

# Implementacja i badania parametrów metrologicznych różnicowego anemometru z falą cieplną w adaptacyjnym komputerowym systemie termooanemometrycznym

MAREK GAWOR, ANDRZEJ RACHALSKI

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Przedstawiono badania różnicowego anemometru z falą cieplną przy użyciu adaptacyjnego komputerowego systemu termooanemometrycznego. Badania prowadzono w układzie z pojedynczym detektorem fali w trzech położeniach detektora względem nadajnika: równoległym, prostopadłym i ukośnym. Zbadano pola amplitudy i przesunięcia fazowego fali cieplnej zarejestrowane w wymienionych konfiguracjach układu nadajnik-detektor dla wybranych wartości prędkości przepływu powietrza w zakresie 20÷300cm/s i częstotliwości fali w zakresie 5÷90Hz. Przeprowadzono analizę niedokładności obliczania prędkości za pomocą fal cieplnych przy użyciu metody stałej odległości i stałej częstotliwości z dwoma detektorami fali oraz metody różnicowej opartej na wyznaczeniu zależności przesunięcia fazowego fali cieplnej od jej częstotliwości przy zastosowaniu pojedynczego detektora i dwóch detektorów. Metodę różnicową z jednym detektorem zastosowano do pomiaru prędkości przepływu w różnych konfiguracjach detektora względem nadajnika fali. Przedstawione rezultaty wskazują na możliwość użycia nierównoległego układu nadajnik-detektor w metodzie różnicowej pomiaru prędkości przepływu gazu.

**Słowa kluczowe:** metrologia, termooanemometria, system pomiarowy, anemometr falowy

## Lista symboli:

$Q$	– intensywność źródła fali cieplnej
$T$	– temperatura
$a$	– współczynnik kierunkowy prostej regresji
$b$	– wyraz wolny prostej regresji
$c$	– ciepło właściwe płynącego gazu
$r$	– odległość detektora od źródła fali
$t$	– czas
$P$	– bezwymiarowy parametr
$U_R$	– prędkość przepływu rzeczywista
$U_C$	– prędkość przepływu obliczona
$\alpha\zeta$	– zespolony argument
$\delta$	– funkcja Diraca
$\delta a$	– standardowa niepewność pochodnej fazy po częstotliwości
$\delta U_C$	– standardowa niepewność wyznaczonej prędkości
$\varphi$	– przesunięcie fazy fali cieplnej względem źródła
$\Delta\varphi$	– przesunięcie fazy fali na detektorach
$\Delta r$	– odległość między detektorami
$\varepsilon_U^I, \varepsilon_U^{II}, \varepsilon_U^{III}$	– względne błędy obliczonej prędkości
$\kappa$	– dyfuzyjność cieplna gazu
$\rho$	– gęstość gazu
$\omega$	– częstotliwość fali cieplnej
$\nabla^2$	– operator Laplace'a

## 1. Wstęp

W Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN od lat prowadzone są badania termooanemometrycznych metod pomiaru prędkości przepływu płynów. Wynikiem tych prac są nowe metody pomiarowe, które znalazły zastosowanie w skonstruowanych w Pracowni przyrządach pomiarowych. Różnorodność stosowanych metod termooanemometrycznych zrodziła potrzebę posiadania uniwersalnego narzędzia badawczego służącego do eksperymentalnej weryfikacji nowych koncepcji pomiarowych. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie było zbudowanie adaptacyjnego komputerowego systemu pomiarowego. Szczegółowy opis systemu przedstawiono w pracy [1]. Należy zaznaczyć, że istotną jego zaletą jest elastyczność, która umożliwia badania różnych termooanemometrycznych układów pomiarowych; poza typowymi układami stałotemperaturowymi mogą to być np. wielowłóknowe układy do pomiaru wektora prędkości, termooanemometr z modulowanym współczynnikiem nagrzania, wielowłóknowe układy z oddziaływaniem cieplnym i inne. Możliwe są też badania pól temperatury i prędkości wokół umieszczonych w przepływającym powietrzu obiektów. Wśród prac, jakie ostatnio przeprowadzono przy użyciu systemu znalazły się badania termooanemometru z falą cieplną. Rezultatem prowadzonych prac było opracowanie różnicowego anemometru z falą cieplną przeznaczonego do bardzo dokładnych pomiarów prędkości w zakresie  $0,1 \div 3$  m/s. Przedstawione badania są kontynuacją prac prowadzonych w poprzednim roku [1] i polegały na zbadaniu możliwości zastosowania w układzie anemometru różnicowego z falą cieplną i detektora umieszczonego skośnie względem nadajnika fali. Spodziewaną zaletą takiego rozwiązania jest mniejszy wpływ pochodzących od nadajnika fali zakłóceń pola prędkości na sygnał detektora.

## 2. Analiza teoretyczna

Rozchodzenie się fali cieplnej w gazie opływającym źródło z prędkością  $U_R$  opisuje równanie przewodnictwa cieplnego:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T - U_R \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{\rho c} Q(t) \quad (1)$$

Jego rozwiązanie przy założeniu stałych parametrów płynącego gazu i prostopadłego napływu na nieskończone liniowe źródło o periodycznie zmiennej w czasie intensywności  $Q(t) = Q_0 \delta(x_0) \delta(y_0) \exp(-i\omega t)$  zostało podane przez Kielbasę [2]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q_0}{2\pi\kappa\rho c} \exp\left(\frac{U_R x}{2\kappa} - i\omega t\right) \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha z}} \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

Z rozwiązania (2) wyznaczyć można zależność amplitudy i fazy fali cieplnej w funkcji czasu i odległości od źródła:

$$\varphi(r, \omega, \kappa, U_R) = \frac{U_R r}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{16\kappa^2 \omega^2}{U_R^4}} - 1 \right)} + \frac{1}{4} \arctan \frac{4\kappa\omega}{U_R^2} \quad (3)$$

gdzie  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  jest odległością od źródła fali. Aby zmierzyć prędkość należy w badanym przepływie umieścić źródło fali cieplnej oraz jeden lub więcej detektorów fali. Jeżeli położenie detektora względem nadajnika jest stałe, to mamy następujące możliwości:

1. pomiar przesunięcia fazowego fali między źródłem fali a umieszczonym w znanej odległości detektorem,
2. pomiar przesunięcia fazowego fali na dwóch detektorach odległych wzajemnie o  $\Delta r$
3. pomiar metodą różnicową z wykorzystaniem do obliczenia prędkości pochodnej  $\frac{d(\Delta\varphi)}{d\omega}$  i w tym wypadku można również zastosować jeden lub dwa detektory.

