

*Henryk Passia\**

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI POMIARU KONCENTRACJI CZĄSTEK NIESFERYCZNYCH W POWIETRZU Z ZASTOSOWANIEM UKŁADU DOPPLEROWSKIEGO ANEMOMETRU LASEROWEGO**

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania charakterystyk sygnału zmiennego (dokładnie: stosunku sygnału do szumu), generowanego w układzie dopplerowskiego anemometru laserowego, do selektywnego pomiaru koncentracji stałych cząstek niesferycznych unoszonych w powietrzu lub innym medium. Własności sygnału dopplerowskiego generowanego w przypadku cząstek sferycznych lub quasi-sferycznych zostały dokładnie omówione we wcześniejszych pracach autora (Passia i in. 1978; Passia 2003) zarówno pod względem eksperymentalnym, jak i uzasadnienia teoretycznego. Przedstawiona w artykule analiza sposobu wykonywania pomiarów koncentracji cząstek niesferycznych dotyczy cząstek azbestu zawieszonych w powietrzu. Wykorzystanie charakterystyk sygnału zmiennego, takiego jaki jest generowany w dopplerowskim anemometrze laserowym, umożliwia eliminację niekorzystnych efektów pochodzących od przypadkowo rozproszonego światła i związanego z tym wysokiego poziomu tła w detekcji z sygnałem stałym (przykład takiego rozwiązania z wykorzystaniem światłowodów przedstawiono w publikacji: Passia, Rożkowicz 2007). W cytowanej publikacji omówiono przede wszystkim szczegółowo charakterystyki wymiarowe i materiałowe włókien azbestu.

### **An analysis of possibilities for measuring concentration of non-spherical particles in air using the structure of laser Doppler anemometer**

#### **Abstract**

The paper presents an analysis of possibilities of using the characteristics of the AC signal (precisely: signal-to-noise ratio) generated in the structure of the laser Doppler anemometer to make selective measurement of non-spherical solid particles suspended in the air or other medium. The properties of the Doppler signal being generated in the case of spherical or quasi-spherical particles have been presented in detail in the previous author's publications (Passia et al. 1978; Passia 2003), both from the experimental side, and its theoretical justification. The analysis presented in the paper relative to realisation of concentration measurements of non-spherical particles is oriented towards the problem of optical measurement of airborne asbestos particles. The use of the AC signal characteristics, such as generated in the laser Doppler anemometer enables to eliminate adverse effects coming from stray light, and related to this high background level in the DC detection process (an example of such a solution, using optical fibres have been given in the publication: Passia, Rożkowicz 2007). In the work mentioned, first of all a detailed discussion of dimensional and material characteristics of asbestos fibres has been presented.

## **WPROWADZENIE**

Wielkość i kształt cząstek rozpraszających unoszonych przez medium (gaz lub ciecz), przepływających przez obszar pomiarowy (tj. wspólne ognisko dwóch wiązek laserowych: oświetlającej i referencyjnej) w dopplerowskim anemometrze laserowym, oddziałują na charakter sygnału uzyskiwanego w procesie optycznego mieszania tych

---

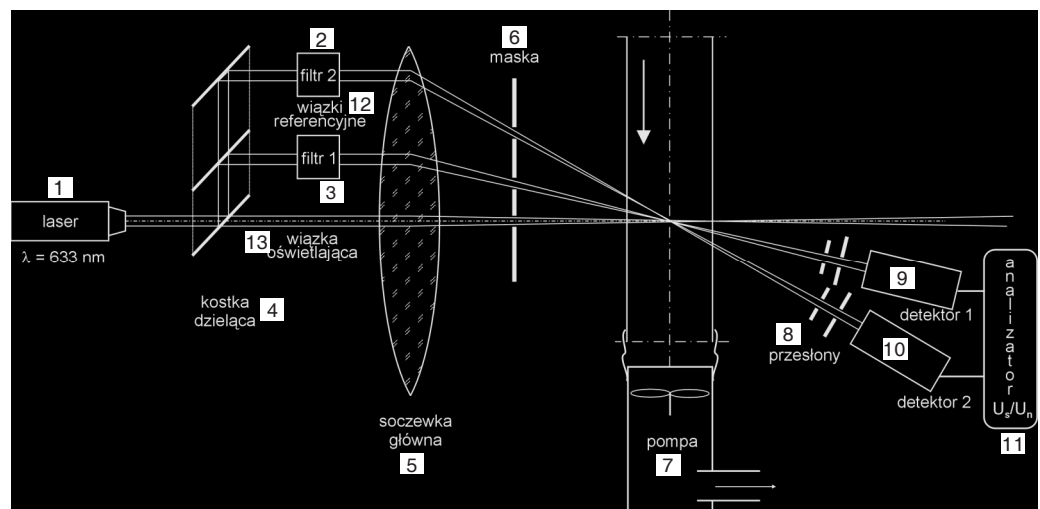
\* Główny Instytut Górnictwa.

