe 4.1. Na rys. 5.9 przedstawiono wyniki wzorcowania anemometru DISA 55M10 z czujnikiem z gorącym drutem typ 55P11 (Nr wewn. 2) w przepływie powietrza o temperaturze 22,0°C, przy stopniu nagrzania włókna czujnika a = 0,8. Strumień konwekcyjny oddziałuje na strumień przepływającego powietrza i w zależności od tego, czy kierunek tych strumieni jest zgodny, czy przeciwny, powoduje albo zwiększenie, albo zmniejszenie ilości ciepła, którą trzeba dostarczyć, aby utrzymać stałą temperaturę gorącego drutu. Jak wynika z rys. 5.9, wpływ ten zniekształca wskazania anemometru więcej niż o 0,01 m/s przy prędkościach przepływu powietrza mniejszych od 0,15 m/s. Frzy prędkościach przepływu powyżej 0,25 m/s wpływu konwekcji własnej już nie zaobserwowano.

Właściwości kierunkowe czujnika z gorącym drutem badano w szerokim zakresie prędkości. Czujniki te wzorcowano, opisano ich charakterystyki statyczne zgodnie z równaniem 5.8, a następnie anemometr zlinea-

77



Rys. 5.9. Wyniki wzorcowania anemometru z gorącym drutem w zakresie bardzo małych prędkości dla różnych kierunków przepływu powietrza względem kierunku pionowego konwekcji swobodnej

ryzowano, wykorzystując do tego celu linearyzator DISA 55D10. Pomiary czułości kierunkowej czujników anemometru przeprowadzono na stanowisku do wzorcowania DISA 55D90. Krzywe czułości kierunkowej rejestrowane były automatycznie za pomocą rejestratora X-Y.

Zgodnie z równaniem (5.26) napięcie wyjściowe zlinearyzowanego anemometru jest wprost proporcjonalne do efektywnej prędkości przepływu, możliwe więc było zarejestrowanie zmian efektywnej prędkości w funkcji kątów ochylenia  $\Upsilon$  i nachylenia  $\delta$  (rys. 5.10). Niektóre z zarejestrowanych krzywych czułości kierunkowej przedstawiono na rys. 5.11. Z przebiegu tych krzywych widoczne jest, że wskazania anemometru zmieniają się nie tylko w zależności od kąta odchylenia wektora prędkości od kierunku prostopadłego do włókna, ale również w zależności od kąta nachylenia  $\delta$  wektora prędkości do płaszczyzny, którą tworzą wsporniki i włókna czujnika. Maksimum wskazań anemometru z gorącym drutem występuje gdy  $\Upsilon = 0$  i  $\delta = 0$ , a więc gdy wektor prędkości jest prostopadły do włókna i wsporników czujnika.



Rys. 5.10. Kierunek wektora prędkości względem czujnika z gorącym drutem

Gdyby czujnik miał włókna nieskończenie długie i bez wsporników, to teoretycznie jego wskazania byłyby proporcjonalne do składowej prostopadłej do włókna. Zgodnie z rys. 5.10 zależność tę można by zapisać następująco:

$$W_{ef} = \sqrt{W_{x}^{2} + W_{z}^{2}}$$
 (5.39)

lub w postaci

$$W_{ef} = W \cos \varphi. \qquad (5.40)$$

Ze względu na skończoną długość włókna oraz obecność wsporników rzeczywiste właściwości kierunkowe czujników z gorącym drutem są inne i zmieniają się wraz z prędkością przepływu. Ilustruje to rys. 5.12, na którym porównano wyniki pomiaru czułości kierunkowej z jej opisem za pomocą równania (5.40), oraz równaniem Jorgensena, którego wykres naniesiono także na rys. 5.12,

$$W_{ef} = \left(W_{x}^{2} + K_{1}^{2} W_{y}^{2} + K_{2}^{2} W_{z}^{2}\right)^{1/2}, \quad (5.41)$$



Rys. 5.11. Zarejestrowane krzywe czułości kierunkowej czujnika z gorącym drutem

które można przekształcić do postaci

$$\frac{W_{ef}}{W} = \left\{ \cos^2 \varphi \left[ 1 - K_1^2 - (1 - K_2^2) \sin^2 \delta \right] + K_1^2 \right\}^{1/2}.$$
 (5.42)

Im większa jest prędkość przepływu, tym bardziej zbliżają się właściwości kierunkowe czujnika do właściwości idealnego przetwornika, reagującego na sumę geometryczną dwóch składowych wektora prędkości. Przy prędkościach powyżej 20 m/s czujnik z gorącym drutem może być praktycznie rozpatrywany jako idealny przetwornik, a do opisu jego właściwości kierunkowych można wykorzystać równanie (5.40). W zakresie mniejszych prędkości, jak to ilustruje rys. 5.12, właściwości kierunkowe omawianych czujników można dość dokładnie opisać równaniem (5.41) zaproponowanym przez Jorgensena /56/. W spółczynnik K<sub>1</sub> obliczono na podstawie pomiaru przy  $\Psi = 90^\circ$ , natomiast w spółczynnik K<sub>2</sub> z pomiaru przy  $\Psi = 0^\circ$ ,  $\delta = 90^\circ$ .

Opis czułości kierunkowej czujnika powinien być poprawny w takim zakresie kątów odchylenia i nachylenia, w jakim praktycznie zmienia się kierunek wektora mierzonej prędkości. Zakres tych zmian, zgodnie z ry-



Rys. 5.12. Próba opisu matematycznego czułości kierunkowej czujnika z gorącym drutem

sunkiem 3.1. zależy od intensywności turbulencji przepływu. Przy pomiarach w przepływach o małej burzliwości wystarczy znajomość czułości kierunkowej w pewnym ograniczonym zakresie kątów, natomiast w przepływach silnie burzliwych potrzebna jest pełna charakterystyka właściwości kierunkowych. Współczynnik  $K_2$  w równaniu 5.41 uwzględnia zmiany czułości kierunkowej w funkcji kąta nachylenia, związane ze sposobem chłodzenia wsporników czujnika. Jeżeli stosuje się czujniki ze złoconymi końcówkami, jak np. w czujnikach DISA 55F11, współczynnik ten osiąga wartości znacznie zbliżone do jedności /56/.

Podany opis czułości kierunkowej został dokonany przy założeniu, że charakterystyka statyczna anemometru została otrzymana z wzorcowania przy kątach  $\Psi = 0$  i  $\delta = 0$ . Często korzysta się z podobnego opisu, jednakże przy założeniu, że czujnik wzorcowano przy  $\Psi = 0^{\circ}$  i  $\delta = 90^{\circ}$ , a więc przy wektorze prędkości prostopadłym do jego włókna i równoległym do wsporników. W tym przypadku pełną charakterystykę właściwości kierunkowych podaje równanie

$$W_{ef} = \left(W_{z}^{2} + K_{1}^{'2} W_{y}^{2} + K_{2}^{'2} W_{x}^{2}\right)^{1/2}, \quad (5.43)$$

. . .

w którym

v

 $K_1' < 1$ , a  $K_2' > 1$ .

Stosowane są również inne sposoby opisu czułości kierunkowej czujników z gorącym drutem /19/, jednakże żaden z nich nie uwzględnia wpływu kąta nachylenia  $\delta$ . Równania te mogą być więc stosowane tylko dla przypadków niskiej intensywności turbulencji przepływu. Pozwalają one jednak lepiej niż równanie (5.40) uwzględnić wpływ kąta odchylenia  $\Psi$  i dlatego stosowane są do opisu czułości kierunkowej czujników, których włókna tworzy z kierunkiem przepływu kąta inny niż prosty (np. czujniki typu V i X). Pomiar czułości kierunkowej czujnika jest potrzebny, ponieważ pozwala przyjąć odpowiednią formułę, która może być wykorzystana przy interpretacji sygnału z anemometru. Konieczny jest wtedy, gdy pomiary wykonane mają być w przepływach silnie burzliwych względnie, gdy wykorzystywane są czujniki z włóknami nachylonymi do wsporników pod pewnym kątem.

#### 5.5. Interpretacja sygnału anemometru z gorącym drutem

Interpretacja sygnału anemometru z gorącym drutem powinna uwzględniać intensywność turbulencji przepływu, kierunek średniego przepływu względem włókna czujnika, rzeczywiste właściwości kierunkowe czujnika oraz kształt jego charakterystyki statycznej. Przeprowadzone na Politechnice Śląskiej badania właściwości metrologicznych anemometrów z gorącym drutem i pomiary testowe pozwoliły ustosunkować się do różnych stosowanych sposobów interpretacji sygnału i metod pomiaru struktury przepływu za pomocą anemometrów z gorącym drutem. Opracowano również sposób interpretacji sygnału, który różni się od dotychczas stosowanych i jest stosunkowo prosty i zwarty. Uwzględnia on rzeczywiste, zmieniające się wraz z prędkością przepływu właściwości kierunkowe czujnika anemometru z gorącym drutem, i wprowadza odmienny, niż to się najczęściej spotyka, sposób analizy chwilowej wartości efektywnej prędkości. Z proponowanym sposobem interpetacji wiążą się konkretne metody pomiaru struktury przepływów o małych prędkościach. Rysunek 5.13 przedstawia składowe wektora prędkości chwilowej, w przypadku gdy kierunek przepływu pokrywa się z osią x czujnika z gorącym drutem:

 $W_{\mathbf{x}} = \overline{W} + W'_{\mathbf{x}}; \quad W_{\mathbf{y}} = W'_{\mathbf{y}}; \quad W_{\mathbf{z}} = W'_{\mathbf{z}}. \quad (5.44)$ 

82



Rys. 5.13. Składowe wektora prędkości chwilowej

Do opisu czułości kierunkowej anemometru z gorącym drutem można zastosować równanie (5.41), dające pełną charakterystykę kierunkową czujnika. Podstawiając do niego zależności (5.44) otrzymamy

$$W_{ef} = \left(\overline{W}^{2} + 2\overline{W} W_{x}' + W_{x}'^{2} + k_{1}^{2} W_{y}'^{2} + k_{2}^{2} W_{z}'^{2}\right)^{1/2}.$$
 (5.45)

110

Wartość średnią efektywnej prędkości można wyznaczyć rozwijając powyższe równanie w szereg

$$\mathbb{W}_{\text{ef}} = \overline{\mathbb{W}} + \frac{1}{2}\overline{\mathbb{W}}^{-1} \triangle x - \frac{1}{8}\overline{\mathbb{W}}^{-3} \triangle x^2 + \frac{1}{16}\overline{\mathbb{W}}^{-5} \triangle x^3 - \frac{5}{128}\overline{\mathbb{W}}^{-7} \triangle x^4 + \dots, \quad (5.46)$$

gdzie

$$\Delta \mathbf{x} = 2 \ \overline{\mathbf{W}} \ \mathbf{W}'_{\mathbf{x}} + \mathbf{W}'_{\mathbf{x}}^{2} + \mathbf{k}_{1}^{2} \ \mathbf{W}'_{\mathbf{y}}^{2} + \mathbf{k}_{2}^{2} \ \mathbf{W}'_{\mathbf{z}}^{2}.$$

Po obliczeniu i uwzględnieniu wyrazów zawierających korelacje między fluktuacjami do 4 rzędu otrzymuje się

$$W_{ef} = \overline{W} + W_x^{i} + \frac{k_1^2 W_y^2 + k_2^2 W_z^{i2}}{2\overline{W}} - \frac{k_1^2 W_x^{i} W_y^{i2} + k_2^2 W_x^{i} W_z^{i2}}{2\overline{W}^2} - \frac{k_1^2 W_x^2 W_y^{i2} + k_2^2 W_x^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} - \frac{k_1^2 k_2^2 W_y^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_x^2 W_y^{i2} + k_2^2 W_x^{i2} W_z^{i2}}{2\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_x^2 W_y^{i2} + k_2^2 W_x^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_y^{i2} + k_2^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_y^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2}}{4\overline{W}^3} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} W_z^{i2} + \frac{k_1^2 W_z^2 W_z^{i2} + \frac{k_1^2$$

W równaniu (5.47) dla przepływów o intensywności turbulencji poniżej około 0,25 można zaniedbać wyrażenia zawierające iloczyny między fluktuacjami drugiego i wyższych rzędów. Otrzymuje się wtedy

$$W_{ef} = \overline{W} + W'_{x}.$$
 (5.48)

Zatem chwilowa wartość efektywnej prędkości jest w przybliżeniu równa chwilowej wartości składowej podłużnej wektora prędkości, a stąd otrzymuje się

co oznacza, że średnia wartość efektywnej prędkości jest równa śrędniej prędkości przepływu oraz że fluktuacje efektywnej prędkości przepływu wynoszą

$$W'_{ef} = W_{ef} - \overline{W}_{ef}.$$
 (5.50)

Jeśli skorzysta się z (5.48) i (5.49), można przyjąć

$$W'_{ef} = W'_{x}$$
, (5.51)

czyli fluktuacje efektywnej prędkości przepływu równe są fluktuacjom podłużnym wektora prędkości. Zachodzą więc związki

$$W_{ef}^{12} = W_{x}^{12}, \quad W_{ef}^{*} = W_{x}^{*}.$$
 (5.52)

Dla przepływów o intensywności turbulencji powyżej około 0,25 nie można zaniedbać w równaniu (5.47) wyrażeń zawierających iloczyny między fluktuacjami. Uśredniając to równanie otrzymuje się

$$\overline{W}_{ef} = \overline{W} \left[ 1 + \frac{k_1^2 \overline{W_y'}^2 + k_2^2 \overline{W_z'}^2}{2 \overline{W}^2} - \frac{k_1^2 \overline{W_x'} W_y'^2 + k_2^2 \overline{W_x'} W_z'^2}{2 \overline{W}^3} - \frac{k_1^4 \overline{W_y'}^2 + k_2^2 \overline{W_x'} W_z'^2}{2 \overline{W}^3} - \frac{k_1^4 \overline{W_y'}^2 + k_2^2 \overline{W_x'} W_z'^2}{2 \overline{W}^3} - \frac{k_1^2 k_2^2 \overline{W_y'}^2 W_z'^2}{4 \overline{W}^4} \right]. \quad (5.53)$$

Zatem w przepływach o dużej intensywności turbulencji wartość średnia efektywnej prędkości przepływu różni się od średniej prędkości przepływu, a różnica ta zależy od intensywności i indywidualnego charakteru struktury turbulencji. Można dokonać próby oszacowania tej różnicy. Załóżmy przykładowo, że  $k_1 = 0,4$ ,  $k_2 = 0,85$  a  $W_y^*/\overline{W} = W_z^*/\overline{W} = 0,5$  oraz że w równaniu (5.53) można pominąć korelacje 3. i 4. rzędu. Otrzymamy wtedy średnią wartość efektywnej prędkości, większą o około 16% od średniej prędkości przepływu.