W przypadku pierwszym, prędkość można wyliczyć wprost ze wzoru (3) (co jest w praktyce kłopotliwe), lub korzystając z jego asymptotycznego rozwinięcia. Podstawiając  $P = \frac{4\kappa\omega}{U_R^2}$  otrzymujemy:

$$\varphi(r, \omega, \kappa, U_R) = \frac{U_R r}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1+P^2} - 1 \right)} + \frac{1}{4} \arctan P \quad (4)$$

Bezwymiarowy parametr  $P$  jest niewielki, nawet dla małych prędkości. Na przykład dla powietrza w temperaturze pokojowej  $\kappa = 0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$  i dla  $\omega = 40\pi \text{ rad/s}$ ,  $U = 30 \text{ cm/s}$ , otrzymujemy  $P^2 = 0.012$ . Pomijając drugi wyraz sumy po prawej stronie oraz rozwijając wewnętrzny pierwiastek w szereg i biorąc dwa pierwsze wyrazy rozwinięcia dostajemy:

$$\varphi(r, \omega, U_C) = \frac{\omega r}{U_C} \quad (5)$$

Wstawiono tu  $U_C$  w miejsce  $U_R$  dla zaznaczenia, że mamy tu do czynienia nie z prędkością rzeczywistą, lecz jej przybliżeniem. Jest to związek zawsze prawdziwy, gdy  $U_C$  jest prędkością fazową fali. Przybliżenie takie oznacza, że zaniedbano rozmycie kształtu fali spowodowane dyfuzją cieplną, co widać we wzorze (5), gdyż znika zależność przesunięcia fazy od przewodnictwa temperaturowego. Powyższa analiza odnosi się również do przypadku drugiego, z tą różnicą, że wyraz z  $\arctan$  znika od razu po obliczeniu względnej różnicy faz na dwóch detektorach i otrzymujemy:

$$\Delta\varphi(\Delta r, \omega, \kappa, U_R) = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{U_R \Delta r}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1+P^2} - 1 \right)} \quad (6)$$

Analizując trzeci przypadek trzeba obliczyć pochodną przesunięcia fazy po częstotliwości. Dla ustalonej wartości prędkości przesunięcie fazy fali cieplnej jest tylko funkcją parametru  $P$ , więc pochodna przesunięcia fazowego opisanego zależnością (4) częstotliwości będzie równa:

$$\frac{d(\varphi)}{d\omega} = \frac{\partial(\varphi)}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r}{U_R} \sqrt{\frac{\sqrt{1+P^2} + 1}{1+P^2}} + \frac{1}{4\omega} \frac{P}{1+P^2} \quad (7)$$

Gdy używamy dwóch detektorów otrzymujemy:

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{d\omega} = \frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\Delta r}{U_R} \sqrt{\frac{\sqrt{1+P^2} + 1}{1+P^2}} \quad (8)$$

Ponieważ w parametrze  $P$  występuje częstotliwość fali, to pochodna, zgodnie z powyższym wzorem nie jest stała, lecz zależy od częstotliwości. W granicy, gdy  $P$  zmierza do zera pochodna osiąga granicę równą  $\frac{r}{U_R}$ , a więc nie zależy od częstotliwości i podstawą do obliczenia prędkości w metodzie różnicowej jest wyrażenie:

$$U_C = \left( \frac{d(\Delta\varphi)}{d\omega} \right)^{-1} \Delta r \quad (9)$$

Obliczmy teraz niedokładności przedstawionych przybliżeń. Dla dwóch detektorów przy stałej częstotliwości z (5) i (6) otrzymujemy, że względna różnica  $\varepsilon_U^I$  pomiędzy prędkością wyliczoną  $U_C$  a rzeczywistą  $U_R$  wynosi:

$$\varepsilon_U^I = \left| 1 - \frac{U_C^I}{U_R} \right| = \left| 1 - \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1+P^2} + 1 \right)} \right| \quad (10)$$

W przypadku metody różnicowej z dwoma detektorami błąd przybliżenia  $\varepsilon_U^{II}$  otrzymujemy porównując wzory (8) i (9) i jest on dany zależnością:

$$\varepsilon_U^{II} = \left| 1 - \frac{U_C^{II}}{U_R} \right| = \left| 1 - \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{1+P^2} + 1}{1+P^2}} \right)^{-1} \right| \quad (11)$$

Jeżeli stosujemy metodę różnicową z jednym detektorem, z porównania wzorów (7) i (9) otrzymujemy:

$$\varepsilon_U^{III} = \left| 1 - \frac{U_C^{III}}{U_R} \right| = \left| 1 - \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{1+P^2}+1}{1+P^2}} + \frac{\kappa}{U_R} \frac{1}{1+P^2} \right)^{-1} \right| \quad (12)$$

W tab. 1 przedstawiono wartości wyrażonych w promilach względnych błędów  $\varepsilon_U^I$ ,  $\varepsilon_U^{II}$  i  $\varepsilon_U^{III}$  obliczonej prędkości  $U_C$  dla wybranych rzeczywistej prędkości przepływu powietrza  $U_R$  i częstotliwości fali cieplnej. Jak widać ze wzorów (10) i (11)  $\varepsilon_U^I$  i  $\varepsilon_U^{II}$  zależą od prędkości przepływu i częstotliwości fali poprzez parametr  $P$ , natomiast w przypadku  $\varepsilon_U^{III}$  dochodzi jeszcze bezpośrednia zależność od prędkości przepływu. Względne błędy przedstawionych przybliżeń są niewielkie pod warunkiem, że stosujemy je w odpowiednich zakresach wartości parametru  $P$ . Jest oczywiste, że zastosowanie dwóch detektorów daje lepszą dokładność przybliżenia, z uwagi na znikanie wyrazu z  $\arctan P$  we wzorach na różnicę faz fali cieplnej. Dokładność metody różnicowej jest *a priori* gorsza, jednak w praktyce pomiar tą metoda jest dokładniejszy, ponieważ pojedynczy pomiar przesunięcia fazy jest obciążony większą niepewnością niż przedstawione błędy. Obliczone wartości błędu  $\varepsilon_U^{III}$  wskazują, że badania porównawcze układu pomiarowego z detektorem umieszczonym pionowo, poziomo i ukośnie względem nadajnika można przeprowadzić korzystając tylko z jednego detektora.