dwóch wiązek. W przypadku przepływu laminarnego badanego medium sygnał uzyskiwany na wyjściu z detektora jest w bardzo dużym przybliżeniu sinusoidalny i jest nałożony na tło szerokopasmowego szumu (białego). W takim przypadku stosunek sygnału do szumu, gdy cząstki rozpraszające mają kształt sferyczny lub zbliżony do sferycznego, jest wyraźnie związany ze średnim ich wymiarem (Passia i in. 1978; Passia 2002).

Wiadomo także, że charakterystyki kątowe rozpraszania światła, bazujące na ściślejszych zależnościach wynikających z teorii Mie (van de Hulst 1957; Born, Wolf 1964), stwarzają podstawę do wnioskowania o możliwości uzyskania informacji o kształcie cząstek, na podstawie określenia własności sygnału dopplerowskiego, przy czym układ anemometru dopplerowskiego musi być wtedy rozbudowany o dodatkowe kanały pomiarowe, natomiast sam sygnał może mieć w każdym z kanałów określoną częstotliwość, co stworzyłoby łatwiejsze warunki do rejestracji samego stosunku sygnału do szumu, parametru związanego z własnościami wymiarowymi cząstek rozpraszających.

## 1. ROZBUDOWANY UKŁAD ANEMOMETRU DOPPLEROWSKIEGO

Wykorzystanie różnic w rozkładach kątowych natężenia światła rozproszonego na cząstkach unoszonych w badanym medium będzie wymagało zbudowania układu anemometru o powielonej strukturze, przynajmniej podwojonej. Schemat takiego podwojonego układu przedstawiono na rysunku 1.

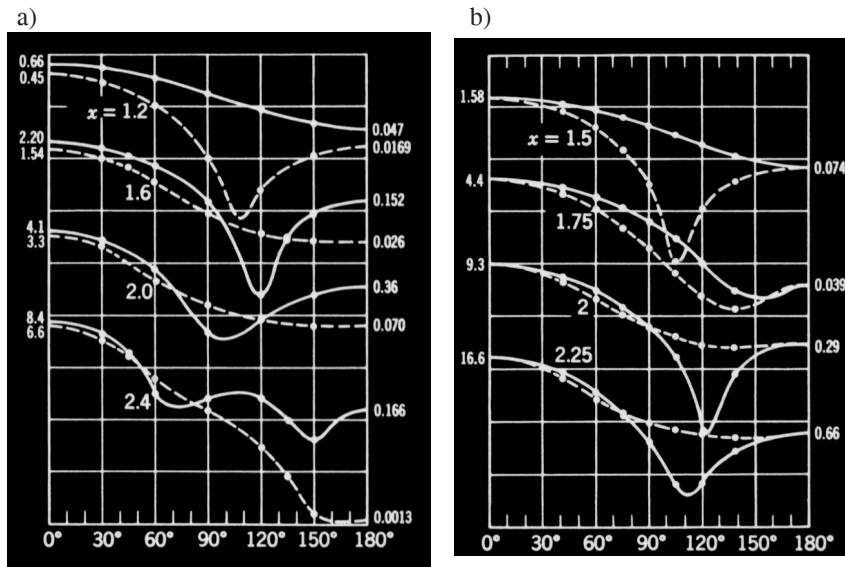


Rys. 1. Podwojona struktura pomiarowa dopplerowskiego anemometru laserowego

Fig. 1. Doubled structure of laser Doppler anemometer: 1 – laser, 2, 3 – filter, 4 – beam splitter, 5 – main lens, 6 – mask, 7 – pump, 8 – diaphragm, 9 – detector 1, 10 – detector 2, 11 – analyser, 12 – reference beams, 13 – illuminating beam

Podwojenie układu anemometru laserowego jest podyktowane, jak już wyżej zaznaczono, potrzebą wykorzystania różnic w charakterystykach kątowych natężenia

światła rozproszonego na cząstkach w zależności od ich kształtu. Rysunek 2 (van de Hulst 1957) stanowi ilustrację takiej różnicy w przebiegu charakterystyk kątowych dla cząstek sferycznych i wydłużonych (cylindrycznych).