Można również obliczyć fluktuacje efektywnej prędkości w przepływach o dużej intensywności turbulencji. Należy przy tym skorzystać z zależności (5.50) oraz (5.47) i (5.53). Po podniesieniu do kwadratu, uśrednieniu i pominięciu wszystkich wyrazów zawierających korelacje między fluktuacjami prędkości rzędu wyższego niż czwarty otrzymuje się

$$\overline{W_{ef}^{'2}} = \overline{W_{x}^{'2}} + \frac{k_{1}^{2} \overline{W_{x}^{'} W_{y}^{'2}} + k_{2}^{2} \overline{W_{x}^{'} W_{z}^{'2}}}{\overline{W}} - \frac{k_{1}^{2} \overline{W_{x}^{'2} W_{y}^{'2}} + k_{2}^{2} \overline{W_{x}^{'2} W_{z}^{'2}}}{\overline{W}^{2}} + \frac{k_{1}^{4} (\overline{W_{y}^{'4}} - \overline{W_{y}^{'2}}) + 2k_{1}^{2} k_{2}^{2} (\overline{W_{y}^{'2} W_{z}^{'2}} - \overline{W_{y}^{'2} W_{z}^{'2}}) + k_{2}^{4} (\overline{W_{z}^{'4}} - \overline{W_{z}^{'2}})}{4 \overline{W}^{2}} + (5.54)$$

Z równania (5.54) wynika, że wariancja efektywnej prędkości różni się od wariancji fluktuacji podłużnych wektora prędkości tym bardziej, im większa jest intensywność turbulencji. Przy czym różnica ta zależy od intensywności i indywidualnego charakteru struktury turbulencji. Różnicę tę trudno określić ze względu na nieznajomość wartości korelacji 3. 14. rzędu. Można jednak sądzić, że wariancja efektywnej prędkości powinna być mniejsza od wariancji fluktuacji podłużnych.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, w przypadku przepływów o dużej intensywności turbulencji występują poważne trudności w interpretacji sygnału anemometru z gorącym drutem. Pomiar przy jednym położeniu włókna czujnika względem wektora prędkości średniej nie dostarcza wtedy wystarczających danych do właściwej interpretacji sygnału.

Pomiar fluktuacji poprzecznych i naprężeń stycznych zazwyczaj wykonywany jest za pomocą czujników z gorącym drutem, których włókna tworzą pewien kąt, różny od kąta prostego z kierunkiem wektora prędkości średniej. Wykorzystuje się kilka sposobów pomiaru:

 obraca się osiowo pojedynczy czujnik anemometru z włóknem prostopadłym do wsporników względem wektora prędkości średniej,



Rys. 5.14, Normalna do włókna czujnika tworzy kąt ∝ z kierunkiem wektora prędkości średniej

 obraca się względem wektora prędkości średniej czujnik z gorącym drutem o włóknie nachylonym pod pewnym kątem do wsporników (najczęściej 45°),

 stosuje się czujniki typu
 X lub V w dwukanałowym układzie anemometrycznym.

We wszystkich wymienionych przypadkach zasada pomiaru jest taka sama i wymaga przeanalizowania sygnału anemometru, gdy wektor prędkości średniej tworzy z normalną do włókna czujnika kąt 🛪 (rys. 5.14). Analizę

ogranicza się na razie tylko do przepływów o niskiej intensywności turbulencji, poniżej okołc 0,25. Przy większej burzliwości interpretacja sygnahu uzyskanego w ten sposób jest niezwykle trudna.

W pierwszej kolejności należy przyjąć formułę opisującą właściwości kierunkowe czujnika. Przy niezbyt dużej intensywności turbulencji niewielkie jest prawdopodobieństwo występowania większych od 30° odchyleń wektora prędkości chwilowej od kierunku przepływu średniego. Jeśli jednakże włókno nie będzie prostopadłe do kierunku wektora prędkości średniej, lecz nachylone będzie do niego pod pewnym kątem, mogą występować dość duże odchylenia kierunku wektora prędkości chwilowej od normalnej do włókna (przy  $\alpha = 45^{\circ}$ ,  $\varepsilon < 0.25$  można je szacować na  $15^{\circ} < \varphi < 75^{\circ}$ ). W tym przypadku potrzebny jest więc dokładny opis właściwości kierunkowych czujnika w funkcji kąta odchylenia. Natomiast kąt nachylenia (rys. 5.10) zmienia się tylko w granicach od 0 do około + 30°, a więc można praktycznie czułości anemometru z gorącym drutem na te zmiany nie uwzględniać. Wobec tego jeśli układ współrzędnych związany z czujnikiem oznaczamy przez  $X_1Y_1Z_1$ , charakterystyka właściwości kierunkowych czujnika z gorącym drutem może być opisana uproszczoną zależnością (5.41), która ma postać (przyjęto k<sub>2</sub> = 1)

$$W_{ef} = \left(W_{x1}^{2} + k_{1}^{2}W_{y1}^{2} + W_{z1}^{2}\right)^{1/2}.$$
 (5.55)

Na włókno czujnika oddziaływać będą następujące składowe prędkości przepływu:

$$W_{x1} = (\overline{W} + W'_{x}) \cos \alpha + W'_{y} \sin \alpha ,$$
  

$$W_{y1} = -(\overline{W} + W'_{x}) \sin \alpha + W'_{y} \cos \alpha ,$$
  

$$W_{z1} = W'_{z}.$$
(5.56)

Jeżeli oznaczymy pomocniczo

$$\cos^{2} \alpha + k_{1}^{2} \sin^{2} \alpha = a^{2},$$
  
 $(1 - k_{1}^{2}) \sin 2\alpha = b,$   
 $\sin^{2} \alpha + k_{1}^{2} \cos^{2} \alpha = c^{2}$  (5.57)

i związki (5.56) podstawimy do równania (5.55), otrzymamy

$$W_{ef}(\alpha) = (\overline{W}^{2}a^{2} + 2\overline{W}W'_{x}a^{2} + W'_{x}a^{2} + \overline{W}W'_{y}b + W'_{x}W'_{y}b + W'_{y}c^{2} + W'_{z})^{\overline{2}}.$$
 (5.58)

Aby obliczyć wartość średnią efektywnej prędkości  $\overline{W}_{ef}(\alpha)$  oraz wariancję  $W_{ef}^{\prime 2}(\alpha)$ , konieczne jest rozwinięcie zależności (5.58) w szereg. Po uwzględnieniu trzech pierwszych wyrazów rozwinięcia

$$W_{ef}(\alpha) = \overline{W} a + \frac{1}{2} (\overline{W} a)^{-1} \Delta x - \frac{1}{8} (\overline{W} a)^{-3} \Delta x^{2}, \qquad (5.59)$$

gdzie

$$\Delta \mathbf{x} = 2\overline{\mathbf{W}} \mathbf{W}'_{\mathbf{x}} \mathbf{a}^{2} + \mathbf{W}'^{2}_{\mathbf{x}} \mathbf{a}^{2} + \overline{\mathbf{W}} \mathbf{W}'_{\mathbf{y}} \mathbf{b} + \mathbf{W}'_{\mathbf{x}} \mathbf{W}'_{\mathbf{y}} \mathbf{b} + \mathbf{W}'^{2}_{\mathbf{y}} \mathbf{c}^{2} + \mathbf{W}'^{2}_{\mathbf{z}}, \quad (5.60)$$

a po podstawieniu zależności (5.60) do (5.59) i pominięciu wyrażeń stopnia wyższego niż drugi

$$W_{ef}(\alpha) = \overline{W} + W'_{x} + W'_{y} \frac{b}{2a} + \frac{W'^{2}_{y}}{2 \overline{W} a^{3}} k_{1}^{2} + \frac{W'^{2}_{z}}{2 \overline{W} a}.$$
 (5.61)

Średnia więc wartość efektywnej prędkości, gdy normalna do włókna tworzy z kierunkiem przepływu średniego kąt α, wynosi

$$\overline{W}_{ef}(\alpha) = \overline{W} = \left[1 + \frac{\overline{W'^2}}{2 \,\overline{W^2}_a^4} \,k_1^2 + \frac{\overline{W'^2}_z}{2 \,\overline{W^2}_a^2}\right].$$
(5.62)

W przypadku szczególnym, gdy

$$\vec{w}_{ef}(0) = \vec{W} \left[ 1 + \frac{\vec{w}_y'^2}{2 \vec{W}^2} k_1^2 + \frac{\vec{w}_z'^2}{2 \vec{W}^2} \right],$$
 (5.63)

otrzymane wyrażenie odpowiada trzem pierwszym wyrazom zależności (5.53), w której przyjęto ponadto

$$k_2 = 1$$

W przypadku gdy

$$\overline{w}_{ef}(\alpha) = \overline{w} \left(\frac{1+k^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{\overline{w'^2} 2 k_1^2}{\overline{w}^2 (1+k_1^2)^2} + \frac{\overline{w'^2}}{\overline{w}^2 (1+k_1^2)}\right] . (5.64)$$

Ponieważ funkcja a =  $(\cos^2 \alpha + k_1^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$  jest funkcją parzystą również wartość średnia efektywnej prędkości przepływu według równania (5.62) jest parzystą funkcją kąta  $\alpha$ . Dzięki symetrii zmian wartości średniej efektywnej prędkości w funkcji kąta można wyznaczyć kierunek wektora prędkości średniej. Stosując czujnika typu X lub V z wyników pomiaru średniej wartości efektywnej prędkości w obu kanałach anemometru można wnioskować, czy wektor średniej prędkości przepływu tworzy jednakowe kąty z obydwoma włóknami takiego czujnika. Porównując z sobą zależności (5.63) i (5.64) warto również zauważyć, że błąd przy określaniu średniej prędkości przepływu spowodowany pominięciem wyrażeń zawierających korelacje między fluktuacjami prędkości rzędu drugiego, jest w przypadku korzystania z zależności (5.63) około dwa razy mniejszy aniżeli przy korzystaniu z zależności (5.64). Na podstawie zależności (5.61) i (5.62) obliczyć można fluktuacje efektywnej prędkości

$$W'_{ef}(\alpha) = W_{ef}(\alpha) - \overline{W_{ef}}(\alpha), \qquad (5.69)$$

a jeśli w wymienionych zależnościach pominiemy wyrażenia 2. i wyższych

89

rzęuów, otrzymamy

$$W'_{ef}(\alpha) = W'_{x} a + W'_{y} \frac{b}{2a}$$
(5.70)

oraz wyrażenie na wariancję

$$\overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha) = \overline{W_{x}^{'2}} a^{2} + \overline{W_{x}^{'}} W_{y}^{'} b + \overline{W_{y}^{'2}} \frac{b^{2}}{4 a^{2}}.$$
 (5.71)

Korzystając z zależności (5.57) mamy

$$\overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha) = \overline{W_{x}^{'2}}(\cos^{2}\alpha + k_{1}^{2}\sin^{2}\alpha) + \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}}(1 - k_{1}^{2})\sin 2\alpha + \frac{w_{y}^{'2}}{w_{y}^{'2}}\frac{(1 - k_{1}^{2})^{2}(\sin 2\alpha)^{2}}{4(\cos^{2}\alpha + k_{1}^{2}\sin^{2}\alpha)}.$$
(5.72)

Dla  $\alpha = 0^{\circ} \overline{W_{ef}^{'2}}(0) = \overline{W_{x}^{'2}},$ a dla  $\alpha = 45^{\circ}$  otrzymamy

$$\overline{W_{ef}^{12}} = \overline{W_x^{'2}} \frac{1+k_1^2}{2} + \overline{W_x^{'}W_y^{'}}(1-k_1^2) + \overline{W_y^{'2}} \frac{(1-k_1^2)^2}{2(1+k_1^2)}, \quad (5.73)$$

natomiast dla 🛛 = - 45°

$$\overline{W_{ef}^{'2}} = \overline{W_{x}^{'2}} \frac{1+k_{1}^{2}}{2} - \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}}(1-k_{1}^{2}) + \overline{W_{y}^{'2}} \frac{(1-k_{1}^{2})^{2}}{2(1+k_{1}^{2})}.$$
 (5.74)

Róźnica między wariancjami wynosi

$$\overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha = 45^{\circ}) - \overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha = -45^{\circ}) = 2 \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}}(1-\kappa_{1}^{2}), \quad (5.75)$$

można więc na jej podstawie wyznaczyć wartość naprężeń stycznych. Natomiast suma wariancji jest równa

$$\overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha = 45^{\circ}) + \overline{W_{ef}^{'2}}(\alpha = -45^{\circ}) = \overline{W_{x}^{'2}}(1+k_{1}^{2}) + \overline{W_{y}^{'2}} - \frac{(1-k_{1}^{2})^{2}}{1+k_{1}^{2}}.$$
 (5.76)

Jeżeli z pomiarów przy  $\alpha = 0$  znana jest wartość wariancji podłużnych wektora prędkości, to z zależności (5.76) wyznaczyć można wariancje poprzeczne wektora prędkości.

Z dotychczasowych rozważań wynika, że obracając czujnik względem wektora prędkości średniej możemy z pomiarów przy 🛛 = 0 otrzymać  $\overline{W}$  oraz  $\overline{W_x^{\prime 2}}$ , a z pomiarów przy  $\alpha = \div 45^{\circ}$  otrzyma się  $\overline{W_y^{\prime 2}}$  oraz  $\overline{W_x^{\prime }W_y^{\prime }}$ . Pozostaje wtedy jeszcze nie wyznaczona druga wariancja poprzeczna wektora prędkości  $\overline{W_z^{\prime 2}}$ . Można ją także wyznaczyć, lecz w tym celu należy dokonywać obrotu włókna czujnika nie w płaszczyźnie OXY a w płaszczyźnie OXZ.

Jednokanałowy pomiar anemometrem z gorącym drutem może zatem dostarczyć informacji zarówno o prędkości średniej przepływu, jak i o naprężeniach normalnych oraz stycznych wektora prędkości. Konieczny jest jednak obrót włókna czujnika względem kierunku przepływu średniego. Nie uzyskuje się jednak tą drogą chwilowych wartości fluktuacji poprzecznych ani chwilowych wartości naprężeń stycznych, jakie są często potrzebne do analizy widmowej fluktuacji poprzecznych lub naprężeń stycznych względnie do detekcji intermittencji przepływu.

Chwilowe wartości fluktuacji poprzecznych, podłużnych i naprężeń stycznych można uzyskać za pomocą pomiarów dwukanałowym anemometrem z gorącym drutem. Do tych pomiarów wykorzystywane są czujniki z dwoma włóknami prostopadłymi do siebie i tworzącymi z kierunkiem przepływu średniego kąty  $\alpha = +45^{\circ}$  oraz  $\alpha = -45^{\circ}$ . Z równania (5.70) otrzymuje się wtedy

$$W'_{ef}(45^{\circ}) = W'_{x}\left(\frac{1+k_{1}^{2}}{2}\right)^{\frac{1}{2}} + W'_{y}\frac{1-k_{1}^{2}}{\sqrt{2}(1+k_{1}^{2})^{1/2}},$$
 (5.77)

z równań (5.66) i (5.70)  

$$W'_{ef}(-45^{\circ}) = W'_{x}\left(\frac{1+k_{1}^{2}}{2}\right)^{\frac{1}{2}} - W'_{y}\frac{1-k_{1}^{2}}{\sqrt{2}(1+k_{1}^{2})^{\frac{1}{2}}}.$$
(5.78)

suma tych chwilowych wartości fluktuacji daje wyrażenie

$$W'_{1} = W'_{ef}(45^{\circ}) + W'_{ef}(-45^{\circ}) = W'_{x} \sqrt{2} (1+k_{1}^{2})^{1/2},$$
 (5.79)

a ich różnica

a

$$W'_{2} = W'_{ef}(45^{\circ}) - W'_{ef}(-45^{\circ}) = W'_{y} \frac{\sqrt{2}(1 - k_{1}^{2})}{(1 + k_{1}^{2})^{1/2}}.$$
 (5.80)

Jeżeli następnie otrzymane fluktuacje przemnożymy przez siebie, otrzymamy

$$W'_{1} \cdot W'_{2} = W'_{x} W'_{y} 2 (1 - k^{2}_{1}).$$
 (5.81)

Dokonując więc prostych operacji algebraicznych na sygnałach z anemometru dwukanałowego z czujnikiem X lub V otrzymać można chwilowe wartości fluktuacji podłużnych, poprzecznych oraz naprężeń stycznych. Oczywiście prawdziwe są również zależności

$$\overline{W_{1}^{'2}} = \overline{W_{x}^{'2}} 2 (1 + k_{1}^{2}),$$

$$\overline{W_{2}^{'2}} = \overline{W_{y}^{'2}} \frac{2(1 - k_{1}^{2})^{2}}{1 + k_{1}^{2}},$$

$$\overline{W_{1}^{'}W_{2}^{'}} = \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}} 2 (1 - k_{1}^{2}). \qquad (5.82)$$

Metoda dwukanałowych pomiarów z czujnikami X i V znana jest również szeroko w prostszej postaci. Konwekcjonalny sposób pomiaru zakłada, że anemometr nie reaguje na składową równoległą do włókna czujnika, czyli, że  $k_1 = 0$ . Wtedy np. zależności (5.82) przyjmują postać

$$\overline{W_{1}^{'2}} = 2 \overline{W_{x}^{'2}},$$

$$\overline{W_{2}^{'2}} = 2 \overline{W_{y}^{'2}},$$

$$\overline{W_{1}^{'W_{2}^{'}}} = 2 \overline{W_{x}^{'W_{y}^{'}}}.$$
(5.83)

Wyniki przedstawione w rozdziale 5.4 ilustrują, że przy małych prędkościach przepływu współczynnik  $k_1$  może osiągnąć wartości, np. dla standardowego czujnika DISA 55P11 przy W = 0,5 m/s  $k_1$  = 0,45. Przy takiej wartości  $k_1$  zmierzone w konwencjonalny sposób fluktuacje podłużne będą zawyżone o około 20%, fluktuacje poprzeczne zaniżone o około 90%, a naprężenia styczne zaniżone o około 25%. Wynika to bezpośrednio z porównania zależności (5.82) i (5.83). Konieczne jest więc uwzględnianie rzeczywistych właściwości kierunkowych czujnika.

Omówione poprzednio metody mogą być stosowane w odniesieniu do przepływów, w których intensywność turbulencji jest mniejsza od około 0,25, przy czym z zależności (5.53) i (5.65) wynika, że o celowości Dotychczas analizowano jedynie wartość średnią oraz wariancję efektywnej prędkości przepływu. Wielkości te są trudne w interpretacji, ponieważ do ich obliczenia konieczne jest rozwijanie w szereg zależności pierwiastkowych na wartość chwilową efektywnej prędkości. Można jednak również analizować wartość średniokwadratową prędkości. W tym celu wykorzystać można pelną charakterystykę właściwości kierunkowych w postaci

$$W_{ef}^2 = W_{x1}^2 + k_1^2 W_{y1}^2 + k_2^2 W_{z1}^2.$$
 (5.84)

Zakładając, że wektor prędkości średniej tworzy z normalną do włókna kąt « (rys. 5.14), po podstawieniu zależności (5.56) do równania (5.84) i uśrednieniu otrzymamy

$$\overline{W_{ef}^{2}}(\alpha) = \overline{W}^{2}(\cos^{2}\alpha + k_{1}^{2}\sin^{2}\alpha) + \overline{W_{x}^{'2}}(\cos^{2}\alpha + k_{1}^{2}\sin^{2}\alpha) + (5.85) + \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}}(1-k_{1}^{2})\sin 2\alpha + \overline{W_{y}^{'2}}(\sin^{2}\alpha + k_{1}^{2}\cos^{2}\alpha) + k_{2}^{2}\overline{W_{z}^{'2}}.$$

Na podstawie analizy zmian powyższej zależności w funkcji kąta ∝ została opracowana metoda pomiaru naprężeń normalnych i stycznych w silnie burzliwych przepływach /57/. Według tej metody oprócz pomiarów w płaszczyźnie OXY musi być wykonany jeszcze jeden dodatkowy pomiar czujnikiem, którego włókno zostanie ustawione prostopadle do tej płaszczyzny.

Dla uzupełnienia analizy sposobów interpretacji sygnału anemometru z gorącym drutem należy jeszcze rozważyć wpływ linearyzacji anemometru na dokładność pomiarów. Często bowiem w praktyce stosuje się pomiary niezlinearyzowanym anemometrem. Charakterystyka statyczna idealnie zlinearyzowanego anemometru (patrz rozdział 5.2) opisana jest zależnością (5.26), z której po wstawieniu

 $u_{L} = \overline{u}_{L} + u'_{L}$  oraz  $W_{ef} = \overline{W}_{ef} + W'_{ef}$ 

otrzymuje się

$$\overline{u}_{L} = s_{L} \overline{W}_{ef}, \quad \overline{u_{L}^{\prime 2}} = s_{L}^{2} \overline{W_{ef}^{\prime 2}}. \quad (5.86)$$

W układzie anemometru zlinearyzowanego przez pomiar wartości średniej



Rys. 5.15. Ilustracja błędu pomiaru efektywnej prędkości spowodowanego nieliniowością charakterystyki anemometru z gorącym drutem

i wariancji sygnału wyjściowego uzyskuje się w prosty sposób informacje o wartości średniej i wariancji efektywnej prędkości przepływu.

Równanie (5.8), które najczęściej jest stosowane do opisu charakterystyki statycznej niezlinearyzowanego anemometru, można zapisać w postaci

$$U = (A + B W_{ef}^{n})^{1/2}$$
. (5.87)

Biorąc pod uwagę (rys. 5.15), że

$$W_{ef} = \overline{W}_{ef} + W'_{ef},$$

$$U = \left[A + B\left(\overline{W}_{ef} + W'_{ef}\right)^{n}\right]^{1/2}.$$
(5.88)

Aby wyznaczyć, jakiej wartości prędkości odpowiada średnia wartość napięcia wyjściowego z niezlinearyzowanego anemometru, należy równanie (5.88) rozwinąć w szereg. Po rozwinięciu oraz odrzuceniu wyrazów powyżej rzędu drugiego otrzymamy



Rys. 5.16. Względna różnica wyników pomiaru średniej prędkości anemometrem niezlinearyzowanym i zlinearyzowanym w ograniczonym strumieniu powietrza

$$\overline{U}_{N} = \overline{U} - \frac{B^{2} n^{2} \overline{W}_{ef}^{2n-2}}{8 \overline{U}^{3}} \overline{W'_{ef}^{2}} - \frac{B n (1-n) \overline{W}_{ef}^{n-2}}{4 \overline{U}} \overline{W'_{ef}^{2}}, \quad (5.89)$$

gdzie

$$\overline{U} = (A + B \overline{W}_{ef}^{n})^{1/2}$$
 (5.90)

Otrzymana w postaci równania (5.89) średnia wartość napięcia wyjściowego z niezlinearyzowanego anemometru z gorącym drutem odpowiada prędkości

$$\overline{W}_{N} = \overline{W}_{ef} - \left[\frac{n}{4 \text{ A/B} \overline{W}_{ef}^{-n} + 4} + \frac{1 - n}{2}\right] \frac{W_{ef}^{12}}{\overline{W}_{ef}}.$$
 (5.91)

Natomiast względna różnica pomiędzy wartością średnią prędkości zmierzoną niezlinearyzowanym anemometrem i wartością średnią efektywnej prędkości wynosi

$$\frac{\overline{W}_{N} - \overline{W}_{ef}}{\overline{W}_{ef}} = -\left(\frac{n}{4 \text{ A/B } \overline{W}_{ef}^{-n} + 4} + \frac{1-n}{2}\right) \left(\frac{W_{ef}^{*}}{\overline{W}_{ef}}\right)^{2} = -D\left(\frac{W_{ef}^{*}}{\overline{W}_{ef}}\right)^{2}.$$
 (5.92)

Różnica ta jest więc proporcjonalna do kwadratu intensywności turbulencji efektywnej prędkości. W spółczynnik D zmienia się wraz z prędkością. Przyjmując typowe wartości, n = 0,46, B/A = 0,55, zakres tych zmian wynosi od 0,3 dla 0,2 m/s do 0,36 dla 50 m/s. Przykładowo wartość średnia prędkości zmierzona niezlinearyzowanym anemometrem jest przy W<sup>\*</sup><sub>ef</sub>/W<sub>ef</sub> = 0,4 o około 5÷6% mniejsza od wartości średniej efektywnej prędkości. Jak wynika z równania (5.53) przy tego rzędu intensywności turbulencji wartość średnia efektywnej prędkości jest większa od rzeczywistej średniej prędkości przepływu o kilkanaście procent. Zatem wartość średnia prędkości zmierzona anemometrem niezlinearyzowanym jest bliższa rzeczywistej wartości średniej prędkości. Różnice między wartością średnią efektywnej prędkości uzyskaną z pomiaru anemometrem zlinearyzowanym i wartością średnią prędkości zmierzoną niezlinearyzowanym anemometrem były badane przez autorów w różnych punktach przepływu w modelu ograniczonego strumienia powietrza /58/. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.16. Podobnie jak to zrobiono dla prędkości średniej, można by przeanalizować dokładność pomiaru fluktuacji za pomocą anemometru niezlinearyzowanego, Taki sposób pomiaru jest jednak bardzo rzadko stosowany w praktyce ze względu na zmieniającą się czułość anemometru na fluktuacje predkości (p. rozdz. 5.3) i nie będzie tutaj omawiany.

## 5.6. Sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej w silnie burzliwych przepływach<sup>\*</sup>

Często w praktyce zachodzi potrzeba dokładnego pomiaru pola średniej prędkości przepływu przy nie znanym kierunku wektora średniej i bardzo dużej intensywności turbulencji przepływu. Tego typu przepływy występują np. w pomieszczeniach wentylowanych skupionymi strumieniami powietrza i w ich modelach.

Proponowana przez autorów metoda opiera się na założeniu, że wiadoma jest płaszczyzna, w której leży wektor prędkości średniej (może to wynikać z symetrii przepływu lub być wyznaczone wizualnie). W związku

<sup>\*</sup> Zgłoszenie patentowe NP 1165/54.



z tym można przyjąć, że wektor prędkości średniej leży w płaszczyźnie OXZ i ma składowe  $\overline{W}_x$ , 0,  $\overline{W}_z$ . Wektor prędkości chwilowej ma natomiast składowe  $\overline{W}_x$  +  $W'_x$ ,  $W'_y$ ,  $\overline{W}_z$  +  $W'_z$  (rys. 5.17).

Przyjmując pełną charakterystykę właściwości kierunkowych czujnika z gorącym drutem, opisaną równaniem (5.84), oraz że

$$W_{x1} = (\overline{W}_{x} + W'_{x}) \cos \alpha + W'_{y} \sin \alpha,$$

$$W_{y1} = (\overline{W}_{x} + W'_{x}) \sin \alpha - W'_{y} \cos \alpha, \qquad (5.93)$$

$$W_{z1} = \overline{W}_{z} + W'_{z},$$

otrzymuje się

$$\overline{W_{ef}^{2}}(\alpha) = (\overline{W}_{x}^{2} + \overline{W_{x}^{'2}}) \cos^{2} \alpha + \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}} \sin 2\alpha + \overline{W_{y}^{'2}} \sin^{2} \alpha + k_{1}^{2} [(\overline{W}_{x}^{2} + \overline{W_{x}^{'2}}) \sin^{2} \alpha - \overline{W_{x}^{'}W_{y}^{'}} \sin 2\alpha + \overline{W_{y}^{'2}} \cos^{2} \alpha] + k_{2}^{2} (\overline{W}_{z}^{2} + \overline{W_{z}^{'2}}).$$





Przekształcając powyższe równanie mamy

$$\overline{W_{ef}^{2}} = \overline{W}_{x}^{2} (\cos^{2} \alpha + k_{1}^{2} \sin^{2} \alpha) + \overline{W_{x}^{'2}} (\cos^{2} \alpha + k_{1}^{2} \sin^{2} \alpha) + + \overline{W}_{x}^{'} W_{y}^{'} (1 - k_{1}^{2}) \sin 2 \alpha + W_{y}^{'2} (\sin^{2} \alpha + k_{1}^{2} \cos^{2} \alpha) + + \overline{W}_{z}^{2} k_{2}^{2} + \overline{W_{z}^{'2}} k_{2}^{2}.$$
(5.95)

Można wybrać trzy położenia czujnika,  $\alpha = 0$ ,  $-45^{\circ}$ ,  $+45^{\circ}$ , i przy tych położeniach dokonać pomiaru wartości średniokwadratowych efektywnej prędkości. Łatwo wykazać, że

$$\overline{W}_{x}^{2} + \overline{W_{x}^{'2}} - \overline{W_{y}^{'2}} = \frac{2 \overline{W_{ef}^{2}} (\alpha = 0) - \overline{W_{ef}^{2}} (\alpha = -45^{\circ}) - \overline{W_{ef}^{2}} (\alpha = 45^{\circ})}{1 - k_{1}^{2}}.$$
 (5.96)

W warunkach istnienia pewnej lokalnej izotropowości przepływu charakteryzującej się tym, że

$$\overline{W_x^{!2}} = \overline{W_y^{!2}},$$

z równania (5.97) wyznaczyć można wartość średnią składowej x-owej wektora prędkości

$$\overline{W}_{x} = (1-k_{1}^{2})^{-\frac{1}{2}} \left[ 2 \overline{W_{ef}^{2}}(0) - \overline{W_{ef}^{2}}(45^{\circ}) - \overline{W_{ef}^{2}}(-45^{\circ}) \right]^{\frac{1}{2}}.$$
 (5.98)

Jeśli założenie  $\overline{W_x^{\prime 2}} = \overline{W_y^{\prime 2}}$  nie może być przyjęte, to popełniony zostanie błąd, którego wartość wynosi

$$\delta_{w} \approx \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{W_{x}^{*}}{\overline{W}_{x}} \right)^{2} - \left( \frac{W_{y}^{*}}{\overline{W}_{x}} \right)^{2} \right].$$
 (5.99)

Sposób ten uwzględnia rzeczywiste zmieniające się z prędkością właściwości kierunkowe czujnika z gorącym drutem. Przykładowy przebieg zmienności współczynnika  $(1 - k_1^2)^{-1/2}$  w zależności od prędkości przepływu przedstawiono na rys. 5.18.

W praktyce można zgodnie z tą metodą dokonać pomiaru wartości średniokwadratowej efektywnej prędkości w jeden z następujących sposobów:

a) zmieniając funkcję realizowaną przez linearyzator, tak aby jego napięcie wyjściowe było proporcjonalne do kwadratu efektywnej prędkości np.  $U_L = \left[ (U_N^2 - A)/B \right]^{2/n} = s_L W_{ef}^2;$  (5.100)

 b) stosując za układem zlinearyzowanego anemometru dodatkowy układ kwadratujący, jak omówiono w /57/;

c) wykorzystując zależność

$$\overline{W_{ef}^{2}} = \overline{W}_{ef}^{2} + \overline{W_{ef}^{2}};$$
 (5.101)

d) wyznaczając tę wartość poprzez pomiar rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych efektywnej prędkości na podstawie równania (D.10) (p. również rozdz. 3.4). Za pomocą analizatora prawdopodobieństwa można zmierzyć prawdopodobieństwo występowania wartości chwilowych napięcia wyjściowego z anemometru w przedziale  $U_{i-1} \leq U \leq U_i$ . Jest ono równe prawdopodobieństwu występowania wartości chwilowych efektywnej prędkości w przedziale  $W_{ef} \leq W_{ef}$ 

 $\Pr\left[\mathbf{U}_{i-1} \leq \mathbf{U} < \mathbf{U}_{i}\right] = \Pr\left[\mathbf{W}_{ef,i-1} \leq \mathbf{W}_{ef} < \mathbf{W}_{ef,i}\right] \approx \frac{n_{i}}{N},$ 

przy czym granice przedziałów związane są z sobą charakterystyką sta-





tycznej anemometru

$$W_{ef,i} = F^{-1}(U_i).$$

Wartość średniokwadratową prędkości wyznaczyć można przy użyciu przybliżonego wzoru sumacyjnego, będącego praktyczną realizacją równania 1.10

$$\overline{W_{ef}^{2}} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{K} \left( \frac{W_{ef,i-1} + W_{ef,i}}{2} \right)^{2} \cdot n_{i}.$$

Sposób d nie wymaga stosowania analogowego linearyzatora, możliwe jest uzyskanie dużej dokładności pomiaru  $p(W_{ef})$ . Można zatem uważać go za najkorzystniejszy.

Ze względu na małą czułość anemometru z gorącym drutem oraz wpływ konwekcji własnej na jego wskazania, zazanaczający się w zakresie prędkości mniejszych od około 0,15 m/s, proponowana metoda w tym zakresie prędkości będzie również obarczona dużym błędem, i trudnym do oszacowania. W tym zakresie prędkości można jednak dokładnie mierzyć składową wektora prędkości średniej za pomocą anemometru wibracyjnego LVA. DISA typ 55P80/81.

Na rys. 5.19 przedstawione są wyniki pomiaru prędkości w przekroju poprzecznym strumienia nawiewnego w modelu wentylowanej hali przemysłowej. Pomiary wykonano anemometrem DISA 55M10 z czujnikiem typ 55P11, sygnał mierzony był za pomocą analizatora prawdopodobieństwa wartości chwilowych typu KLA 2.

#### 6. ANEMOMETR LASEROWY

6.1. Właściwości pomiarowe anemometru laserowego

Anemometria laserowa wprowadza stosunkowo nową metodę pomiaru prędkości przepływu. Pierwsze publikacje na temat zastosowania tej metody pojawiły się w roku 1964 /59/, natomiast dopiero z początkiem lat siedemdziesiątych uruchomiona została seryjna produkcja anemometrów laserowych. Obecnie głównymi ich producentami są firmy: DISA Elektronik A/S i Thermo-Systems. Inc.

Anemometry laserowe posiadają szereg specyficznych właściwości pomiarowych, które można ująć następująco:

 określają prędkość ruchu cząstek w płynie i stąd wnioskuje się o prędkości przepływu nośnika; konieczny jest zatem dobór właściwości cząstek rozpraszających,

 informacji pomiarowych dostarcza wiązka światła wprowadzana do płynu, a więc pomiarowi nie towarzyszy wprowadzanie do strumienia czujnika, który mogłby zniekształcać pole prędkości; pewne zmiany w strukturze badanego przepływu mogą powodować cząstki rozpraszające dawkowane do płynu dla uzyskania sygnału Dopplera,

- zakres mierzonych prędkości jest praktycznie nieograniczony,

- charakterystyka statyczna przyrządu jest liniowa i nie ma potrzeby wzorcowania wskazań,

- mierzy się dowolnie wybraną składową wektora prędkości, dzięki czemu nie ma trudności w interpretacji sygnału; można precyzyjnie określić kierunek i moduł wektora prędkości; nadaje się do pomiaru przepływów oscylacyjnych i silnie burzliwych, gdyż można uzyskiwać wskazania rewersyjne.

Laboratorium Zakładu OWiOA Politechniki Śląskiej dysponuje anemo-



Rys. 6.1. Różnicowy układ anemometru laserowego z modulatorem częstotliwości wiązek przy obserwacji światła rozproszonego "w przód": 1-laser, 2 - układ optyczny z modulatorem, 3 - fotopowielacz

metrem laserowym DISA LDA Mark I wyposażonym dodatkowo w modulator częstotliwości wiązek laserowych. W układzie tego anemometru zastosowano laser He-Ne o mocy 5 mW oraz analogowy procesor śledzący częstotliwość Dopplera. Mała moc lasera sprawia, że jest on wykorzystywany praktycznie jedynie w układzie różnicowym przy obserwacji światła rozproszonego "w przód". Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 6.1.

W związku z małą mocą lasera przy zastosowanym analogowym procesorze częstotliwości Dopplera konieczne jest wprowadzenie do badanego strumienia dodatkowych cząstek (tzw. posiewu), rozpraszających światło laserowe. W ten sposób zwiększa się natężenie światła rozproszonego, a przez to stosunek sygnału do szumu. Sygnały te są niewystarczające, gdy rozproszenie następuje na naturalnych zanieczyszczeniach zawartych w powietrzu. Natomiast przepływ wody można w zasadzie mierzyć bez wprowadzania dodatkowych cząstek rozpraszających (p. rozdz. 4.2).

### 6.2. Metody generowania cząstek rozpraszających w anemometrii laserowej

Firma DISA produkuje od roku 1976 inžektorowy generator cząstek rozpraszających, który generuje cząstki o średnicach mniejszych od około 1  $\mu$ m /60/, natomiast firma TSI produkuje obecnie kilka różnych typów generatorów wytwarzających cząstki od ułamków do około 1  $\mu$ m i o wydajnościach od kilku do 30 1/min /61/.

# tabela 6.1

Typ generatora	Substancja tworząca aerozol	Wydaj- ność [l/min]	Średni- ca cząstek	Zanieczyszcz modelu przez szkło	enie ścianek aerozol plexi	Uwagi	
inżektorowy pojedynczy	woda-gliceryna 2 : 1	0,9	<5	nie zanie- czyszcza	słabo zanie- czyszcza	and a start	
inżektorowy 12-dyszowy	woda-gliceryna 2 : 1	10	<14	zanie	czyszcza	przewaga cząstek o dużych średnicach	
inżektorowy 12-dyszowy z komorą inercyjną	woda-gliceryna 2 : 1	10	<5	słabo zanie- czyszcza	zaniec zy szc za	możliwość rozcieńcza- nia uzyskanego aero- zolu z uwagi na du- żą koncentrację	
chemiczny	salmiak					silna koagulacja czą-	
	NH4CL + H2O	45	< 2	zanie- czyszcza	silnie zanie- czyszcza	stek, działanie ko- rodujące	
fluidyzacyjny	mączka bitu- miczna	30	<2,5	słabo zanie- czyszcza	zanieczyszcza	konieczne wstępne osuszenie pyłu i powietrza	



Rys. 6.2. Rozpylacz inżektorowy pojedynczy

W laboratorium Zakładu wykonano we własnym zakresie kilka typów generatorów, określono ich charakterystykę i wypróbowano je praktycznie. Na rys. 6,2 przedstawiono schemat rozpylacza (atomizera) inżektorowego pojedynczego. Rysunek 6.4 przedstawia wykonany ze szkła rozpylacz inżektorowy. Dysze mają średnice około 0,5 mm, ich ustawienie wzajemne może być zmienione, ponieważ połączone są za pomocą sprężynowego ściągacza mocującego. Generator ten zasilany jest sprężonym powietrzem

o ciśnieniu 1 ÷ 2 bar. Dobre wyniki pracy rozpylacza uzyskano stosując jako ciecz rozpyloną olej silikonowy Silal 150. W tabeli 6.1 zestawiono charakterystykę wykonanych generatorów posiewu. Pojedynczy rozpylacz inżektorowy ma małą wydajność i dlatego wykonano rozpylacz bateryjny posiadający 12 par dysz połączonych równolegle. Wydajność tego generatora wzrosła około dziesięciokrotnie. Ze względu na stosunkowo duże zużycie rozpylonej cieczy zrezygnowano ze stosowania oleju silikonowego, zastępując go mieszaniną wody i gliceryny w stosunku 2:1.

Wykonano również generator chemiczny cząstek chlorku amonowego. Widać go na rys. 6.5, natomiast jego schemat przedstawiono na rys. 6.3. Wykorzystuje się następującą reakcję chemiczną

 $NH_{4}OH + HC1 \rightarrow NH_{4}C1 + H_{2}O.$ 

Produkty wyjściowe to stężony kwas solny HCl oraz amoniak NH<sub>3</sub>, zmieszane z wodą destylowaną w stosunku 1:1. Pary muszą być dokładnie zmieszane w mieszalniku. W pierwszej wersji wykonano mieszalnik w kształcie spiralnej rury szklonej. Nie uzyskano jednak zadowalających wyników i dlatego zastąpiono go cylindryczną cyklonową komorą zmieszania. W komorze tej w dolnej części umieszczono styczny wlot, natomiast w górnej styczny wylot. Generator ten umożliwia uzyskanie znacznej wydajności wytwarzanego aerozołu.



Rys. 6.3. Schemat generatora cząstek chlorku amonowego



Rys. 6.4. Wykonany rozpylacz inżektorowy pojedynczy

Wykonano następnie generator fluidyzacyjny, jego schemat przedstawiony jest na rys. 6.6. Zasada działania polega na unoszeniu ziaren pyhu przez strumień powietrza. Dodatkowy poprzeczny strumień powietrza ułatwia eliminację dużych ziaren pyłu. Zastosowanym pyłem była mączka bitumiczna, która jest tania i łatwo dostępna. Mączkę tę wstępnie przesiewano dla oddzielenia ziaren większych niż 60 µm (masowy udział pozostałego pyłu wynosił około 70%), następnie oddzielono ziarna większe



Rys. 6.5. Wykonany generator cząstek chlorku amonowego



Rys. 6.6. Generator fluidyzacyjny: 1 - komora główna, 2 - zasobnik pyhu, 3 - zasuwa, 4 - mosiężna płyta, 5 - powierzchnia przepuszczalna (płótno), 6 - wibrator, 7 - komora osadcza, 8 - wylot, 9 - dysza strumienia poprzecznego, 10 - przepustnice, 11 - wlot, 12 - komora dolna od 5  $\mu$ m (pyły poniżej 5  $\mu$ m stanowiły około 60%). Pył pozostały przechowywano w suszarce w temperaturze 150°C. Był on materiałem, stosowanym później w generatorze fluidyzacyjnym.

Cząsteczki rozpraszające powinny wiernie śledzić ruch przepływającego płynu, jeżeli anemometr laserowy ma określać jego prędkość możliwie dokładnie. Zależy to, jak wiadomo, od masy cząsteczki. Im jest ona mniejsza, tym lepiej cząstka będzie śledzić szybkie fluktuacje występujące w przepływie /20, 51/. Jednakże zmniejszenie średnicy cząstek powoduje zmniejszenie natężenia promieniowania rozpraszającego (jest ono proporcjonalne do czwartej potęgi średnicy dla cząstek o wymiarach zbliżonych do długości fali światła, natomiast dla cząstek większych od długości fali jest proporcjonalne do drugiej potęgi średnicy). W układach anemometrów laserowych powoduje to zmniejszenie stosunku sygnału do szumu. Wymiary cząstek rozpraszających stosowanych w anemometrii laserowej zawierają się w granicach 0,1 ÷ 10 µm, typowe stężenie ich wynosi 10<sup>6</sup> cząstek na cm<sup>3</sup>. Przy dużych stężeniach cząstek rozpraszających wystąpić może zjawisko turbulizacji lub stabilizacji przepływu, dlatego istnieją ograniczenia nie tylko co do wymiarów cząstek, ale i ich steżenia /62/.

Zebrane doświadczenie wykazuje, że w przypadku posiadanego anemometru laserowego odpowiednie są cząstki o średnicach około 2 µm. W związku z tym przeprowadzono odpowiednie pomiary średnic cząstek generowanych przez wykonane generatory cząstek rozpraszających. Cząstki ciekłe wyłapywane były na płytkę szklaną pokrytą cienką warstwą tlenku magnezu, uzyskaną ze spalania wstążki metalicznego magnezu. Cząstki stałe wyłapywane były natomiast na czystą płytkę szklaną. Płytki wprowadzano na kilka sekund do strumienia aerozolu wypływającego z przewodów wylotowych generatorów. Otrzymane preparaty obserwowane były za pomocą mikroskopu biologicznego typu MB-30, wyposażonego w okular ze specjalną siatką pomiarową. Rzeczywistą wielkość obserwowanego ziarna uzyskano po uwzględnieniu współczynnika korygującego, powstałego przez porównanie siatki okularowej z podziałką podstawową o rzeczywistym odstępie kresek 10 µm. Dla kropel cieczy zastosowano dodatkowy współczynnik, podający stosunek średnicy kropli do średnicy jej śladu,
który przyjęto równy 0,858. Analizy ilustrowane były zdjęciami preparatów.

Średnice cząstek wytwarzanych w generatorze fluidyzacyjnym mierzone były dodatkowo za pomocą licznika firmy Tech Ecology Model 200-6, który znajduje się w Centrum Ochrony Środowiska w Katowicach. Pomiary wykonane metodą mikroskopową wykazały, że wśród cząstek generowanych przez generator fluidyzacyjny 84% jest mniejszych od 2 µm, natomiast pomiary wykonane optycznym licznikiem określiły udział tych cząstek na 90%.

Wymiary cząstek generowanych przez generatory posiewu mogą być zmniejszone, jeśli za generatorem zastosuje się odpowiedni separator ziaren. Taki separator w postaci komory inercyjnej zastosowano do rozpylacza inżektorowego 12-dyszowego. Zastosowanie tej komory pozwoliło oddzielić cząstki większe od 5 µm. Separator cząstek stosowany jest również w urządzeniach produkowanych fabrycznie, np. w 55117 DISA Seeding Generator.

Wydajność wykonanych generatorów określono na podstawie pomiaru profili prędkości w rurach. Dla rozpylaczy inżektorowych wydajność określono przy maksymalnej wartości ciśnienia roboczego. Stwierdzono jednakże, że przy stosowaniu posiadanego układu anemometru laserowego aerozol z 12-dyszowego rozpylacza z komorą inercyjną może być przynajmniej dwukrotnie "rozcieńczony" przez dodanie czystego powietrza. Wydajność maksymalna generatora chemicznego chlorku amonu oraz generatora fluidyzacyjnego określono przez obserwację jakości sygnału Dopplera w anemometrze. Zwiększano stopniowo przepływ, czemu towarzyszyło zmniejszanie się stężenia cząstek, aż do momentu, kiedy pogorszenie stosunku sygnału do szumu zaczęło objawiać się wzrostem czasu zrywania śledzenia częstotliwości Dopplera (ang. drop-out). Cząsteczki rozpraszające ulegają koagulacji, proporcjonalnej do kwadratu ich steżenia. Ponadto osadzają się na ściankach badanego urządzenia i powodują ich zanieczyszczenie. Po pewnym czasie uniemożliwia to wykonywanie pomiarów anemometrem laserowym.

Omówione rozpylacze inżektorowe cząstek ciekłych wykazały pełną ich przydatność do celów anemometrii laserowej.

108

Generator chemiczny chlorku amonu okazał się stosunkowo mało przydatny, ponieważ działanie powstających par jest silnie korodujące, praca jest niestabilna, przez co z czasem zmniejsza się stężenie cząstek, a cząstki te ulegają silnej koagulacji. Obecności pary wodnej w powietrzu przyspiesza proces koagulacji cząstek. Jednakże trudno uniknąć jej obecności, gdyż wynika ona z zasady działania generatora.

Generator fluidyzacyjny jest przydatny do celów anemometrii laserowej, posiada bowiem stosunkowo dużą wydajność i generuje niewielkie cząstki. Aby zmniejszyć szybkość ich koagulacji, konieczne jest bardzo dokładne osuszenie powietrza przed wlotem do generatora. Chemiczne sposoby osuszania powietrza okazują się niestety niezbyt wystarczające. Istotną zaletą takiego generatora jest łatwość regulacji wydajności.

Przeprowadzone w laboratorium Zakładu pomiary przepływów w różnych modelach wykazały, że korzystniejsze jest wykonywanie ścianek modeli ze szkła, ponieważ proces ich zanieczyszczania jest znacznie wolniejszy niż w przypadku zastosowania szkła organicznego.

## 6.3. Przygotowanie anemometru laserowego do pomiarów

W trakcie wykonywania pomiarów anemometrem laserowym konieczne jest dokonywanie zmiany położenia punktu pomiarowego, jaki tworzą przecinające się wiązki światła. Przemieszczanie modelu względem anemometru jest możliwe, ale zwykle zbyt kłopotliwe. Zmieniają się wymiary i szczegóły konstrukcyjne modeli, które ponadto łączone są zazwyczaj przewodami z dodatkowymi elementami układu badawczego.

W Zakładzie OWiOA wykonano koordynator X-Y, za pomocą którego przemieszcza się cały zestaw optyki anemometru laserowego w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, leżących w płaszczyźnie poziomej. Schemat koordynatora przedstawia rys. 6.7. Przesuwy wykonywane są ręcznie, napęd na elementy przenoszony jest poprzez śruby pociągowe o gwincie M14 x 1, co przy każdym obrocie śrub umożliwia przesuw układu o 1 mm. Liczba obrotów, a stąd aktualne położenie punktu pomiarowego, wskazywane są przez elektroniczne wskaźniki cyfrowe EWC-4, współpracujące z przetwornikami obrotowo-impulsowymi MPL-3, które



Rys. 6.7. Schemat koordynatora X-Y anemometru laserowego

są sprzężone przez przekładnie ze śrubami pociągowymi. Zakres przesuwu wynosi 350 x 350 mm przy dokładności 50 µm. W tym samym roku, w którym wykonano omawiany koordynator, firma DISA wyprodukowała nowy model anemometru laserowego Mark II, wyposażony w koordynator o analogicznej funkcji /63/.

Niekiedy konieczny jest również przesuw punktu pomiarowego w kierunku pionowym. Podnoszenie i opuszczanie stołu laboratoryjnego, na którym znajduje się koordynator X-Y i anemometr laserowy, jest praktycznie niemożliwe, dlatego w tym przypadku przemieszcza się model. Wykonano mechanizm ze śrubą pociągową, umożliwiający przemieszczanie w kierunku pionowym małych modeli. Większe modele zaopatruje się w prowadnice i podnosi się je lub opuszcza stosując podkładki o pożądanych grubościach.

W omawianym układzie anemometru laserowego możliwa jest zatem zmiana położenia punktu pomiarowego we wszystkich trzech kierunkach, a dokładność określenia zmiany położenia jest lepsza od 0,1 mm. Niestety mniejsza jest dokładność określenia współrzędnych początkowych punktu pomiarowego, dokonywane zwykle na ściance modelu. Ze względu na wymiary objętości pomiarowej można je określić na ogół z dokładnością nie większą niż około 0,5 mm.

Anemometr laserowy reaguje na składową w kierunku prostopadłym do dwusiecznej kąta przecięcia się wiązek laserowych. Aby móc poprawnie analizować wyniki, konieczne jest dokładne pokrywanie się tego kierunku z obraną osią układu współrzędnych pomiarowych. Jak wykazały doświadczenia, niezmiernie pomocne są wiązki odbite od zewnętrznej ścianki modelu. Jest to chyba jedyny przypadek, gdy wiązki odbite są praktycznie użyteczne. W innych przypadkach pojawianie się wiązek odbitych, jak również załamanie wiązek na ściankach modelu są zjawiskami niekorzystnymi. Materiał, z którego wykonano ścianki, powinien w związku z tym posiadać jednorodną, jak najmniejszą grubość, dużą czystość i nie powodować odbić.

Anemometria laserowa jest dziedziną bardzo szybko rozwijającą się. Obecnie produkowane są cyfrowe procesory częstotliwości Dopplera, stosuje się modułowe układy optyki i lasery dużej mocy. Możliwy jest nawet równoczesny pomiar wszystkich trzech składowych wektora prędkości przy obserwowaniu rozproszenia światła wstecz, na naturalnych zanieczyszczeniach płynu. Do analizy sygnałów stosowane są minikomputery. Anemometry laserowe są coraz częściej stosowane, ponieważ zakres ich możliwości pomiarowych stałe powieksza sie.

and and the standards of apprentice additional standards in the standards and

when apply property and an appropriate to other a weiters and the

# 7. ZASTOSOWANIA ANEMOMETRII DO BADAŃ MODELOWYCH PROCESÓW ODPYLANIA I WENTYLACJI

W rozdziale tym przedstawiono niektóre przykłady zastosowania różnych metod pomiaru prędkości przepływu do badań modelowych procesów odpylania i wentylacji, prowadzonych w Zakładzie Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery Politechniki Śląskiej. Ze względu na tematykę publikacji nie zawiera ona omówienia samych problemów badawczych, natomiast w skrócie przedstawia zastosowane metody pomiarowe, użytą aparaturę, wyniki pomiarów oraz wnioski dotyczące zastosowanych metod pomiaru prędkości.

## 7.1. Pomiary rozpływu powietrza wentylacyjnego

Pomiary te mają na celu określenie prędkości, kształtu i zasięgu strumieni powietrza, występujących wewnątrz pomieszczeń wentylowanych. Dąży się do uzyskania ogólnego obrazu ruchu mas powietrza w pomieszczeniu, do określenia wzajemnego oddziaływania strumieni, do wyodrębnienia przepływów wtórnych i obszarów zastoju powietrza. Badania oparte na fizycznym modelowaniu pozwalają w tym zakresie ustalić metody kształtowania rozpływu powietrza wentylacyjnego oraz tworzenia tą drogą pożądanych pól prędkości i temperatury powietrza w wybranych strefach pomieszczenia. Umożliwiają też określenie potrzebnej ilości powietrza napływającego do wnętrza, wywiewanego do otoczenia dla różnych wariantów układu wentylacyjnego.

W pomiarach dąży się do określenia kierunku przepływu powietrza i prędkości średniej tego przepływu. Informacje o kierunkach przepływu uzyskuje się zazwyczaj przez wizualizację strumieni i utrwalanie obrazu na fotografii. Rozkład prędkości w poszczególnych przekrojach mierzy się w wybranych punktach strumieni względnie w wybranej siatce pomiarowej.

Pomiary prędkości w modelach pomieszczeń wentylowanych wymagają zastosowania czułych anemometrów z czujnikami o małych wymiarach. Do tego celu dobrze nadaje się anemometr z gorącym drutem.

Pomiary takie wykonywane były m.in. w modelach wentylacji sal audytoryjnych /1/ i pomieszczeń domów handlowych /64/. Do pomiaru średniej prędkości przepływu stosowano anemometr z gorącym drutem, który pracował w układzie niezlinearyzowanym. Czujnik umieszczano w przepływie w taki sposób, aby jego włókno było prostopadłe do kierunku przepływu średniego, określonego na podstawie wizualizacji i aby zarazem kąt napływu był taki sam jak podczas wzorcowania. Sygnał wyjściowy uśredniany był w układzie RC. Prędkość przepływu odczytywano ze sporządzonej uprzednio krzywej wzorcowania anemometru. Do pomiarów wykorzystywane były anemometry DISA 55A01 oraz DAS 732.

Przepływy w strumieniach wentylacyjnych charakteryzują się dużą intensywnością turbulencji, dlatego otrzymana średnia prędkość przepływu różni się od prędkości rzeczywistej. Jednakże przy takiej metodzie pomiaru jest jej bliższa niż uzyskana z układu zlinearyzowanego anemometru z gorącym drutem. Różnica ta zależy od intensywności turbulencji przepływu i wartości średniej prędkości (p. rozdz. 5.5). Dopuszczano możliwość wystąpienia tego błędu, w zamian za to pomiary były stosunkowo proste i niepracochłonne. Obecnie w takich badaniach stosuje się opracowany w Zakładzie oryginalny sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej (p. rozdz. 5.6).

Ostatnio prowadzone były w laboratorium Zakładu badania modelowe wentylacji naturalnej hal przemysłowych z dużymi zyskami ciepła (obciążenie cieplne około 70  $W/m^3$ ). Przepływy wewnątrz modeli charakteryzowały się dużą nieizotermicznością, w związku z czym zastosowanie anemometrów z gorącym drutem okazało się niezbyt celowe. Dlatego do pomiaru prędkości przepływu zastosowano mikeorurkę spiętrzającą Prandtla, a ciśnienie dynamiczne mierzone było elektronicznym mikromanometrem pojemnościowym (p. rozdz. 3.3). Rysunek 7.1 przedstawia wnętrzne modelu hali przemysłowej. Po dokonaniu wizualizacji przepływu mikrorurka



Rys. 7.1. Wnętrze modelu hali przemysłowej z dużymi zyskami ciepła pomiar prędkości przepływu przy pomocy mikrorurki spiętrzającej Prandtla



Rys. 7.2. Wyniki pomiaru rozpływu powietrza w hali przemysłowej z dużymi zyskami ciepła przy wentylacji naturalnej

spiętrzająca ustawiana była tak, aby jej oś pokrywała się z kierunkiem przepływu średniego. Otrzymywane wyniki ilustruje rys. 7.2.

Pomiary pozwoliły określić ilość powietrza napływającego z zewnątrz oraz wpływ strumieni konwekcyjnych na cyrkulację i rozdział powietrza wewnątrz hali. Prędkość obliczano uwzględniając zmiany gęstości powietrza wywołane panującym w hali rozkładem temperatury. Stosowany układ pomiarowy ma liniową charakterystykę statyczną, ponieważ mikromanometr posiada wbudowany układ pierwiastkujący.

# 7.2. Pomiary prędkości ruchu powietrza w strefie roboczej pomieszczeń wentylowanych

Do określenia warunków mikroklimatu w strefie przebywania ludzi jest m.in. potrzebny pomiar prędkości ruchu powietrza. W strefie roboczej przepływy powietrza najczęściej charakteryzują się małymi wartościami prędkości średniej i znacznymi wartościami chwilowymi fluktuacji prędkości oraz znaczną zmiennością kierunku przepływu powietrza. Uzyskanie w tych warunkach powtarzalności wyników pomiarów wymaga długiego czasu uśredniania, rzędu kilkunastu minut w obiektach rzeczywistych i kilku minut w modelach, w przepływach występują bowiem fluktuacje prę<sup>4</sup>kości o częstotliwościach około 0,01 + 0,001 Hz.

Pomiary katatermometrem, popularne w praktyce przemysłowej, nie umożliwiają uzyskania rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych prędkości, a czas pomiaru takim przyrządem jest niewystarczający do uzyskania powtarzalności wyników.

Niedogodność tę można wyeliminować przez zastosowanie przetworników pomiarowych o małej stałej czasowej, współpracujących z analizatorami rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych (p. rozdz. 3.4). Ze względu na zmieniający się kierunek przepływu powietrza zaleca się stosowanie czujników reagujących na moduł wektora prędkości, czyli niekierunkowych (p. rozdz. 3.2). W pierwszych badaniach prowadzonych w Zakładzie stosowano do pomiaru prędkości w strefie roboczej anemometr gorącym drutem DISA 55M12 z czujnikiem 55P81. Czujnik ten jest silnie kierunkowy (p. rozdz. 5.4) i wystąpiły trudności w interpretacji wyników. Szacowano, że uzyskiwana w ten sposób mediana rozkładu wartości chwilowych prędkości nie różniła się więcej aniżeli <sup>+</sup> 10% od mediany rzeczywistego rozkładu wartości chwilowych modułu wektora prędkości, otrzymywane rozproszenie rozkładu było jednak znacznie większe od rzeczywistego.



Rys. 7.3. Przykładowy przebieg dystrybuanty chwilowych wartości prędkości otrzymany z pomiarów ogrzewanej powietrzem w modelu hali przemysłowej

Obecnie dostępne są niekierunkowe czujniki produkowane przez firmę DISA. W laboratorium Zakładu stosuje się do takich celów czujniki z gorącymi termistorami perełkowymi typu NTC, wykonywane we własnym zakresie, mogą one współpracować z anemometrem DISA 55M12. Opracowany jest również oryginalny anemometr z gorącym termistorem perełkowym z automatyczną kompensacją temperatury.

Przykłady przebiegu dystrybuanty rozkładu wartości chwilowych prędkości powietrza, opracowane na podstawie pomiarów w modelu hali przemysłowej ogrzewanej ciepłym powietrzem, przedstawiono na rys. 7.3. Uzyskano bardzo dobrą powtarzalność wyników. Badania pozwoliły na określenie sposobów rozprowadzania powietrza, przy których uzyskuje się odpowiednio wyrównane rozkłady temperatury i prędkości. Ocenić można również, czy prędkości te nie przekraczają dopuszczalnych wartości ze względu na samopoczucie ludzi. Przez odpowiednie ukształtowanie rozpływu powietrza wentylacyjnego można wyeliminować obszary o niekorzystnych warunkach komfortu cieplnego /65/.

#### 7.3. Badanie struktury przepływu powietrza w pomieszczeniach

Często do rozpoznania zjawisk dyssypacji energii, dyfuzji turbulentnej, weryfikacji zakresu samomodelowania zjawisk przepływu itp. potrzebny jest pomiar parametrów charakteryzujących strukturę turbulentnego przepływu powietrza. W laboratorium Zakładu prowadzone są aktualnie badania nad wpływem burzliwości początkowej na rozprzestrzenienie się strumieni wentylacyjnych /66/ i badania nad określeniem warunków samomodelowania przepływów w procesach wentylacji. Pomiary wykonywane są na stanowisku do badania strumienia swobodnego (rys. 7.4) oraz na stanowisku do badania struktury strumienia wentylacyjnego (rys. 7.5).

Pomiary struktury przepływu powietrza wykonywane są anemometrami z gorącym drutem. Przygotowywane są one do pomiarów według procedury opisanej w rozdziale 5.3. W układzie pomiarowym (rys.7.6) jednokanałowego anemometru z gorącym drutem dokonuje się pomiarów średniej prędkości przepływu i fluktuacji podłużnych wektora prędkości. Analizując sygnał prędkości z anemometru, uzyskuje się funkcję gęstości widmowej mocy fluktuacji prędkości i funkcję autokorelacji sygnału prędkości.



Rys. 7.4. Stanowisko do badania struktury przepływu w strumieniu swobodnym



Rys. 7.5. Stanowisko do badania struktury przepływu w strumieniach nawiewnych w modelach hali przemysłowej



Rys. 7.6. Schemat układu do pomiaru struktury turbulencji przepływu jednokanałowym anemometrem z gorącym drutem

Dokonując pomiaru wartości skutecznej pierwszej pochodnej w czasie fluktuacji podłużnych wektora prędkości, wyznaczyć można mikroskalę turbulencji Taylora według równania D. 35 w Dodatku. Pomiar fluktuacji po-



Rys. 7.7. Schemat układu od pomiaru naprężeń normalnych i stycznych anemometrem z czujnikiem typu X



Rys. 7.8. Przyjęty układ współrzędnych siatki pomiarowej w badaniach struktury turbulencji strumienia nawiewnego

przecznych i naprężeń stycznych wykonywany jest w układzie dwukanałowego anemometru z czujnikiem typu X (rys. 7.7), metodą opisaną w rozdziale 5.5.

Przykłady wyników badań struktury strumienia wentylacyjnego w modelu hali przemysłowej (rys. 7.8) przedstawione zostały na rys. 7.9 ÷ 7.12. W obszarze P<sub>1</sub>, zaznaczonym na rys. 7.9, średnia prędkość przepływu jest mniejsza od 0,15 m/s i wyniki mogą być obarczone znacznym błędem, gdyż przy tak małych prędkościach przepływu pomiary anemometrem z gorącym drutem są mało dokładne (p. rozdz. 5).

Zaprezentowane tutaj metody pomiaru są w zasadzie przeznaczone do pomiarów w przepływach o intensywności turbulencji mniejszej od 25%.



Rys. 7.9. Wyniki pomiaru średniej prędkości przepływu, wartości skutecznej fluktuacji podłużnych i poprzecznych oraz naprężeń stycznych w strumieniu nawiewnym

W strumieniach wentylacyjnych często intensywność turbulencji przepływu jest większa, dlatego wyniki pomiaru tymi metodami mogą być obarczone pewnym trudnym do oszacowania błędem. Zastosowanie metod specjalnie przeznaczonych do przepływów o dużej intensywności turbulencji (rozdz. 5.6) pozwala błędy te eliminować. Porównanie wyników uzyskanych standardową metodą oraz metodą specjalnie przeznaczoną do przepływów silnie burzliwych, prezentowane w pracy /57/, wykazuje znaczną przewagę tej ostatniej. Jednakże różnice w wynikach pomiarowych nie są bardzo duże. Przy dopuszczeniu pewnej zmniejszonej dokładności pomiaru standardowe metody mogą okazać się korzystne dzięki zmniejszeniu pracochłonności



Rys. 7.10. Wyniki pomiaru mikroskali turbulencji w strumieniu nawiewnym



Rys. 7.11. Wyniki pomiaru współczynnika autokorelacji w strumieniu nawiewnym w modelu hali przemysłowej: x = 15 d, z/x = 0,07



Rys. 7.12. Wyniki pomiaru funkcji gęstości widmowej mocy fluktuacji prędkości w strumieniu nawiewnym w modelu hali przemysłowej: x = 15 d, z/x = 0.07

pomiarów i opracowywania wyników.

W badaniach Zakładu przeprowadzono również próby zastosowania anemometru laserowego do pomiarów struktury strumieni nawiewanych /58/. Okazał się on w pełni przydatny. Niestety posiadany typ anemometru laserowego umożliwia jedynie pomiary w bardzo małych modelach.

7.4. Pomiary ruchu gazu w cyklonie

Przepływy wirowe są przepływami trójwymiarowymi, przy czym nie jest znany w nich kierunek wektora prędkości średniej. Dotychczas pomiary takich przepływów wykonywane były najczęściej za pomocą spiętrzających sond kulowych. Ponieważ w przepływach wirowych występują znaczne gradienty prędkości i ciśnienia, uzyskiwane wyniki pomiaru sondami kulowymi budzą wątpliwości. Precyzyjnym instrumentem do pomiaru przepływów wirowych okazuje się anemometr laserowy, pozwala on bowiem mierzyć wybrane składowe wektora prędkości.

W zakładzie OWiOA dokonano pomiaru ruchu gazu w części stożko-



Rys. 7.13. Schemat stanowiska pomiarowego do badania ruchu gazu w cyklonie: 1 - autotransformator, 2 - wentylator, 3 - rozpylacz inżektorowy, 4 - manometr, 5 - komora inercyjna, 6 - wyrównywacz przepływu, 7 - odcinek wlotowy, 8 - cyklon, 9 - kryza pomiarowa, 10 - mikromanometr



Rys. 7.14. Stanowisko pomiarowe do badania ruchu gazu w cyklonie za pomocą anemometru laserowego

.



Rys. 7.15. Bieg promieni laserowych w części stożkowej cyklonu

wej cyklonu, wykorzystując do tego celu anemometr laserowy DISA LDA MARK I /67/. Stanowiska pomiarowe przedstawiono na rys. 7.13 i 7.14. Przestrzenią pomiarową była część stożkowa modelu cyklonu, o średnicach 103/40 mm i wysokości 138 mm wykonana ze szkła (rys. 7.15). Do pomiarów zastosowano 12-dyszowy rozpylacz inżektorowy z komorą inercyjną (p. rozdz. 6). Na rys. 7.16 przedstawiono profile składowej osiowej oraz stycznej prędkości gazu zmierzone w różnych przekrojach części stożkowej cyklonu. Wysapiły r tomiast istotne trudności pomiarowe w wyznaczeniu profilu składowej promieniowej. Pomiar tej składowej wymaga bowiem dokładnego określenia położenia średnicy Dy (ilustruje to rys. 7.17), wzdłuż której należy wykonać pomiar. Niewielkie odchylenia od tej średnicy spowodowałyby, że anemometr mierzyłby jakąś prędkość wypadkową z prędkości stycznej i promieniowej, co przy bardzo małych wartościach składowej promieniowej w stosunku do prędkości stycznej może być źródłem błędu, rzędu kilkuset procent. Dokładne określenie położenia średnicy pomiarowej Dy jest trudne z uwagi na:



Rys. 7.16. Składowa osiowa (a) i styczna (b) prędkości gazu w wybranych przekrojach części stożkowej cyklonu



Rys. 7.17. Ilustracja wpływu niedokładności określenia położenia punktu pomiarowego na wyniki pomiaru składowej promieniowej

 pojawiający się brak współosiowości ruchu wirowego gazu z osią symetrii części stożkowej cyklonu,

125

 niedokładności ustalenia współrzędnych początkowych punktu pomiarowego usytytuowanego na ściance modelu,

 - zmianę położenia punktu pomiarowego, wywołaną zjawiskiem dwukrotnego załamywania się promieni laserowych przy przejściu przez ściankę modelu.

Sporządzono uogólnione profile składowych osiowej i stycznej prędkości gazu, przedstawione na rys. 7.18, i opisano funkcjami typu

$$W_{o} = W_{w} \left[ a_{o} + a_{2} \left( \frac{r}{R_{z}} \right)^{2} + a_{3} \left( \frac{r}{R_{z}} \right)^{3} \right],$$
 (7.1)

$$W_s = W_w \left(\frac{r}{R_z}\right)^m$$
 (7.2)

Profil składowej promieniowej uzyskano na drodze obliczeń. W tym celu skorzystano z warunku ciągłości przepływu, zapisanego dla dwóch dowolnych pierścieni wyodrębnionych w części stożkowej cyklonu (rys. 7.19a)



 $W_r(p) 2\pi r d_z = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$  (7.3)

Rys. 7.18. Uogólnione profile składowych osiowej (a) i stycznej (b) prędkości gazu w cyklonie





gdzie

9 =

$$\dot{v}_{1} = 2\pi R_{z1}^{2} W_{w} \int \hat{W}_{o}(\rho) \rho d\rho,$$

$$V_{2} = 2\pi R_{z2}^{2} W_{w} \int \hat{W}_{o}(\rho') \rho' d\rho',$$

$$\frac{r}{R_{z}}, \rho' = \rho + d\rho, \quad R_{z2} = R_{z1} + dR_{z} \quad dR = -\frac{R_{1} - R_{2}}{h} dz. \quad (7.4)$$

1

Po podstawieniu tych zależności do równania (7.3) i skorzystaniu z równania (7.1) otrzymano

$$\hat{W}_{r} = \frac{R_{1} - R_{2}}{h} \, \varphi \left( - \frac{a_{2}}{2} \, \varphi^{2} - \frac{3}{5} \, a_{3} \, \varphi^{3} \right).$$

Obliczony profil składowej promieniowej przedstawia rys. 7.19b.

# 7.5. Badania przepływu w modelu płuczki kontaktowej

Badania te miały na celu wypracowanie kształtu części podpółkowej płuczki kontaktowej typ PKO, skonstruowanej przez OPAM Katowice.



Rys. 7.20. Stanowiska do badania przepływu w modelu płuczki kontaktowej za pomocą anemometru laserowego

Badano przepływy gazu w płuczce pod kątem uzyskania zamierzonego rozkładu prędkości. Jednocześnie z pomiarami na urządzeniu przemysłowym prowadzono badania modelowe elementów płuczki w pomniejszonej skali. Badania przeprowadzono dwuetapowo:

a) w modelu wycinkowym komory płuczki dokonano analizy ruchu gazu
 po wypływie z dyszy do przestrzeni wypełnionej rusztami,

 b) w modelu wlotu gazu do dyszy przeprowadzono aerodynamiczną optymalizację kształtu części wlotowej płuczki z uwagi na poprawę równomierności przepływu wewnątrz dyszy.

Pomiary prędkości przepływu w etapie a wykonano anemometrem laserowym. Ilustruje to rys. 7.20. Wycinkowy model w skali 1:10 wykonano ze szkła organicznego. Jako źródło cząstek rozpraszających zastosowano generator chemiczny cząstek chlorku amonowego. Z powodu silnej higroskopijności cząstek salmiaku woda w modelu została zastąpiona gliceryną.

W badaniach przepływu gazu w płuczce kontaktowej dążono do określe-



Rys. 7.21. Wyniki pomiaru wektora średniej prędkości w części podpółkowej płuczki kontaktowej

nia uśrednionych linii prądu gazu. Wykonane pomiary składowej pionowej i poziomej przeprowadzono na trzech wysokościach. Rysunek 7.21 ilustruje otrzymane wyniki, wartości oraz kierunki wektorów średniej prędkości przepływu. Korzystając z faktu, że wektor prędkości w danym punkcie jest styczny do toru cząstki gazu można wyznaczyć interesujące linie prądu. W ramach praktycznej interpretacji wyników stwierdzono, że dla wyrównania rozkładu prędkości na poziomie pierwszego rusztu celowe byłoby umieszczenie nad powierzchnią cieczy w pobliżu ścianek wylotowej części dyszy elementów kierujących, umożliwiających zakrzywianie się strumieni gazu w stronę zewnętrznej ściany komory płuczki.



Rys. 7.22. Stanowisko do pomiaru rozkladu prędkości wewnątrz dyszy w modelu części wlotowej płuczki kontaktowej





W etapie b pomiary wykonywane były za pomocą zlinearyzowanego anemometru z gorącym drutem, tak jak przedstawiono na rys. 7.22. Ze względu na niewłaściwe ukształtowanie króćca wlotowego płuczki na wypływie z niej tworzył się silnie zniekształcony profil prędkości. W dużej mierze wynikało to z istnienia "martwej" przestrzeni w przepływie w pobliżu włazu rewizyjnego w części wlotowej. Likwidując tę przestrzeń uzyskano znaczną poprawę profilu prędkości, a jego nierównomierność zlikwidowano całkowicie przez zmianę kształtu części wlotowej płuczki. Tą drogą udało się zdecydowanie wyrównać przepływ w dyszy. Wyniki pomiarów przy zmodyfikowanym kształcie części wlotowej do płuczki ilustruje rys. 7.23.

# 7.6. Pomiary opływu sond pyłowych

W trakcie tych badań anemometr laserowy wykorzystany był do określenia rozkładu prędkości w strefie spiętrzenia przed wlotem do sondy pyłowej zerowej, prędkościowej oraz specjalnej opracowanej przez ZAM PMN w Kętach. Sondy pyłowe były umieszczane w przewodzie o średnicy 168 mm i długości 2 m, wykonanym ze szkła organicznego. W celu wyrównania przepływu na wlocie do przewodu umieszczono ulownicę, wykonaną z rurek szklanych o średnicy wewnętrznej 10 mm. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na rys. 7.24.

W prowadzonych badaniach zaszła konieczność zapewnienia posiewu o normalnym stężeniu, w przepływie o wyjątkowo dużym natężeniu  $8 \cdot 10^4$  l/min. Żaden z posiadanych generatorów nie zapewnił tak dużej wydajności. Zdecydowano się zastosować zamknięty obieg aerozolu w układzie badawczym, a ubytek cząstek rozpraszających uzupełniać za pomocą 12-dyszowego rozpylacza inżektorowego. W ten sposób udało się uzyskać zadowalające rezultaty.

W przewodzie pomiarowym w obszarze o średnicy około 0,6 D uzyskano bardzo dobrze wyrównany rozkład prędkości. Maksymalna średnica zewnętrzna badanych sond była równa 0,12 D. Sondy umieszczono w osi przewodu w odległości 1,7 m od jego początku. Prędkości mierzono w osi przed wlotem do sond. Niektóre wyniki przedstawiono na rys. 7.25.



Rys. 7.24. Schemat stanowiska do badania aerodynamiki sond pyłowych: 1 - wentylator, 2 - rozpylacz inżektorowy, 3 - ulownica, 4 - rurka Prandtla, 5 - rura, 6 - strefa objęta pomiarami anemometrem laserowym, 7 - sonda pyłowa, 8 - filtr, 9 - wentylator ssący, 10, 11, 12 - mikromanometry, 13 - wylot







Rys. 7.26. Profile składowej osiowej prędkości gazu w odległości 0,3 D od wlotu do sondy pyłowej prędkościowej

Prędkości w przekrojach poprzecznych w kilku odległościach od wlotu do sondy ilustruje rys. 7.26.

Uzyskane wyniki pozwoliły określić dla każdej z badanych sond obszar występującej przed nią strefy spiętrzenia oraz zaburzenia prędkości przepływu gazu.

#### 7.7. Pomiary pola prędkości aerozolu w modelu pieca szybowego

Badania pola prędkości aerozolu nad powierzchnią wsadu w piecu szybowym stanowiły fragment szerszych badań modelowych zmierzających do optymalizacji kształtu części wylotowej takich pieców z uwagi na zmniejszenie ilości unoszonego pyłu /68/.

Badania te prowadzone były dwuetapowo. W pierwszym etapie mierzono pole prędkości czystego gazu. Wykonano je w fizykalnym modelu o skali liniowej 1:20 wycinka pieca szybowego. Zastosowano do tego celu anemometr laserowy DISA LDA MARK I, wyposażony w modulator częstotliwości wiązek laserowych, przedstawiony na rys. 7.27. Rolę generatora posiewu pełnił rozpylacz inżektorowy opisany w rozdziale 6.2.

W węzłach siatki pomiarowej dokonano pomiarów wartości średniej składowej pionowej i poziomej wektora prędkości (rys. 7.28). Na podstawie odpowiedniego programu interpolacyjnego można było uzyskać informację o wartościach tych składowych w dowolnym punkcie pola pomiarowego.



Rys. 7.27. Stanowisko do pomiaru pola średniej prędkości przepływu gazu w modelach pieca szybowego





Dokładna znajomość pola prędkości czystego gazu pozwoliła na przeprowadzenie w drugim etapie matematycznej analizy ruchu ziaren pyłu w rozważanym obszarze, czego nie można było mierzyć. Do opisu ruchu ziaren pyłu przyjęto układ równań

$$\frac{d}{d\tau} \frac{W_{zx}}{d\tau} = -A \left[ W_{zx} - W_{gx}(x,y) \right],$$

$$\frac{d}{d\tau} \frac{W_{zy}}{d\tau} = -A \left[ W_{zy} - W_{gy}(x,y) \right] - g,$$

$$\frac{d}{d\tau} \frac{x}{d\tau} - W_{zx},$$

$$\frac{d}{d\tau} \frac{y}{d\tau} = W_{zy},$$

136

gdzie

$$A = \frac{18 v_g}{d_z^2} \frac{\rho_g}{\rho_z} \quad dla \quad \text{Re}_z \leq 2,$$

$$A = \frac{18 v_g}{d_z^2} \frac{\rho_g}{\rho_z} \frac{18.5}{24} \cdot \text{Re}_z^{0,4} \quad dla \quad 2 < \text{Re}_z < 500,$$

$$\text{Re}_z = \frac{W \cdot d_z}{v_g}, \quad W = \sqrt{(W_{zx} - W_{gx})^2 + (W_{zy} - W_{gy})^2}$$

Opis ten jest słuszny przy następujących założeniach upraszczających: - ruch ziaren pyłu nie zniekształca przepływu czystego gazu, co przy występujących w piecu stężeniach pyłu jest dopuszczalne,

- nie uwzględnia się fluktuacji wektora prędkości,

 znane są współrzędne położenia oraz składowe prędkości ziarna pyłu w chwili początkowej,

- przyjęty układ równań dotyczy płaskiego dwuwymiarowego przepływu,

- nie uwzględnia się oddziaływania między ziarnami pyłu.



Rys. 7.29. Uśrednione tory cząstek gazu

Całkowanie układu równań przeprowadzono metodą łamanych Eulera. Wielkość inkrementu czasu dobrano tak, aby przy powtórnym rozwiązaniu równań dla dwukrotnie mniejszego inkrementu czasu różnica wyników po ustalonym czasie była mniejsza od zadanej wartości 0,01%.

W pierwszym etapie badań określono więc tory ruchu czystego gazu,



Rys. 7.30. Wizualizacja przepływu gazu w piecu szybowym na wannie hydraulicznej



Rys. 7.31. Tory ruchu ziaren pyłu o średnicach 60, 80 i 98 µm



Rys. 7.32. Wpływ prędkości i kąta wyrzutu cząstek pyłu z powierzchni wsadu na tory ich ruchu

których wyniki przedstawiono na rys. 7.29. Wyniki te warto porównać z torami czystego gazu, otrzymanymi z badań w wannie hydraulicznej, które ilustruje rys. 7.30. Następnie poddano analizie ruch ziaren pyłu. Obliczone tory ruchu ziaren pyłu, wprowadzanych do przepływającego gazu bez prędkości początkowej, przedstawione są na rys. 7.31. Następnie określono wpływ kierunku i wartości początkowej wektora prędkości ziaren na tory ich ruchu (rys. 7.32). Z uzyskanych wyników wynika, że przy przyjętym kształcie pieca szybowego ziarna o średnicach przewyższających 100 µm nie powinny być unoszone z gazami odlotowymi poza jego obręb.

# 8. DODATEK. DEFINICJE 1 PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Podano poniżej charakterystyki procesów losowych przy założeniu ich stacjonarności i ergodyczności, przy którym dane charakterystyki można wyznaczyć metodą uśredniania w czasie poszczególnych funkcji losowych.

Wartość średnia

$$\overline{S} = \lim_{\tau_{r} \to \infty} \frac{1}{\tau_{r}} \int_{0}^{\tau_{r}} S(\tau) d\tau.$$

(D.1)

Wartość średniokwadratowa

$$\overline{S^2} = \lim_{\tau_{\mathbf{r}} \to \infty} \frac{1}{\tau_{\mathbf{r}}} \int_{0}^{\tau_{\mathbf{r}}} S^2(\tau) \, d\tau. \qquad (D.2)$$

Wariancja (wartość średniokwadratowa fluktuacji)

$$\overline{S'^2} = \lim_{\tau_r \to \infty} \frac{1}{\tau_r} \int_0^{\tau_r} \left[ S(\tau) - \overline{S} \right]^2 d\tau, \qquad (D.3)$$

gdzie

Przy

$$S(\tau) - \overline{S} = S' \qquad (D.4)$$

nazywana jest fluktuacją.

<u>Wartość skuteczna fluktuacji</u> (odchylenie standardowe) jest pierwiastkiem kwadratowym z wariancji

$$s^* = \sqrt{s^2}$$
. (D.5)

Funkcja rozkładu wartości chwilowych jest to prawdopodobieństwo Pr. że chwilowa wartość sygnału S(T) będzie zawarta w przedziałe (S. S++  $\Delta$ S) K

$$p_{1}(S) = \Pr\left[S \leqslant S(\tau) < S + \Delta S\right] = \lim_{r \to \infty} \frac{\sum_{i=1}^{r} \Delta \tau_{i}}{\tau_{r}} = \lim_{\tau_{r} \to \infty} \frac{\tau_{s}}{\tau_{r}} \cdot (D.6)$$
czym
$$\tau_{s} = \sum_{i=1}^{K} \Delta \tau_{i}$$

jest to sumaryczny czas, podczas którego wartości chwilowe  $S(\tau)$  są zawarte w przedziale (S, S +  $\Delta$ S) w interwale czasu  $\tau_r$ . Gęstość prawdopodobieństwa wartości chwilowych

$$p(S) = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Pr[S \leq S(\tau) < S + \Delta S]}{\Delta S} = \lim_{\Delta S \to 0} \lim_{\tau_{\pm} \to \infty} \frac{1}{\tau_{r}} \frac{\tau_{s}}{\Delta S} . \quad (D.7)$$

Dystrybuanta

$$P(S) = Pr\left[S(\tau) < S\right] = \lim_{\tau_r \to \infty} \frac{\sum_{j=1}^{r} \tau_j}{\tau_r}$$
, (D.8)

przy czym  $\sum_{j=1}^{L} \tau_j$  jest to sumaryczny czas, podczas którego wartości chwilowe S( $\tau$ ) są mniejsze od S w interwale czasu  $\tau_r$ .

Podstawowe związki między funkcjami statystycznymi wyrażonymi równaniami od D.1 do D.8:

$$\overline{S} = \int_{-\infty}^{+\infty} S p(S) dS, \qquad (D.9)$$

$$\bar{s}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2 p(s) ds,$$
 (D.10)

$$\overline{S^{2}} = S^{*2} = \int_{-\infty}^{+\infty} [S(\tau) - \overline{S}]^{2} p(S) dS,$$
 (D.11)

$$P(S) = \int_{-\infty}^{S} p(S) dS,$$
 (D.12)

$$P(S_1) - P(S_2) = Pr[S_1 < S(\tau) < S_2] = \int_{S_1}^{2} p(S) dS.$$
 (D.13)

Funkcja gęstości widmowej mocy

$$\Phi(\omega_{i}) = \lim_{\Delta\omega \to 0} \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\Delta\omega \tau_{r}} \int_{0}^{\tau} S^{2}(\omega_{i}, \tau) d\tau. \quad (D.14)$$

Pomiędzy funkcją gęstości widmowej mocy a wariancją zachodzi związek

$$\overline{S'^2} = \int_0^\infty \Phi(\omega) \, d\omega. \qquad (D.15)$$

Funkcja gęstości widmowej mocy może zostać unormowana następująco:

$$\Psi(\omega) = \frac{\oint (\omega)}{S^{1/2}} . \qquad (D.16)$$

Funkcja autokorelacji

$$R_{s}(\tau_{p}) = \lim_{\tau_{p} \to \infty} \frac{1}{\tau_{r}} \int_{-\frac{\tau_{p}}{2}} S'(\tau) S'(\tau - \tau_{p}) d\tau, \quad (D.17)$$

przy przesunięciu czasowym  $\tau = 0$  zachodzi

$$R_{s}(0) = \overline{S'^{2}},$$
 (D.18)

czyli funkcja autokorelacji jest równa wariancji. Funkcja autokorelacji może zostać unormowana przez podzielenie przez wariancję

$$\rho_{s}(\tau_{p}) = \frac{R_{s}(\tau_{p})}{S,2}$$
 (D.19)

i wtedy nosi nazwę współczynnika autokorelacji.

<u>Twierdzenie Wienera - Chinczyna.</u> Funkcja autokorelacji  $\mathbb{R}_{s}(\tau_{p})$  stacjonarnego procesu stochastycznego oraz gęstość widmowa mocy  $\Phi(\omega)$  są ze sobą jednoznacznie związane przekształceniem Fouriera

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{s}(\tau_{p}) e^{-j\omega \tau_{p}} d\tau_{p}$$
 (D.20)

oraz

$$R_{s}(\tau_{p}) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \Phi(\omega) \cos \omega \tau_{p} d\tau. \qquad (D.21)$$

Interkorelacja w czasie

$$\mathbb{R}_{s_1s_2}(\tau_p) = \lim_{\substack{\tau_r \to \infty \\ r \to \infty}} \frac{1}{\tau_r} \int_{-\frac{\tau_r}{2}}^{+\frac{\tau_r}{2}} S_1(\tau + \tau_p) S_2(\tau) d\tau, \quad (D.22)$$

Tr

unormowana:

$$\rho_{s_1s_2}(\tau_p) = \frac{\frac{R_{s_1s_2}(\tau_p)}{s_1^* \cdot s_2^*}}{s_1^* \cdot s_2^*} .$$
 (D.23)

#### Łączna gęstość prawdopodobieństwa

jest prawdopodobieństwem tego, że jednocześnie wartości  $S_1(\tau)$  zawarte są w przedziale od  $S_1$  do  $S_1 + \Delta S_1$ , a wartości  $S_2(\tau)$  w przedziale od  $S_2$  do  $S_2 + \Delta S_2$ 

$$p(S_1, S_2) = \lim_{\substack{\Delta S_1 \neq 0 \\ \Delta S_2 \neq 0}} \frac{1}{\Delta S_1 \cdot \Delta S_2} \left[ \lim_{\tau_r \neq \infty} \frac{\tau_{s_1 s_2}}{\tau_r} \right], \quad (D.24)$$

gdzie  $\tau_{s_1s_2} = \sum_{i=1}^{K} \Delta \tau_i$  oznacza sumę przedziałów czasu, w ciągu których

nocześnie S(T) i S(T) zna

jednocześnie  $S_1(\tau)$  i  $S_2(\tau)$  znajdują się odpowiednio w przedziałach  $(S_1, S_1 + \Delta S_1), (S_2, S_2 + \Delta S_2)$  w czasie trwania obserwacji  $\tau_r$ . Całkowa skala czasu(makroskala czasu)

$$\tau_{c} = \int_{0}^{\infty} \rho_{s}(\tau_{p}) d\tau_{p}. \qquad (D.25)$$

Mikroskala czasu

$$\tau_{\rm m} = \left[ -\frac{2}{\left(\partial^2 \rho_{\rm s} / \partial \tau_{\rm p}^2\right)_{\rm o}} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(D.26)

lub

$$\tau_{\rm m} = \frac{2 {\rm s}^2}{\left(\frac{\partial {\rm s}}{\partial \tau}\right)^2} \qquad (D.27)$$

Interkorelacja w przestrzeni

$$R_{S_1 S_2}(r) = \overline{S_1(x_p) \cdot S_2(x_p + r)} =$$

$$= \lim_{\substack{\tau_r \to \infty}} \frac{\tau_r/2}{\tau_r} \int_{-\tau_r/2} S_1(x_p \cdot \tau) \cdot S_2(x_p + r, \tau) d\tau, \quad (D.28)$$

unormowana interkorelacja przestrzenna

$$\rho_{s_1s_2}(\mathbf{r}) = \frac{R_{s_1s_2}(\mathbf{r})}{s_1^* \cdot s_2^*} .$$
 (D.29)

Calkowa skala długości (makroskala długości)

$$L = \int_{0}^{\infty} \rho_{s_{1}s_{2}}(r) dr. \qquad (D.30)$$

Mikroskala długości

$$\lambda = \left\{ -\frac{2}{\left[\partial^2 g_{s_1 s_2}(r) / \partial r^2\right]_0} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(D.31)

lub

$$A = \left[\frac{2\overline{s'^2}}{\left(\frac{\partial s}{\partial r}\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}} . \qquad (D.32)$$

Mikroskala Taylora

$$A_{x} = \left[\frac{W_{x}^{2}}{\left(\frac{\partial W_{x}}{\partial x}\right)^{2}}\right]^{\frac{1}{2}}.$$
 (D.33)

Hipoteza Taylora

$$x \approx \overline{W} \cdot \tau$$
;  $\frac{\partial W_x}{\partial x} \approx \frac{1}{\overline{W}} \frac{\partial W_x}{\partial \tau}$ . (D.34)

Wykorzystując tę hipotezę, równanie D.33 przyjmuje postać

$$\lambda_{x} = \overline{w} \left[ \frac{\overline{w_{x}^{\prime 2}}}{\left( \frac{\partial w_{x}}{\partial \tau} \right)^{2}} \right]^{\frac{1}{2}} = \overline{w} \cdot \frac{w_{x}^{*}}{\left( \frac{\partial w_{x}}{\partial \tau} \right)^{*}}$$
(D.35)
- Mierzwiński S., Majerski S.: Modelowanie procesów wentylacji, Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej. Ogrzewanie i Wentylacja, Arkady, Warszawa 1972.
- Gorbis Z.R.: Tiepłoobmien i gidromiechanika dispiersnych skwoznych potokow, Energija, Moskwa 1970.
- Kołodziejczyk L., Rubik M., Mańkowski S.: Pomiary w Inżynierii Sanitarnej, Arkady, Warszawa 1974.
- DISA CTA SYSTEM, DISA Information Department, November 1976.
- 5. Richards B.E.: Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena, Hemisphere Publishing Corporation 1977.
- Almqust P., Legath E.: Das Hitzdraht Anemometer bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten in Luft, DISA Information Nr 2, Juli 1965.
- Praca zbiorowa: Wykonanie oraz montaż i oprzyrządowanie stanowisk badawczych, Spr.wozdanie z realizacji etapu' 3.2. podtematu 3 problemu węzłowego 10.1.1a - 02.24, Głiwice grudzień 1975.
- Portable Pressure and Flow Analyser, Furness Control Limited FCO 60.
- Pichon J.: Comparison of Some Methods of Calibrating Hot Film Probes in Water, DISA Information Nr 10, October 1970.
- Rubatto G.: Eichung von Geschwiudigkeitssonden für Flüssigkeiten im Bereich von 2 - 5 m/s, DISA Information Nr 9 Februar 1970.
- Franke P.G., Preuss K.: A Suitable Method for Calibration of Hot
  Film Probes DISA Information Nr 10, October 1970.
- Majakin W.P., Donczenko E.G.: Elektronnyje sistiemy dla awtomatizirowannogo izwiedienija charaktieristik potokow żidkostiej i gazow, Energija, Moskwa 1970.
- Bonis M., van Thinh N.: A Heat Transfer law for a Conical Hot -Film Probe in Water DISA Information Nr 14, March 1973.
- Pluister J.W., Nagib H.M.: Evaluation of a Hot Film Calibration Tunnel for low - velocity Water Flows, DISA Information Nr 17, February 1975.

- 15. Rassmussen C.G.: The Air Boubble Problem in Water Flow Hot -Film Anemometry, DISA Information Nr 5, June 1967.
- Hot Wire Hot Film ION Anemometer Systems Thermo -Systems INC, 1975.
- Reynolds A.J.: Turbulent Flows in Engineering, John Wiley and Sons, 1974.
- Bradshaw P.: An Introduction to turbulence and Its Measurement, Mir, Moskwa 1974; thum. na język ros.
- 19. Hinze J.O.: Turbulence, Mc Graw Hill Book Company, 1975.
- Materiały Sympozjum LDA VIBROMETER 5-7, listopad 1977, Kraków.
- Hardeman L.: Development of a thermistor anemometer for the measurements of air velocities in ventilated rooms, National Swedish Building Research, 1974.
- 22. Omnidirectional Probes for indoor climate investigations, Karta Informacyjna DISA, September 1977.
- 23. Probe Manual, DISA, February 1976.
- Anemometr stałotemperaturowy N 190 Meratronik Instrukcja Obsługi.
- DISA Type 55 D 80/81 Low Velocity Anemometer Instrukcja Obsługi.
- 26. Kiełbasa J., Rysz J., Smolarski A.Z., Stasicki B., The Oscillatory anemometer.
- 27. Katalog firmy Weather Measure Corporation, 1975.
- Velometer for measurement of air velocity and pressure, AEJ Publication 2298-1 Edition C.
- 29. Recknagel, Sprenger: Ogrzewanie i Klimatyzacja Poradnik, Arkady 1976.
- 30. Hagel R.: Miernictwo Dynamiczne, WNT, Warszawa 1975.
- Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, PWN, 1976.
- Lapiński M.: Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych, WNT, Warszawa 1974.
- 33. Smolarski A.Z.: Technika pomiarowa w badaniach turbulencji,

Materiały sympozjum Turbulencja 74, Częstochowa 1974.

- 34. Katalog firmy DISA 1972/73.
- 35. Tunelik TCS-2, Instrukcja użytkowania, Politechnika Łódzka, 1960.
- 36. Notes on New Products, New Anemometer Calibration Equipment, DISA Information Nr 13, May 1972.
- Bradbury I.J.S., Castro I.P.: Some Coments on heat transfer Laws for fine wires, J. Fluid Mechanics, 51, part 3 (1972).
- Collis D.C., Wiliams M.J.: Two dimensional Convection From Heated Wires at Low Reynolds Numbers, J. Fluid Mechanics, <u>6</u> (1959).
- Anemometria z gorącym drutem i gorącą folią, Sympozjum firmy DISA AGH Kraków, wrzesień 1973.
- Larsen S.E., Busch N.E.: Hot-Wire Measurements in the atmosphere, Part I DISA Information Nr 16, July 1974.
- Elsner J., Gundlach W.: Some remarks on the thermal equilibrium equation of hot-wire probes, DISA Information Nr 14, 1973.
- Elsner J., Phusa S.: Odwzorowanie sondy termoanemometru w zakresie większych prędkości przepływu, Materiały Sympozjum Turbulencja 74, Częstochowa 1974.
- 43. Smólski Z., Sobkowska H.: Eksperymentalna weryfikacja 3. znanych metod odwzorowania charakterystyk czujników termoanemometrycznych, Materiały III Krajowej Konferencji Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- Instruction and Service Manual for 55 D 10 Linearizer, June 1970.
- 45. Type 55 M 25 Linearizer, Advance Information DISA, February 1975.
- 46. Automatic Data Acquisition System 3052 A Hewlett Packard, Technical Data 1, November 1976.
- 47. DISA Constant Temperatur Anemometer 55 A 01, Instruction Manual, June 1966.
- Nielsen P.E., Rasmussen C.G.: Messung der Frequenzkurve von Amplitude und Phase, DISA Information Nr 4, Marz 1967.

146

- Durst F.: 10 LDA Application Notes DISA Information Department 1975.
- Palka S., Smolarski A., Żurawska I.: Laserowy anemometr dopplerowski z cyfrową analizą wyników, Materiały Sympozjum Turbulencja 74, Częstochowa 1974.
- Melling A., Whitelaw J.H.: Optical and Flow Aspects of Porticles, Proceedings of the LDA Symposium, Copenhagen 1975.
- 52. Smólski Z., Sobkowska H.: Wpływ wilgotności względnej przepływającego powietrza na charakterystyki czujników termoanemometrycznych, Materiały III Krajowej Konferencji Mechaniki Cieczy i Gazów, Częstochowa 1978.
- 52. Drubka R.E. i in.: Analysis of Temperatur Compensating Circuits for Hot-Wires and Hot - Films, DISA Information Nr 22, December 1977.
- 54. Bearman P.W.: Corrections for the Effekt of Ambient Temperatur Drift on Hot - Wire Measurements in Incompressible Flow, DISA Information Nr 11, May 1971.
- 55. Konevce G., Oka S.: Correcting Hot Wire Readings for Influence of Fluid Temperature Variations, DISA Information, October 1973.
- 56. Jorgensen F.E.: Directional Sensitivity of Wire and Fiber Film Probes, DISA Information Nr 11, May 1971.
- 57. Rodi W.: A New Method of Analysing Hot Wire Signals in Highly Turbulent Flow and Its Evaluation in a Round Jet, DISA Information Nr 17, February 1975.
- 58. Musioł Wojciechowska M., Popiołek M.: Pomiary prędkości przepływu powietrza w modelu strumienia ograniczonego, Pol. Śl. Wydz. IS, 1977; praca dypl. pod kier. Mierzwińskiego S., Popiołka Z.
- Introduction to Proceedings of the LDA Symposium, Copenhagen 1975.
- Type 55 L 17 Seeding Generator, Advance Information DISA, August 1976.
- 61. Laser Anemometer Systems From Thermo Systems Inc.
- 62. Gregor W.: Limits Imposed on the Concentration and Size of Tracer Particles in Laser Doppler Anemometer DISA Information Nr 22,

December 1977.

- Type 55-LDA Mark II laser Doppler Anemometer Instruction Manual DISA, 1974.
- 64. Majerski S., Trzeciakiewicz Z., Wąsacz M.: Strumieniowy nawiew powietrza do pomieszczeń domów handlowych, Ciepł. Ogrzew. Went. Nr 6, czerwiec 1976.
- 65. Turkiewicz K.: Analiza rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniach przy nawiewaniu strumieni nieizotermicznych, Gliwice 1976; praca doktorska Inst. Inż. Ochr. Środ. Pol. Sl.
- 66. Soerich E., Turkiewicz K.: Kształtowanie strumieni nawiewnych w układach "termowentylacji" VI Krajowa Konf. n-t Wentyl. w Bud. i Przemyśle, Kraków 1978.
- 67. Papierniak U., Skolska G.: Badanie toru ruchu gazu w cyklonie anemometrem laserowym, Pol. Śl. Wydz. IS, Gliwice 1978; praca dypl. pod kier. Mierzwińskiego S., Grabek E., Popiołka Z.
- Pałasz J.: Kształtowanie przepływu gazów w piecach przemysłowych z uwagi na zmniejszenie ilości unoszonego pyłu, Pol. Śl., Gliwice 1978; praca doktorska.

## 10. АНЕМОМЕТРИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЯЦИИ И ОБЕСПЫЛЕВАНИЯ

## Изложение

Настоящая монография посвящена методам измерений скорости и турбулентности течения, и их применения для исследований в области обеспылевания газов и вентиляции.При её разработке были использованы многолетние опыты получены Институтом Отопления, Вентиляции и Охраны Воздуха, Политехнического Института в Гливицах. В настоящей работе указаны собственные достижения в области анемометрии на фоне современных решений в этой области.

Для процессов обеспылевания и вентиляции характерная небольшая скорость движения газа, от нескольких см/сек до около 20 м/сек. Очень часто, особенно в физических моделях вентиляции, скорости течения меньше 1 м/сек. Выступают неизотермические, двух и трёхмерные течения, с различной интенсивностью турбулентности.

На основании приведённого просмотра свойств применяемых в настоящее время анемометров видно, что для измерений средней скорости течения можно применять несколько типов анемометров, но измерение турбулентности течения возможно лишь с помощью термоанемометров в режиме постоянной температуры и лазерных анемометров. Был сделан тоже просмотр применяемых в настоящее время преобразователей для анализа и измерения сигнала скорости, линеаризаторов, вольтметров среднего и действующего значения, анализаторов функций распределения вероятности мгновенных значений, анализаторов частотных спектров и корреляции.

В работе указаны специально разработанные методы тарировки анемометров в течении воздуха в пределах скорости ниже 1 м/сек: метод тарировки в ламинарном течении воздуха в трубе, и метод заключающийся в перемещении датчика анемометра в неподвижном воздухе. Обсуждается тоже метод тарирования в течении воды в месте вытекания из сопла в свободном потоке в пределах скорости от нескольких мм/сек до 5 м/сек.

Опираясь на собственные опыты широко анализируются метрологические свойства анемометров с нагретой нитью. Указаны, между прочим, вопросы линеаризации статической характеристики, анализ направленных свойств датчиков анемометров, чувствительность к изменениям физических свойств воздуха. Много внимания уделяется интерпретации сигнала анемометра с нагретой нитью в течениях с низкой и высокой интенсивностью турбулентности. Из проведённых анализов вытекают методы измерения: средней скорости течения, избранных компонентов вектора средней скорости, продольных и поперечных пульсации скорости, турбулентных касательных напряжений Ре<sup>#</sup>нольдса.

На основании проведённых исследований видно, что лазерный анемометр в некоторы случаях является удобным измерительным прибором. В настоящей работе указаны опыты в этой области и в области строения генераторов рассевающих частиц, для лазерной анемометрии.

Указаны тоже примеры применения обсуждённых измерительных методов для исследований процессов вентиляции и обеспылевания. В области вентиляции указаны примеры измерения в натуральных объектах и в их физических моделях, течения вентиляционного воздуха, скорости в рабочей зоне вентилированных помещений, турбулентности течения воздуха в потоках. Из области обеспылевания приводятся примеры измерения движения газа в цикпоне, в модели скруббера, измерения обтекания пылевых датчиков и измерения скорости аерозола в модели шахтной печи.

and a second the second of the second s

150

## 11. ANEMOMETRY AND ITS APPLICATIONS IN MODEL INVESTIGATIONS OF VENTILATION AND DUST REMOVAL PROCESSES

## Summary

The present monograph deals with several methods of flow velocity and turbulence measurements as well as with applications of these methods in dust removal and ventilation processes. The monograph has been elaborated on the base of the many years' experience acquired by numerous investigations carried out in the Heating, Ventilation and Atmosphere Protection Department of the Silesian Technical University in Gliwice. The authors present their own achievements in the field of anemometry against a background of the recent results accomplished in this field.

The flows in dust removal and ventilation processes are characterized by low velocities of gas motion, covering the range between one or two cm/s and about 20 m/s. Very often velocities are lower than 1 m/s, particularly in physical modelling of ventilation processes. Nonisothermal, two-and three-dimensional flows with very differentiated turbulence intensities are of frequent occurrence. The survery of the features of the presently used anemometers has resulted in a conclusion that for the measurement of the flow mean velocity several types of anemometers can be used whereas the measurement of the flow turbulence practically can be performed only with the use of CTA hot-wire anemometers and LDA laser anemometers. The monograph surveys also the measurement equipment being presently in use for velocity signal processing, linearyzers, mean and RMS voltmeters; amplitude probability analyzers; spectrum analyzers and correlators.

The authors present specially elaborated methods for calibration of anemometers in air flows with the velocities lower than 1 m/s, namely:

the calibration method employed in developed laminar air flow in a pipe and the method consisting in traversing the anemometer probe in still air. The method of calibration in water flow in a free jet discharging from a nozzle for velocity range from one or two mm/s to 5 m/s has also been discussed.

Basing on the results of their own investigations the authors extensively analyse the measuring properties of hot wire anemometers. The problems of the anemometer signals linearization, the analyses of directional sensitivities of anenometer probes and their sensitivities to the changes of air physical properties have been also presented. Great consideration has been given to the interpretation of the hot wire anemometer signal in the flows with low and high turbulence intensities. The methods of the measurements of the flow mean velocity, the required component of the mean velocity vector, longitudinal and lateral fluctuations, and turbulence shear stress have been obtained as a result of the performed analyses.

On the base of the tests it has been shown that the LDA anemometer is in some flows a very useful measuring converter. The monograph presents the experience achieved in this field as well as in the field of seeding particles generators constructing for the purpose of laser anemometry.

In completion some instances of applications of presented methods in the investigations of ventilation and air removal processes have been presented, namely, in the field of ventilation processes, the measurements of ventilating air flow, the measurements of air velocity in a working zone of ventilated rooms and the measurements of air turbulence in jets (the measurements were carried out in actual buildings as well as in their models). In the field of air removal processes the authors present the instances of gas motion measurements in a cyclone and of flow tests in a model of a scrubber, the measurements of flows around dust probes and the measurements of aerosol velocity field in a shaft furnace model.

Errata		
Jest		Powinno być
ISBN	83-04-0054-5-X	ISBN-83-04-00324-4

St. Mierzwiński, Z. Popiolek: Anemometria...