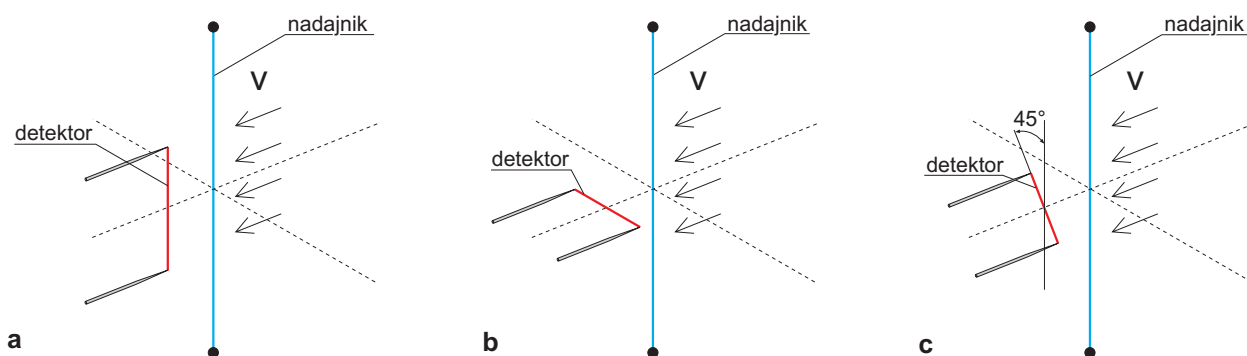
Tab. 1. Względne niedokładności obliczonej prędkości metodą fal cieplnych w zależności od częstotliwości fali i prędkości przepływu:  $\varepsilon_U^I$  – metoda stałej odległości i stałej częstotliwości z dwoma detektorami fali,  $\varepsilon_U^{II}$  – metoda różnicowa z dwoma detektorami,  $\varepsilon_U^{III}$  – metoda różnicowa z jednym detektorem

$U_R$ [cm/s]	$f$ [Hz]	$P$	$\varepsilon_U^I \times 10^3$	$\varepsilon_U^{II} \times 10^3$	$\varepsilon_U^{III} \times 10^3$
10	5	0,057	0,4	1,2	17
10	10	0,113	1,6	4,7	13
10	20	0,226	6,3	18	1,4
10	50	0,565	36	108	91
10	80	0,905	84	244	229
20	5	0,014	0,03	0,08	8,8
20	10	0,028	0,1	0,30	8,6
20	20	0,057	0,4	1,2	7,7
20	50	0,141	2,4	7,4	1,4
20	80	0,226	6,2	18	10
50	5	0,002	0,001	0,002	3,6
50	10	0,005	0,003	0,008	3,6
50	20	0,009	0,01	0,03	3,6
50	50	0,023	0,06	0,2	3,4
50	80	0,036	0,16	0,5	3,1
100	5	0,001	<0,001	<0,001	1,8
100	10	0,001	<0,001	<0,001	1,8
100	20	0,002	0,001	0,002	1,8
100	50	0,006	0,004	0,012	1,8
100	80	0,009	0,010	0,031	1,8
200	5	<0,001	<0,001	<0,001	0,9
200	10	<0,001	<0,001	<0,001	0,9
200	20	0,001	<0,001	<0,001	0,9
200	50	0,001	<0,001	<0,001	0,9
200	80	0,002	0,001	0,002	0,9

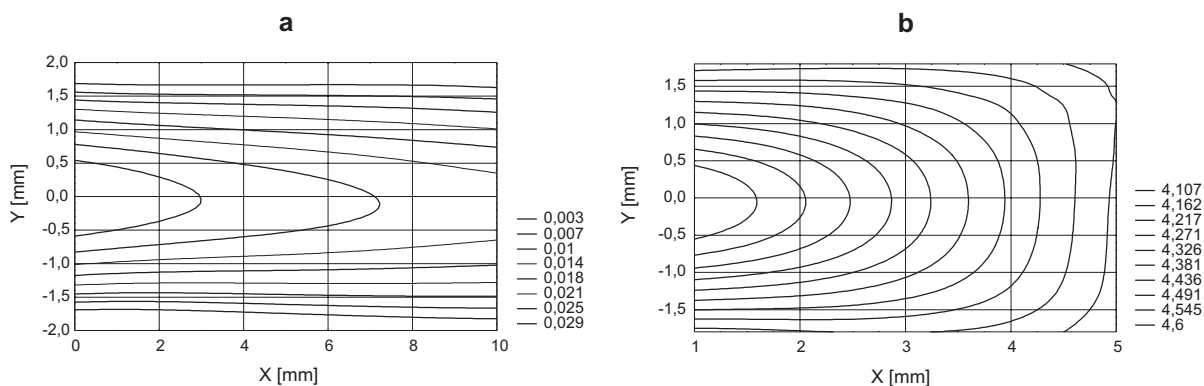
### 3. Badania pól amplitudy i przesunięcia fazowego fali cieplnej

Badania przeprowadzono w powietrzu w temperaturze pokojowej. Zastosowano układ termoanemometru z falą cieplną o wymuszeniu sinusoidalnym. Średnia wartość współczynnika nagrzania nadajnika wynosiła 1,5 a amplituda fali 25%. Generowano fale w zakresie częstotliwości od 5 do 90 Hz. Badania

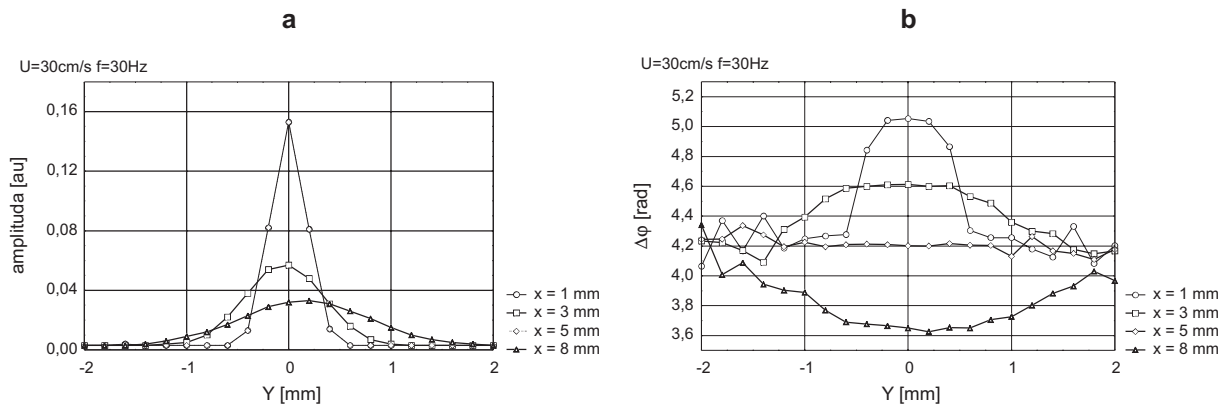
przeprowadzono dla prędkości od 0,10 do 4 m/s. Jako nadajnika użyto włókna z wolframu o średnicy 8 μm i długości 7 mm. Włókno detektora wykonane z wolframu miało długość 1,5 mm i średnicę 5 μm. Wzajemne położenie detektora i nadajnika przedstawiono na rys. 1. Nadajnik fali był umieszczony pionowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi tunelu, a tym samym do wektora prędkości. Detektor umieszczano tak, że jego włókno było również położone prostopadle do wektora prędkości, lecz zastosowano trzy warianty położenia: pionowe, czyli równoległe do włókna nadajnika, poziome, oraz skośne pod kątem 45° do osi pionowej. W położeniu pionowym detektor mierzy rzeczywistą wartość amplitudy i fazy fali w punkcie przecięcia włókna detektora z płaszczyzną poziomą. Dzieje się tak, dlatego, że w tym położeniu każdy punkt włókna detektora leży na tej samej izolinii amplitudy i temperatury. Tylko w tym układzie możemy wyznaczyć pola amplitudy i fazy fali cieplnej w płaszczyźnie poziomej. W położeniach poziomym i skośnym z uwagi na to, że amplituda i faza sygnału docierającego do detektora jest różna dla różnych punktów detektora, sygnał rejestrowany przez detektor jest uśredniany wzdłuż długości włókna. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe pole izolinii amplitudy i fazy fali cieplnej za nadajnikiem. Jak widać poziome położenie detektora zmniejsza amplitudę rejestrowanego sygnału, natomiast w przypadku fazy, w miarę oddalania się od nadajnika niedokładność detekcji fazy jest coraz mniejsza. Rys. 3 przedstawia poprzeczne rozkłady amplitudy fali oraz przesunięcia fazowego w różnych odległościach od nadajnika. Widać „rozmywanie” się sygnału amplitudy spowodowane dyfuzją cieplną. W przypadku fazy spłaszczenie sygnału w miarę zwiększania się odległości od nadajnika wywołane jest efektem geometrycznym. Ponieważ faza zależy od odległości od nadajnika  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  to, gdy współrzędna  $x$  rośnie zmiana współrzędnej  $y$  mniej wpływa na zmianę odległości  $r$ .



Rys. 1. Usytuowanie nadajnika i detektora fali cieplnej w badanym przepływie:  
 a – położenie pionowe, b – położenie poziome, c – położenie skośne



Rys. 2. Pole izolinii: a – amplitudy b – fazy fali cieplnej w płaszczyźnie poziomej dla prędkości przepływu 73 cm/s i częstotliwości fali 30 Hz. Nadajnik fali znajduje się w punkcie (0,0), prędkość skierowana wzdłuż osi x



Rys. 3. Poprzeczny rozkład: a – amplitudy, b – fazy fali temperaturowej w zależności od odległości od nadajnika dla prędkości przepływu 73c m/s i częstotliwości fali 30 Hz

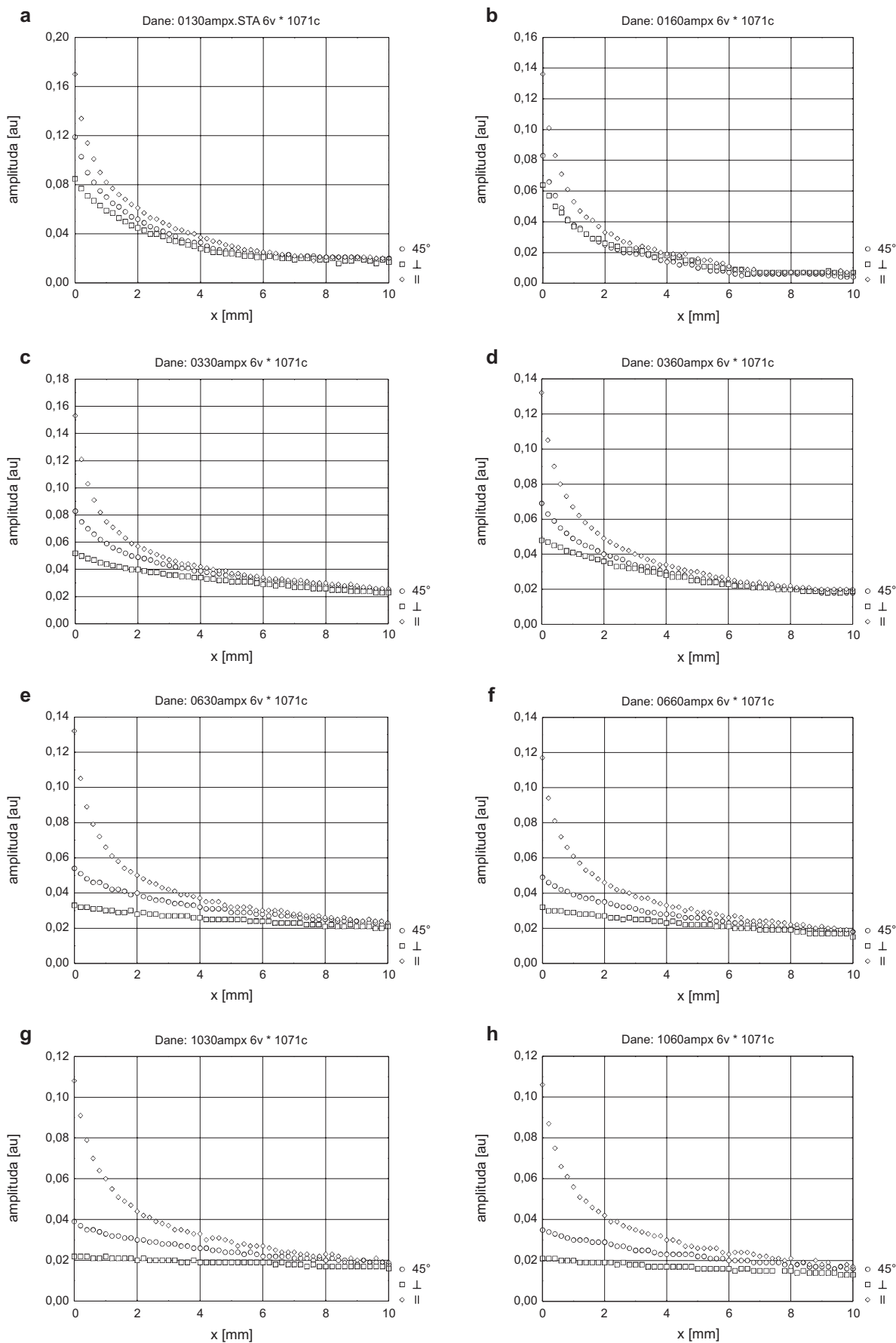
Na rys. 4 przedstawiono zmianę amplitudy fali cieplnej wzdłuż osi  $x$  w trzech położeniach detektora fali dla wybranych prędkości i częstotliwości. Jak widać największy sygnał jest w położeniu pionowym detektora, najmniejszy w poziomym. We wszystkich przypadkach amplituda maleje wykładniczo ze wzrostem odległości od nadajnika. Im dalej od nadajnika tym różnice między sygnałami są coraz mniejsze. Przyczyną tego jest coraz większe poprzeczne rozmycie sygnału (jak to widać na rys.3a), które sprawia, że coraz większa część detektora ułożonego poziomo bądź ukośnie jest w obszarze tej samej amplitudy. Im większa prędkość przepływu tym większe różnice sygnału, unoszony sygnał dociera do detektora w krótszym czasie, a dyfuzja cieplna uwidacznia się w mniejszym stopniu.

Z przedstawionych na rys. 5 zarejestrowanych zmian przesunięcia fazy fali widać, że przebiegają one podobnie. Zależność jest liniowa, niezależnie od ułożenia detektora. Stałe różnice wartości przesunięcia fazy wywołane są niewielką zmianą położenia detektora względem nadajnika w trakcie jego obracania.

#### 4. Weryfikacja nierównoległego układu nadajnik-detektor w pomiarze prędkości metodą różnicową

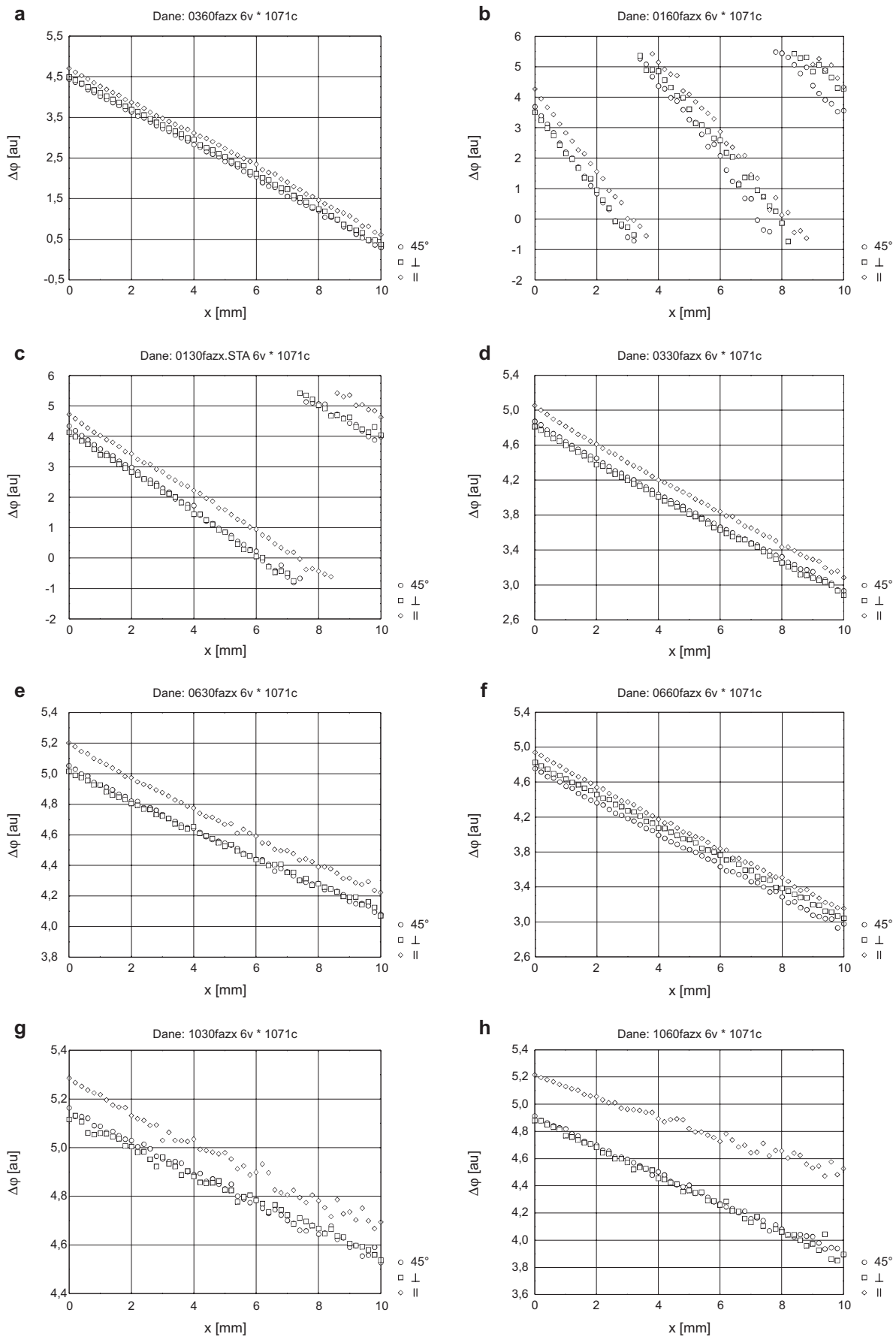
Na rys. 6-9 przedstawiono zależność przesunięcia fazy fali cieplnej od jej częstotliwości w trzech różnych położeniach detektora względem nadajnika. Ponieważ dokładność pomiaru częstotliwości jest większa niż dokładność pomiaru przesunięcia fazowego, to do wyliczenia zgodnie ze wzorem (5) prędkości przepływu posługujemy się pochodną przesunięcia fazowego po częstotliwości. Wyznacza się ją dopasowując linię prostą do zmierzonych punktów charakterystyki przesunięcia fazowego od częstotliwości. Dla  $i$ -tego pomiaru przesunięcia fazowego zachodzi  $\Delta\phi_i = a\omega_i + b$ , więc pochodna przesunięcia fazowego po częstotliwości będzie równa  $\frac{d(\Delta\phi)}{d\omega} = a$ , stąd prędkość  $U_C = ra^{-1}$ . Obliczone wartości prędkości różnią się niewiele w poszczególnych położeniach detektora. Dokładne porównanie nie jest możliwe z powodu niedokładności w ustawieniu odległości od nadajnika. Dla orientacji, co do dokładności pomiaru obliczono niepewność bezwzględną wyznaczenia prędkości  $\delta U_C$  związaną z wyznaczeniem pochodnej. Z metody różniczki zupełnej otrzymujemy  $\delta U_C = \left| \frac{\partial U}{\partial a} \right| \delta a$ , gdzie  $\delta a$  jest standardową niepewnością wyznaczenia pochodnej. Jak widać

w tab. 2 dla poszczególnych prędkości wartości niepewności nie zależą od orientacji detektora. Ponieważ wielkość  $\delta a$  została obliczona metodą statystyczną, to byłaby mniejsza gdyby do pomiaru użyto większej ilości punktów na skali częstotliwości.



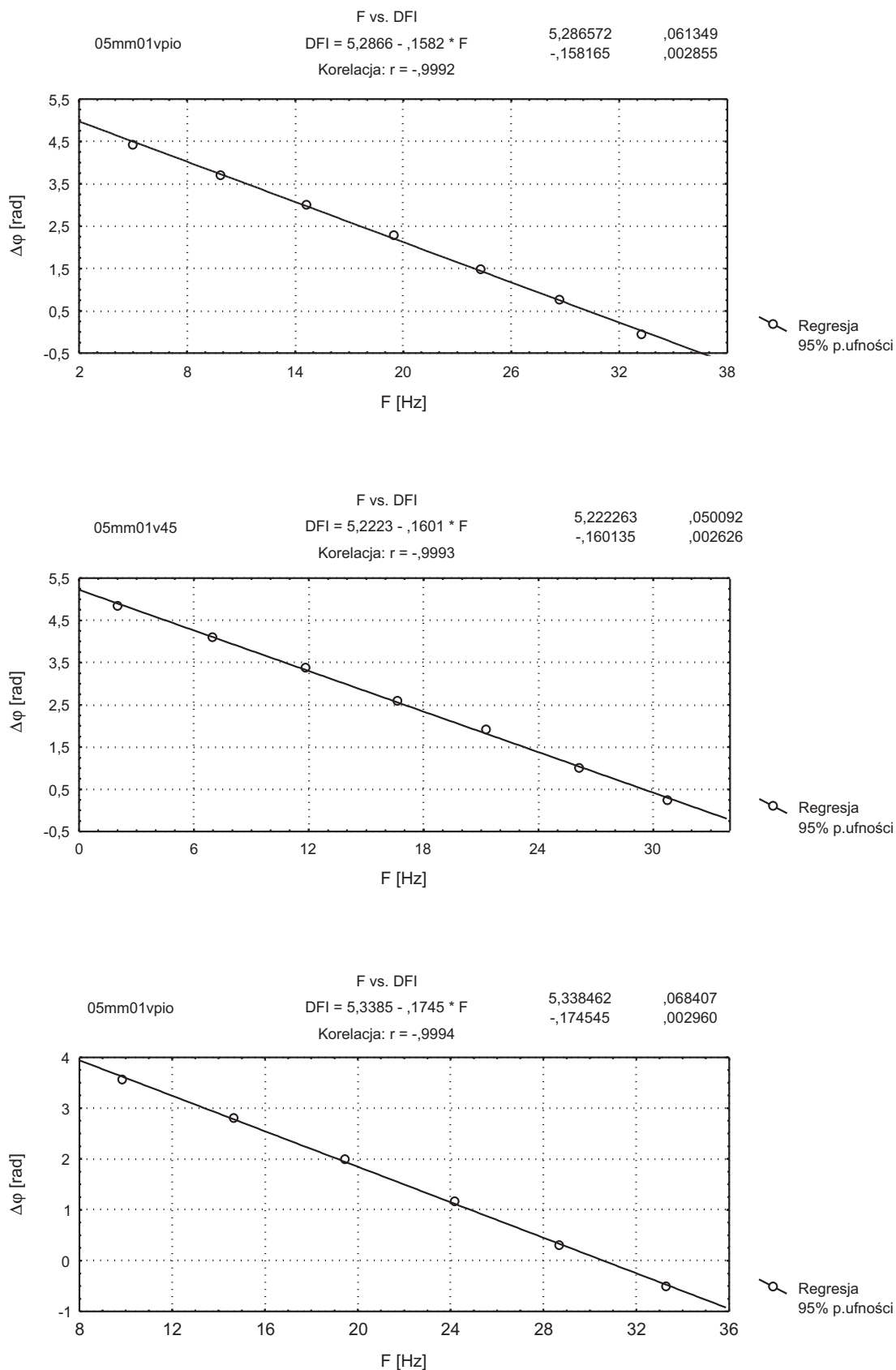
Rys. 4. Zmiana amplitudy fali cieplnej wzdłuż osi x.

a, c, e, g – częstotliwość fali 30 Hz; b, d, f, g – częstotliwość fali 60 Hz; a, b – 23 cm/s; c, d – 73 cm/s, e, f – 130 cm/s; g, h – 220 cm/s.

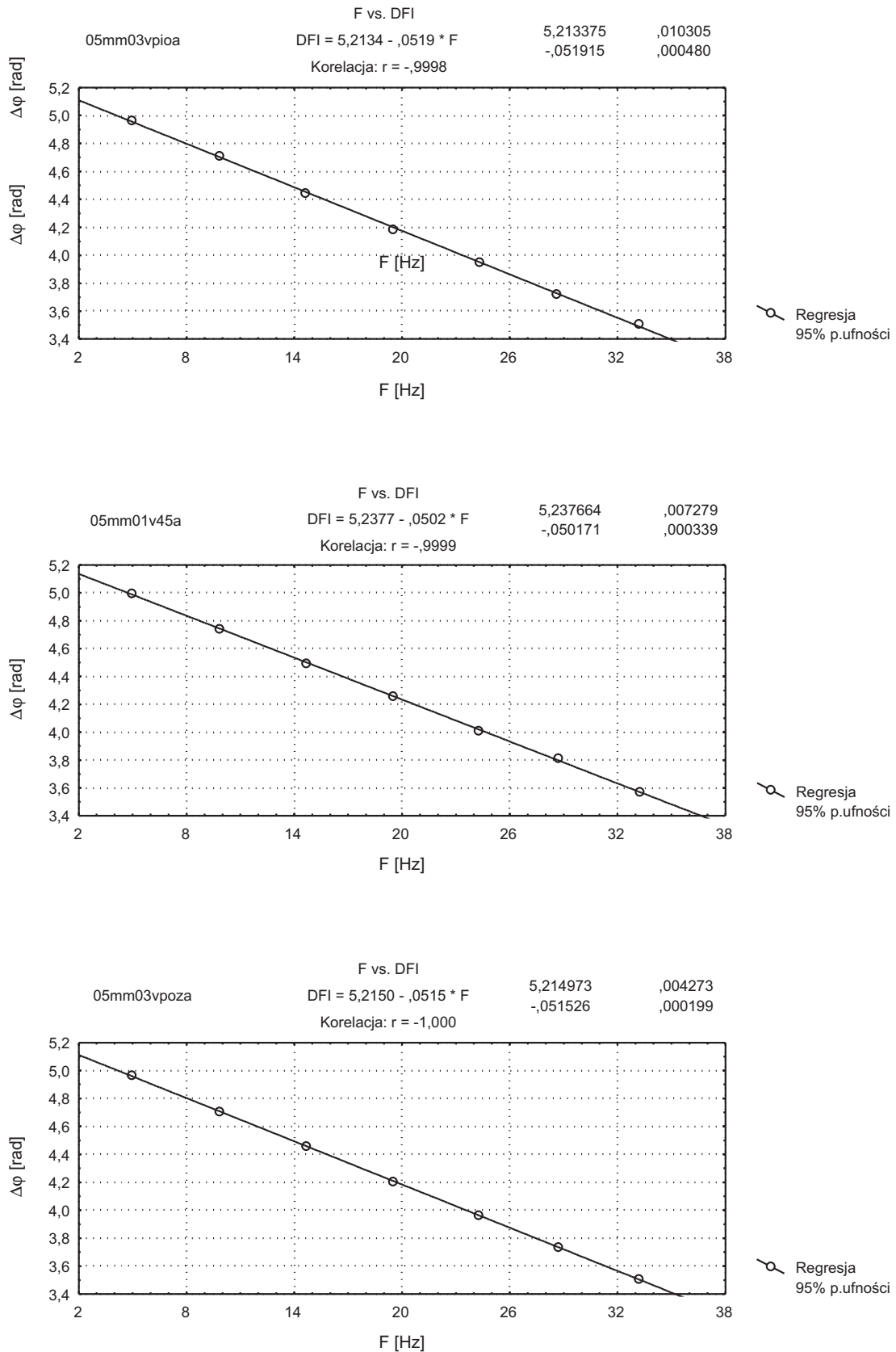


Rys. 5. Zmiana fazy amplitudy fali cieplnej wzdłuż osi  $x$ .  
 a, c, e, g – częstotliwość fali 30 Hz; b, d, f, h – częstotliwość fali 60 Hz; a, b – 23 cm/s;  
 c, d – 73 cm/s; e, f – 130 cm/s; g, h – 220 cm/s.

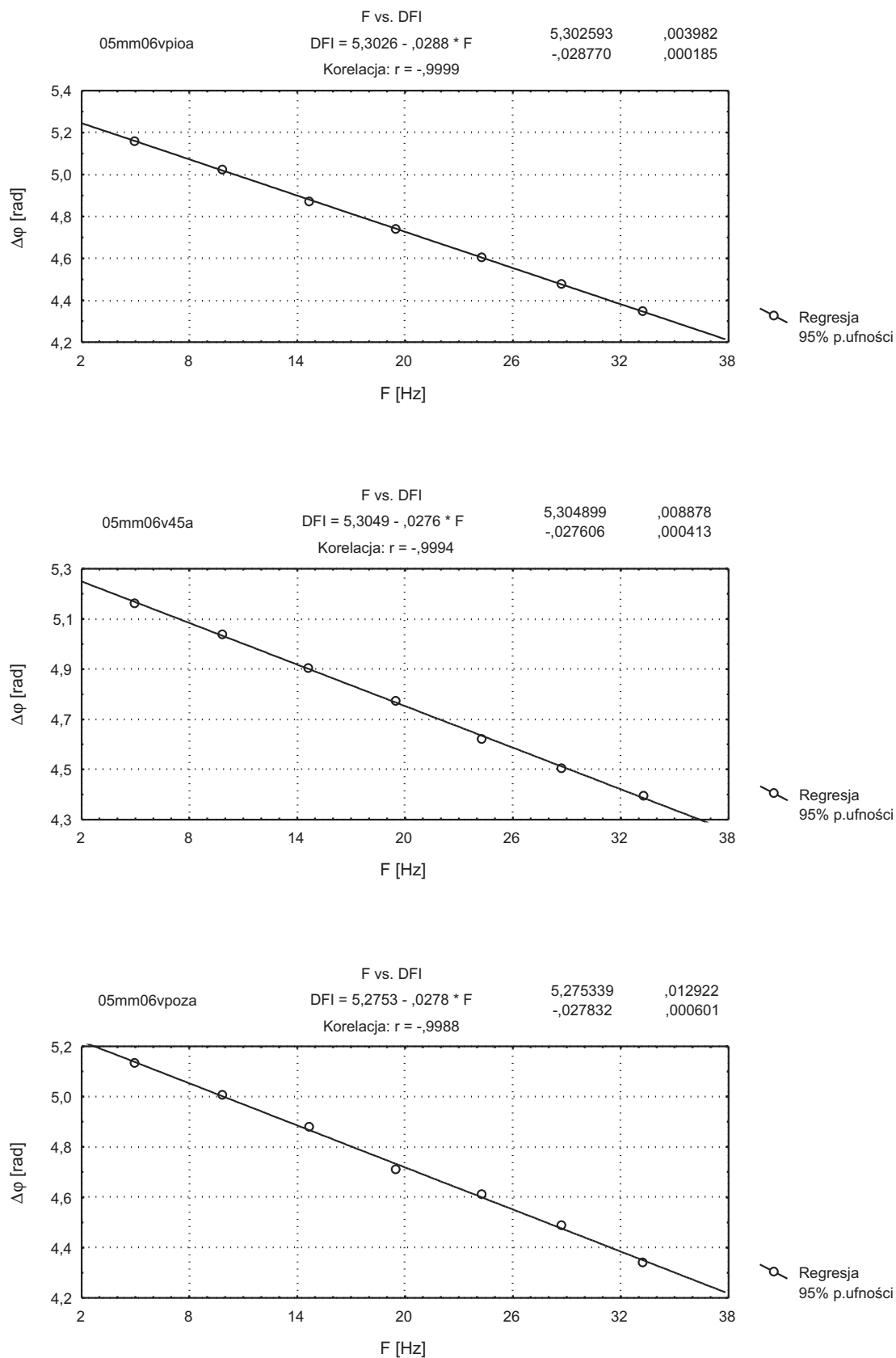




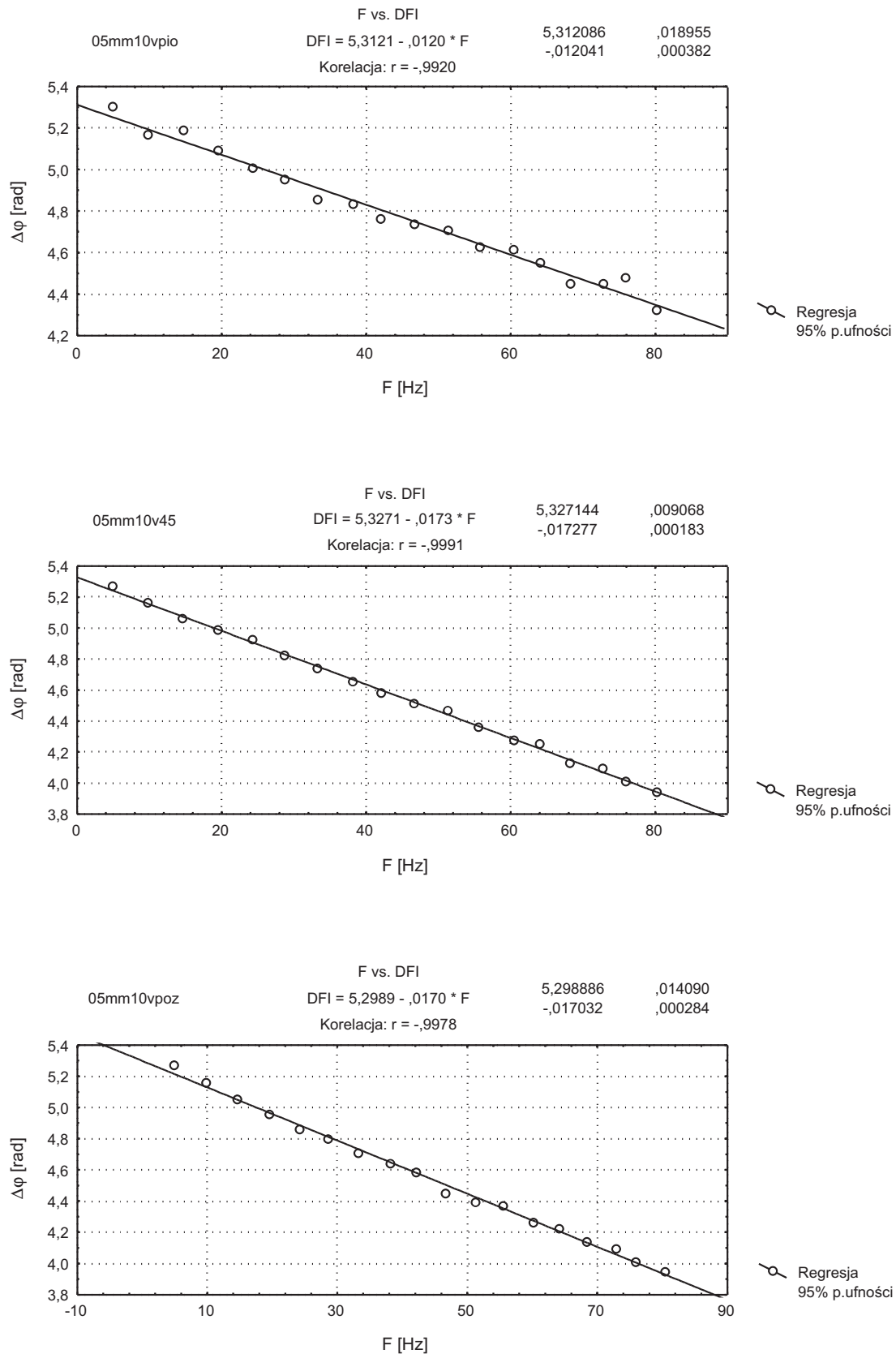
Rys. 6. Zależność przesunięcia fazy fali cieplnej pomiędzy nadajnikiem a detektorem od częstotliwości fali. Odległość detektora od nadajnika 5 mm, prędkość powietrza 0,23 cm/s



Rys. 7. Zależność przesunięcia fazy fali cieplnej pomiędzy nadajnikiem a detektorem od częstotliwości fali. Odległość detektora od nadajnika 5 mm, prędkość powietrza 73 cm/s.



Rys. 8. Zależność przesunięcia fazy fali cieplnej pomiędzy nadajnikiem a detektorem od częstotliwości fali. Odległość detektora od nadajnika 5 mm, prędkość powietrza 130 cm/s.



Rys. 9. Zależność przesunięcia fazy fali cieplnej pomiędzy nadajnikiem a detektorem od częstotliwości fali. Odległość detektora od nadajnika 5 mm, prędkość powietrza 220 cm/s.

Tab. 2 Wartości prędkości  $U_C$  obliczonej metodą różnicową oraz jej niepewność  $\delta U_C$  w różnych położeniach detektora. Odległość detektora nadajnika 6 mm

położenie detektora	$\frac{d(\Delta\varphi)}{d\omega}$	$\delta \frac{d(\Delta\varphi)}{d\omega}$	$U_C$ [cm/s]	$\delta U_C$ [cm/s]
pionowo	0,1580	3,0	23,8	0,5
45°	0,1600	3,0	23,5	0,4
poziomo	0,1750	3,0	21,5	0,4
pionowo	0,0519	0,4	72,6	0,6
45°	0,0502	0,3	75,0	0,5
poziomo	0,0515	0,2	73,2	0,3
pionowo	0,0288	0,2	130	1,0
45°	0,0276	0,4	136	2,0
poziomo	0,0278	0,6	135	3,0
pionowo	0,0174	0,3	216	4,0
45°	0,0173	0,2	217	3,0
poziomo	0,0170	0,3	221	4,0

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują, że zmiana orientacji detektora fali względem nadajnika z równoległej na ukośną nie wpływa na wartości prędkości obliczonej metodą różnicową. Liniowość charakterystyki pozostaje w tym samym zakresie prędkości przepływu i częstotliwości fali zadowalająca. Wynika stąd, że możliwe jest zastosowanie nierównoległego układu nadajnik-detektor w różnicowej metodzie pomiaru prędkości przepływu gazu. W następnych pracach należałoby zbadać dokładność metody z jednym detektorem, uwzględniając również zastosowanie detektora o większej długości włókna. W dalszej perspektywie w badaniach będzie można posłużyć się czujnikiem o skośnej konfiguracji wyposażonym w jeden i dwa detektory.

## Literatura

- [1] Kielbasa J. i in.: *Eksperymentalna weryfikacja wielokanałowego termoanemometrycznego systemu pomiarowego jako anemometru z falą cieplną*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 2004.
- [2] Kielbasa J.: *Fale cieplne w przepływie ustalonym. Warunki ich wykorzystania do pomiaru prędkości przepływu ustalonego*, Archiwum Górnictwa, 2005.

## The Implementation and Testing of Difference Type Anemometer with Thermal Wave Embedded in the Computer Thermoanemometric System

### Abstract

The paper presents the results of investigations of the difference anemometer with thermal wave performed by means of the computer thermoanemometric system. The research were realised applying the system containing a single wave detector. Three different orientations of the detector with respect to transmitter have been applied: parallel orientation, perpendicular orientation, and sloping orientation. For the transmitter-detector systems mentioned above the field of amplitude and of phase shift of temperature waves were detected for the air velocity range from 0.2 to 3.0 m/s and frequency range from 5 to 90 Hz. The analysis of the accuracy for the constant distance and constant frequency techniques have been performed. For the difference method the analysis of the accuracy has also been performed. The difference method for various orientations of one detector with respect to the wave transmitter has been applied for recording of the gas flow velocity. The results presented in the paper suggest the difference method based on a non-parallel transmitter-detector system may be applied to record the gas flow velocity.

**Keywords:** metrology, hot-wire anemometry, measuring system, anemometer with thermal wave

Recenzował: prof. dr hab. *Stanisław Gumuła*, Akademia Górniczo-Hutnicza