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki kątowe w procesie rozpraszania światła na cząstkach sferycznych (a) i wydłużonych (b)

Fig. 2. Theoretical angular characteristics in the process of light scattering on spherical (a) and elongated (b) particles

Sygnal zmienny generowany na wyjściu anemometru laserowego jest produktem mieszania na fotokatodzie detektora, dwóch wiązek laserowych; pomiarowej i referencyjnej. Zawiera on człon interferencyjny mający postać (Siegman 1966):

$$j = \int \eta \vec{E} \vec{E}^* dA \quad (1)$$

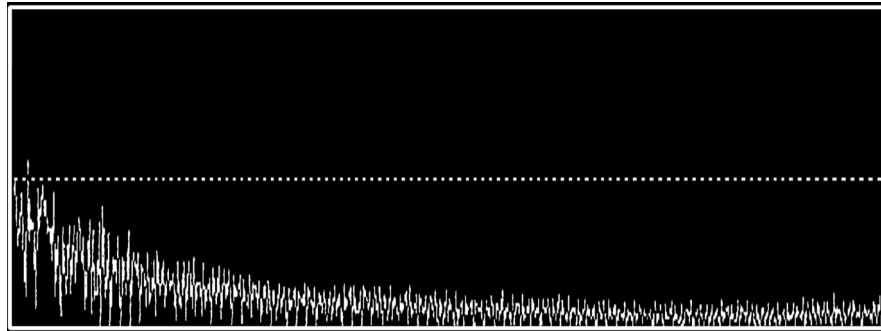
$$\frac{1}{2} j_{SI,LO} = \int \eta \vec{E}_{SI} \vec{E}_{LO} dA \quad (2)$$

gdzie:

- $j$  – prąd na wyjściu fotokatody,
- $E$  – wektor natężenia pola elektrycznego wiązki laserowej, indeksy  $SI$  oraz  $LO$  odnoszą się odpowiednio do wiązki pomiarowej (*signal*) i referencyjnej (*local oscillator*),
- $\eta$  – wydajność kwantowa fotokatody,
- $A$  – powierzchnia fotokatody.

Jak wspomniano, sygnał wychodzący z detektora jest sygnałem w bardzo dużym stopniu zbliżonym do sinusoidalnego w przypadku, gdy przepływ jest laminarny. Cha-

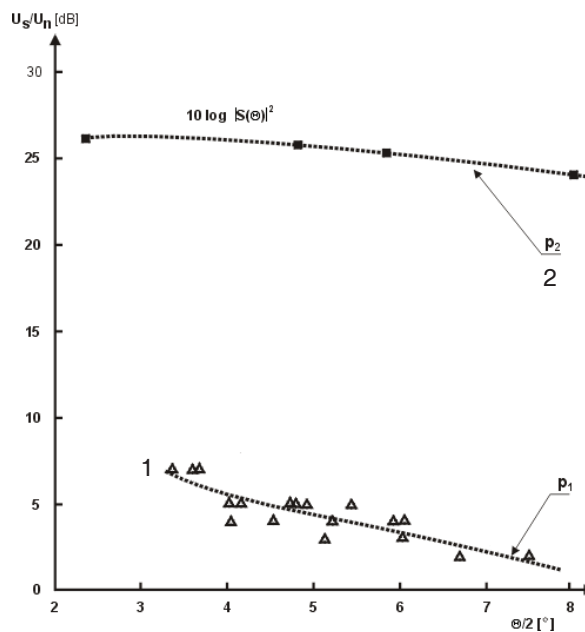
rakter szumu nałożonego na generowany sygnał przedstawiono w postaci transformaty FFT na rysunku 3. Przebieg o większej amplitudzie, widoczny z lewej strony, zawiera fragment sygnału zarejestrowanego przy przepływie turbulentnym.



Rys. 3. Widmo szumu generowanego w anemometrze laserowym

Fig. 3. Spectrum of noise generated in laser Doppler anemometer

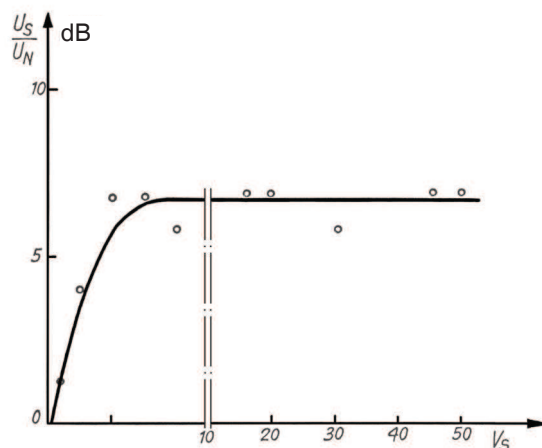
Charakterystykę stosunku sygnału do szumu uzyskiwanego w anemometrze dopplerowskim, w zależności od kąta rozpraszania (kąta między wiązkami ogniskowanymi w punkcie pomiarowym), dla monodispersyjnych cząstek polistyrenu zawieszonych w wodzie, przedstawiono na rysunku 4. Średnica cząstek wynosiła  $0,45 \mu\text{m}$ . Kształt krzywej eksperymentalnej (1) odniesiono do formy krzywej teoretycznej (2) otrzymanej dla tego przypadku ze ścisłych zależności wynikających z teorii Mie (Passia 2002). Dobrą zgodność potwierdzają podobne wykresy dla cząstek (sferycznych i quasi-sferycznych) o innych rozmiarach (Passia 2002).



Rys. 4. Charakterystyki kątowe stosunku sygnału dopplerowskiego do szumu (u góry krzywa obliczona według teorii Mie); cząstki polistyrenu  $0,45 \mu\text{m}$  zamieszczone w wodzie: 1 – krzywa eksperymentalna, 2 – krzywa teoretyczna

Fig. 4. Angular characteristics of Doppler signal-to-noise ratio (top-curve computed from Mie theory); polystyrene  $0,45 \mu\text{m}$  in water: 1 – experimental curve, 2 – theoretical curve

Zmiana koncentracji cząstek w obszarze pomiarowym (w punkcie przecięcia wiązek, faktycznie elipsoidzie) powoduje równoległe przesuwanie się charakterystyki kątowej w górę lub w dół wykresu, zależnie od zmniejszania się lub wzrostu koncentracji. Tendencję tę ilustruje rysunek 5. Obszar liniowej zmiany stosunku sygnału do szumu może być, jak widać, efektywnie wykorzystany do wyznaczenia koncentracji cząstek rozpraszających na podstawie analizy stosunku sygnału do szumu w anemometrze. Zakrzywienie się tej charakterystyki wynika z ekstynkcji dającej w efekcie zmniejszenie mocy wiązek docierających do detektora, w kierunku wiązki referencyjnej.



**Rys. 5.** Zależność stosunku sygnału do szumu  $U_s/U_n$  w laserowym anemometrze dopplerowskim od koncentracji cząstek (polistyren  $0,45 \mu\text{m}$  w wodzie);  $V_s$  – objętość standardowa odpowiadająca koncentracji  $6 \cdot 10^6$  cząstek w  $1 \text{ cm}^3$

**Fig. 5.** Signal-to-noise ratio vs. concentration of particles (polystyrene  $0.45 \mu\text{m}$  in water);  $V_s$  standard volume corresponding to concentration of  $6 \cdot 10^6$  particles  $1 \text{ cm}^3$

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiona w artykule analiza charakterystyk stosunku sygnału do szumu dla cząstek sferycznych unoszonych przez medium (gaz lub ciecz) odnośnie do możliwości ich wykorzystania do pomiaru koncentracji cząstek w tym medium, pozwala pozytywnie wnioskować co do pomiarów cząstek w kształcie wydłużonym, docelowo cząstek azbestu. W przypadku pozytywnej weryfikacji eksperymentalnej takiego wniosku, technika pomiarowa z wykorzystaniem własności sygnału zmiennego miałaby istotne zalety w odniesieniu do detekcji stałoprądowej, ze względu na możliwość eliminacji niechcianych efektów generowanych przez światło rozproszone w układzie pomiarowym, wpływające negatywnie na analizę amplitudową światła rozproszonego.

Układ pomiarowy, którego podstawę stanowiłaby analiza własności sygnału dopplerowskiego pracowałaby na dwóch częstotliwościach (w zakresie kiloherców) nieco różniących się od siebie w kanałach pomiarowych, utworzonych przez wiązki laserowe, ze względu na różnice w kątach rozpraszania, wpływających na wartość częstotliwości sygnału dopplerowskiego.

**Literatura**

1. Born M., Wolf E. (1964): Principles of Optics. Pergamon Press.
2. Passia H. (2002): Metrologia emisji metanu z rozciągniętych obiektów środowiskowych z wykorzystaniem selektywnej absorpcji promieniowania laserowego w średniej podczerwieni. Prace Naukowe GIG nr 851.
3. Passia H., Pawlak J., Piaseczki S. (1978): Lasery w górnictwie. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
4. Passia H., Rożkowicz M. (2007): Laserowa detekcja i pomiar koncentracji cząstek azbestu w powietrzu. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
5. Siegman A.E. (1966): Proc. IEEE, 54.
6. van de Hulst H.C. (1957): Light Scattering by Small Particles. Wiley and Sons.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan