

ZESZYTY NAUKOWE NR 9(81)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

INLAND SHIPPING 2005

Józef Kirkiewicz, Bohdan Bieg, Janusz Chrzanowski

**Badanie zależności kąta rozpraszania światła na cząsteczkach
pyłów jako miary wielkości ziaren**

Słowa kluczowe: indykatory rozpraszania, zapylenie powietrza, pyłomierz optyczny,
ziarnistość pyłów

Dokonano analizy rozkładu energetycznego światła monochromatycznego przechodzącego przez obszar zapyłony. Opierając się na modelach stanowisk pomiarowych z kuwetą oraz komorą przepływową badano możliwość pomiaru rozpraszania pod określonymi kątami i na tej bazie zbudowano model pyłomierza. W pyłomierzu tym detektory pomiarowe rozmieszczono wzdłuż krawędzi elementu optycznego tak, aby można było mierzyć natężenie światła rozproszonego na cząsteczkach pyłowych o określonych ziarnistościach.

**Investigation on the Dependence of Light Scattering Angle on
Dust Particles as Measure of Granularity**

Key words: scattering indicatrix, pollution, optical dustmeter, dusts granularity

Analyses of energy distribution of monochromatic light crossing through polluted area were executed. On the basis of models of measure positions with cuvette as well as flow chamber the possibility of scattering measurement under definite angles was studied and on this basis a dustmeter model was built. In the dustmeter the measure detectors were disposed along the edge of optical element so that it was possible to measure the intensity of scattered light on dust particles of definite granulosis.

Wprowadzenie

Strumień świetlny, przenikając przez niejednorodny ośrodek materialny, doznaje selektywnego oddziaływania zależnego od rodzaju niejednorodności, wielkości cząsteczek, jak również od długości fali świetlnej. Z praktycznego punktu widzenia interesującym przykładem niejednorodnego ośrodka, przez który przechodzi światło może być zapyłone powietrze lub gazy przemysłowe. Zastosowanie laserów jako źródła światła monochromatycznego umożliwia zawężenie badania procesu oddziaływania do rodzaju materiału oraz wielkości cząsteczek. Z energetycznego punktu widzenia wiązka światła monochromatycznego, przechodząc przez obszar zapyłony, doznaje strat energii, co można przedstawić równaniem bilansu:

$$E_o = E_u + E_i + E_R + E$$

gdzie:

E_o – energia światła padającego,

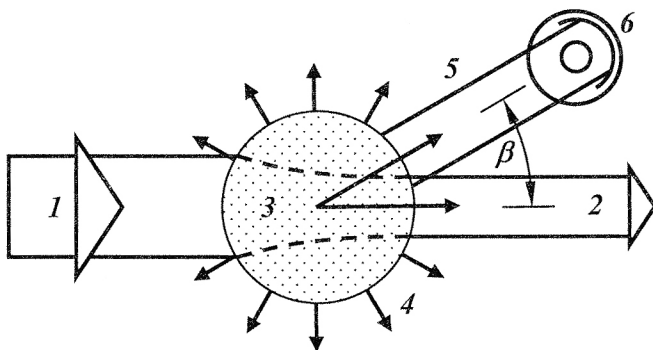
E_u – energia zaabsorbowana na przyrost energii wewnętrznej pyłu,

E_i – energia emisji wymuszonej,

E_R – energia światła rozproszonego,

E – energia światła po przejściu przez ośrodek zapyłony.

Graficznie proces ten można pokazać na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład energetyczny światła przechodzącego przez obszar zapyłony [1]:
 1 – energia światła padającego (E_o), 2 – energia światła po przejściu przez ośrodek zapyłony (E),
 3 – obszar zapyłony, w którym występuje E_u oraz E_i , 4 – światło rozproszone w pełnym kącie
 brylowym (E_R), 5 – światło rozproszone pod kątem β , 6 – fotodetektor
 Fig. 1. Energetic distribution of light scattered on dust particles

W procesach pomiarowych istotne jest określenie wartości energii ulegającej rozproszeniu E_R oraz jej zależność od ziarnistości pyłów, jak również rodzaju materiału, z jakiego są zbudowane cząsteczki rozpraszające. Ze względu na złożoną naturę procesu rozpraszania zakłada się, że cząsteczki ośrodka są dipolami elektrycznymi. Przy niezbyt dużych energiach strumień świetlny jako fala elektromagnetyczna padająca na ośrodek zapyłony wzbudza drgania wymuszone, w wyniku czego dipole elektryczne stają się źródłem własnego promieniowania, którego częstość kołowa ω jest zgodna z częstością fali elektromagnetycznej padającego promieniowania. Opierając się na klasycznej teorii drgań wymuszonych na wartość energii światła rozproszonego w ośrodku zapyłonym można otrzymać równanie [2]:

$$E_R = \left(\frac{8\pi}{3}\right) |a|^2 \left(\frac{\omega}{c}\right)^4$$

przy czym dla elektronów związanych sprężystością z atomem polaryzowalność opisuje wzór:

$$a = \frac{e^2}{m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 + 2\gamma\omega)}$$

gdzie:

- ω_0 – częstość drgań własnych elektronu,
- γ – dekrement tłumienia.

Widać, że wartość energii światła rozproszonego E_R zależy bardzo od częstości kołowej dipola ω . Przy ω znacznie różnej od ω_0 zależność polaryzowalności a od ω można zaniedbać i wtedy:

$$E_R \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

gdzie:

- λ – długość fali świetlnej.

Z czego wynika, że energia światła rozproszonego jest proporcjonalna do λ^{-4} . Wskazuje to, że energia światła rozproszonego na drobnych cząsteczkach (dipolach) jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi długości fali świetlnej. Zależność ta nosi nazwę prawa Rayleigha.

Parametry kątowe rozpraszania światła wynikają z unormowanej macierzy energetycznej:

$$f(\varphi) = \frac{3}{4} \begin{vmatrix} 1 + \cos^2 \varphi & -\sin^2 \varphi & 0 & 0 \\ -\sin^2 \varphi & 1 + \cos^2 \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \varphi \end{vmatrix}$$

Jeśli dipol jest oświetlony światłem niespolaryzowanym, to na natężenie światła rozproszonego I otrzymamy [2]:

$$I(\varphi) = I_o \Omega_o \left(\frac{E_R}{4\pi} \right) \left(\frac{3}{4} \right) (1 + \cos^2 \varphi)$$

gdzie:

I_o – natężenie wiązki oświetlającej badany ośrodek,
 Ω_o – kąt rozbieżności wiązki.

Światło rozproszone rozchodzi się zarówno w kierunku zgodnym z kierunkiem strumienia padającego, jak i przeciwnym do niego. Jeżeli wprowadzimy parametr optyczny wiążący długość fali λ z wielkością cząsteczki rozpraszającej d [3]:

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda}$$

to jakościową zmianę rozkładu natężenia światła rozproszonego na cząsteczkach pyłów można rozważać dla:

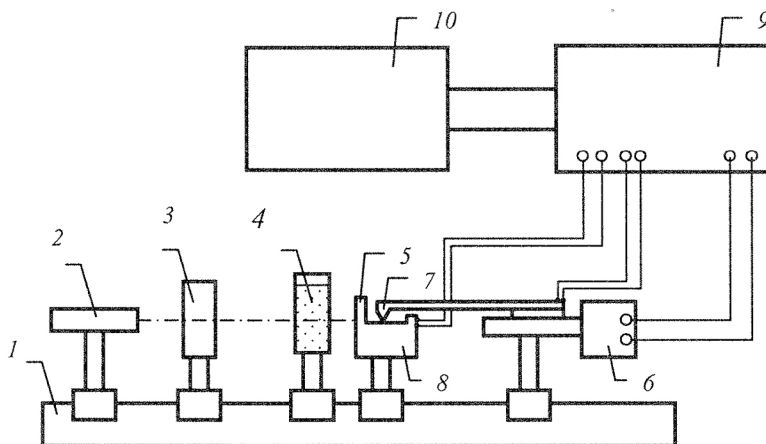
$$\begin{aligned} \alpha \ll 1 & \quad \text{– cząsteczki małe} \quad (d < \lambda) \\ \alpha \approx 1 & \quad \text{– cząsteczki średnie} \quad (d \sim \lambda) \\ \alpha \gg 1 & \quad \text{– cząsteczki duże} \quad (d > \lambda) \end{aligned}$$

Diagram wektorowy przedstawiający zależność natężenia promieniowania od kąta rozpraszania nazywamy indyktrywą rozproszenia. Jeśli cząsteczki rozpraszające są mniejsze od długości fali światła padającego λ , to indyktrywa rozpraszania ma kształt symetryczny w kierunku zgodnym, jak i przeciwnym do kierunku biegu strumienia świetlnego. Przy wzroście wielkości cząsteczek indyktrywa wydłuża się ku przodowi, a przy cząsteczkach dużych

na indykatrixie pojawia się szereg osobliwości o kształtach charakterystycznych dla wielkości cząsteczek i rodzaju materiału. Przy stałej długości fali światła padającego kąt rozpraszania jest miarą wielkości ziaren, natomiast wartość natężenia światła rozproszonego w danym kącie bryłowym jest proporcjonalna do ilości substancji w danej klasie ziarnowej.

Laboratoryjne stanowisko do pomiaru kąta rozpraszania

Na ławie optycznej (rys.2) ustawiono elementy stanowiska pomiarowego zawierającego: laser półprzewodnikowy jako źródło światła oraz polaryzator, za pomocą którego zapewniono możliwość regulacji natężenia promieniowania wiązki światła. Kolejnym elementem układu jest kuweta cienkowarstwowa, którą zależnie od etapu badań można zastosować pustą, napęlnić wodą destylowaną lub też wprowadzić medium rozpraszające, na przykład, stosując zawiesinę drobno utartego pyłu kredowego w wodzie.

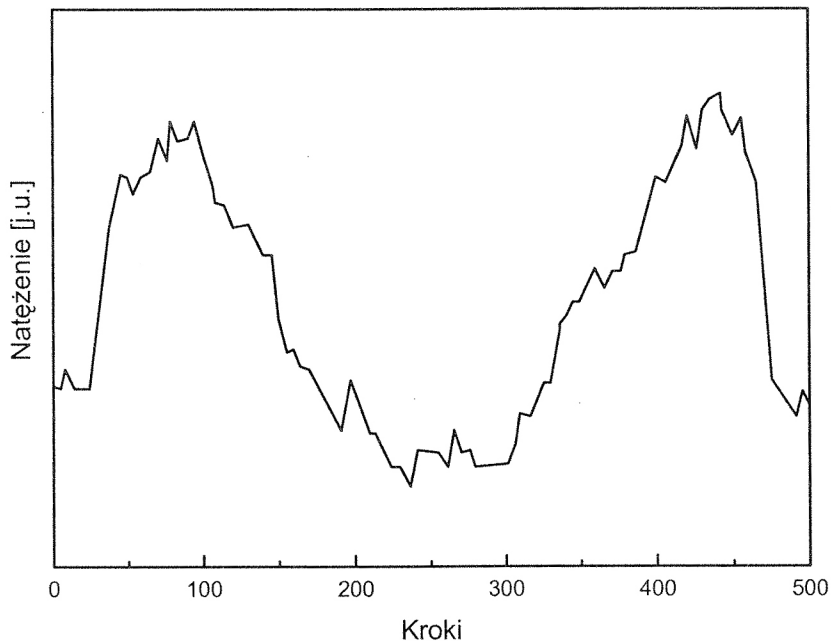


Rys. 2. Schemat laboratoryjnego układu pomiarowego:
1- ława optyczna, 2- laser, 3- polaryzator, 4- kuweta, 5- głowica pomiarowa, 6- silnik krokowy,
7- fotodetektor wiązki rozproszonej, 8- fotodetektor wiązki głównej, 9- kasetka układu sterowania, 10- komputer

Fig. 2. Scheme of laboratory equipment

Do pomiaru składowych natężenia przechodzącego przez kuwetę światła rozproszonego zastosowano fotodetektory, które mogą być przesuwane prostopadłe do osi optycznej układu w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Przesunięcie fotodetektorów można realizować ręcznie lub stosując silnik

krokowy oraz sterowanie komputerowe. Krzywa opisująca zmiany natężenia światła w funkcji przemieszczenia fotodetektorów jest miarą kąta rozproszenia zależnego od wielkości oraz ilości cząsteczek substancji w danej klasie ziarnowej. Przykładowy rozkład ziarnowy zawiesiny kredy w wodzie pokazano na wykresie (rys. 3).

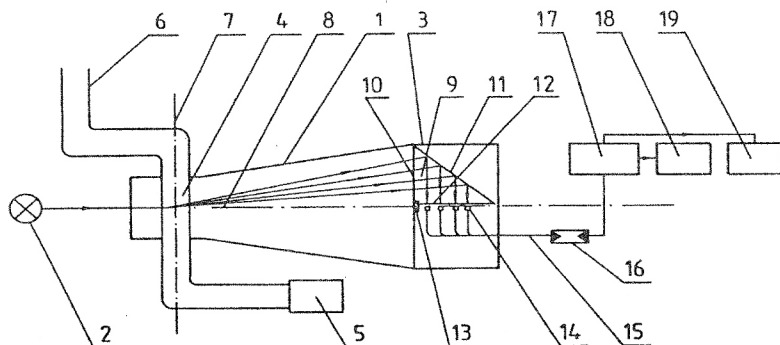


Rys.3. Rozkład kątowy rozpraszania światła na zawieszinie kredowej w wodzie
 Fig. 3. The angle dependency of light intensity scattered on chalk medium

Widać, że wzdłuż płaszczyzny przesuwu, na której silnik krokowy znajduje się na 250 położeniu (kroku) natężenie rozproszenia jest minimalne. Oznacza to, że cząsteczek drobnoziarnistych jest w zawieszinie bardzo mało. Największe natężenie rozproszonego światła zarejestrowano przy położeniach fotodetektorów od 50 do 100 oraz od 400 do 450. Silnik może przesuwać fotodetektor robiąc 500 kroków na długości 0,06 m. Odległość płaszczyzny przesuwu fotodetektora od kuwety wynosi 0,2 m. Powtarzalność wyników dla danej mieszaniny badano w ten sposób, że komputerowo sterowany silnik krokowy przesuwał fotodetektory wzdłuż głowicy prostopadle do osi optycznej układu na całej szerokości, a następnie wykonywał ruch powrotny do położenia początkowego. Uzyskane w pomiarach wyniki zostały uśrednione.

Model pyłomierza optycznego

Na rysunku 4 przedstawiono schemat urządzenia do pomiaru rozproszenia światła na cząsteczkach pyłów [4].



Rys.4. Głowica pomiarowa:

- 1 – komora rozpraszania, 2 – laserowe źródło światła, 3 – głowica pomiarowa, 4 – kanał przepływu zapyłonego powietrza, 5 – ssawa, 6 – sonda, 7 – oś symetrii kanału przepływu zapyłonego powietrza, 8 – oś optyczna urządzenia pomiarowego, 9 – element optyczny, 10 – podstawa wycinka stożka elementu optycznego, 11 – boczna zwierciadlana powierzchnia stolika, 12 – krawędź ścięta stożkowego elementu optycznego, 13 – tłumik optyczny, 14 – końcówki światłowodów, 15 – wiązka światłowodowa, 16 – detektory pomiarowe, 17 – komputer, 18 – monitor, 19 – drukarka

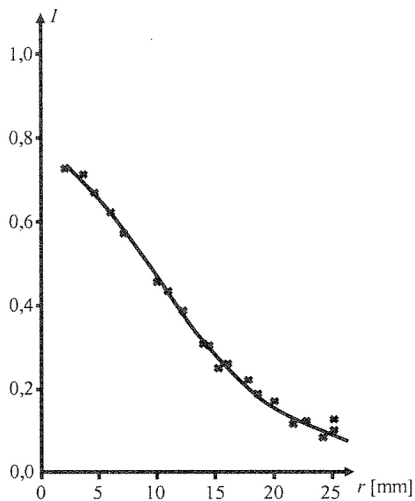
Fig. 4. Measuring head

Na drodze przepływu zapyłonego powietrza lub gazu między sondą (6) oraz ssawą (5) przenikający przez ten strumień promień świetlny ulega rozpraszaniu. Urządzenie służące do pomiaru kąтового rozkładu energii rozproszonej zawiera głowicę pomiarową o takiej konstrukcji, która umożliwia pomiar zarówno natężenia światła rozproszonego, jak i kąta rozpraszania. Główną częścią głowicy pomiarowej jest element optyczny (9) w kształcie wycinka stożka, którego powierzchnia boczna (11) jest powierzchnią zwierciadlaną, natomiast podstawa (10) jest zwrócona w kierunku źródła światła (2) i ustawiona tak, aby jej płaszczyzna była prostopadła do osi optycznej układu pomiarowego. Krawędź przy osi stożkowego elementu optycznego (12) jest ścięta i stanowi soczewkę podłużną, która zebrane przez stożek światło rozpraszane w różnych kątach bryłowych kieruje prostopadłe do osi optycznej głowicy. Na osi optycznej wzdłuż ściętej krawędzi stożkowego elementu optycznego ustawione są końcówki światłowodów (14) połączone z zespołem pomiarowo-rejestrującym (16, 17, 18, 19). W zbudowanym urządzeniu pomiarowym stożkowy element optyczny ma podstawę obejmującą $\frac{1}{4}$

powierzchni koła stanowiący wycinek płaszczyzny o kącie 90° ; umożliwiła to zebranie 25% energii światła rozproszonego w badanym kącie bryłowym. W części przyosiowej podstawy optycznego elementu stożkowego umieszczono tłumik optyczny (13) osłaniający końcówki światłowodów przed działaniem światła biegnącego ze źródła wzdłuż osi optycznej. W urządzeniu stosowano laserowe źródło światła, ponieważ z prowadzonych wcześniej badań wynika, że jednoznaczność oddziaływania między cząsteczkami pyłów a światłem zależy od długości fali.

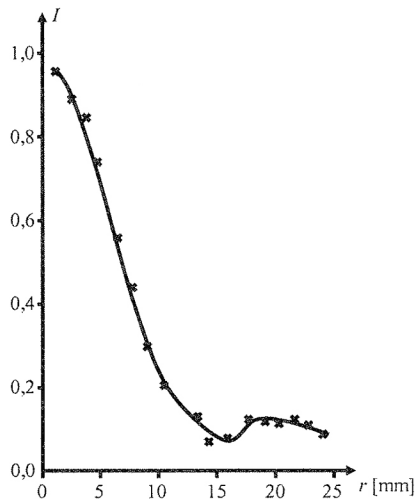
Stosując urządzenie, jak na rysunku 4, do badań używano pyłów kwarcowych oraz serycytowych. Pyły kwarcowe zawierały do 99% krzemionki (SiO_2), serycytowe do 62% SiO_2 , natomiast uzupełnieniem składu tego minerału były związki metaliczne, takie jak: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO , CaO , K_2O i inne w ilościach śladowych. Pyły różniły się gęstością oraz rozkładem ziarnowym. Pomiaru próbne składu ziarnowego za pomocą separatora (wirówki) Bahco wskazały, że w składzie pyłu kwarcowego największe frakcje osiągnęły średnice do $90\ \mu\text{m}$ natomiast dla pyłu serycytowego do $50\ \mu\text{m}$. Zastosowane urządzenie umożliwiało pomiar rozpraszania w kącie bryłowym zawartym od 2° do 10° , co na promieniu płaszczyzny stożkowego elementu optycznego przekładało się na możliwość rozkładu energii promieniowania rozpraszanego od 3 do 25 mm od osi optycznej. Źródłem światła był laser HeNe o mocy 15 mW. Rozkład natężeń światła rozpraszanego na badanych próbkach pyłów podano na wykresach (rys. 5 i 6). Do pomiarów używano jednakowych mas badanych próbek pyłów, natomiast rozkłady kątowe rozpraszania znacznie różnią się i są zależne od wielkości ziaren. Dla cząsteczek pyłów kwarcowych o mniejszej średnicy kąty rozpraszania są większe, a dla cząsteczek pyłów serycytowych zawierających w swym składzie cząsteczki większe oraz metaliczne, rozkład natężeń światła rozpraszanego występuje głównie w obszarze trzyosiowym, ale na tle wykresu pojawia się charakterystyczna osobliwość wskazująca na cząsteczki metaliczne. Biorąc pod uwagę wydatek przepływu zapyłonego powietrza oraz ładunek pyłu wprowadzony do jednostkowego badania można wnioskować na podstawie rozkładu natężenia światła rozproszonego o wartości stężenia zapylenia. Do pełnego przetestowania urządzenia wymagane jest przygotowanie pyłów o frakcjonowanych średnicach, co jest procesem bardzo żmudnym i kosztownym. Dlatego ograniczono się do próbnych pomiarów z określeniem jedynie górnej średnicy badanych pyłów.

W realizowanych badaniach, dzięki zastosowaniu łączy światłowodowych, wykorzystano możliwość zagęszczenia punktów pomiarowych rozpraszania światła w bardzo blisko siebie leżących kątach bryłowych. Takie rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia pozwala na pokonanie bariery nakładania się na siebie energii uzyskanej w procesie rozpraszania światła na cząsteczkach pyłów o rozmiarach niewiele różniących się wielkością.



Rys.5. Zależność natężenia światła I rozproszonego na cząsteczkach pyłów kwarcowych w funkcji odległości od osi optycznej r urządzenia

Fig. 5. Intensity(I) of light scattered on quartz dust as a function of distance from optic axis



Rys.6. Zależność natężenia światła I rozproszonego na cząsteczkach pyłów serecycitowych w funkcji odległości od osi optycznej r urządzenia

Fig. 6. Intensity(I) of light scattered on serecitic dust as a function of distance from optic axis

Wnioski

Dokonano analizy rozkładu energetycznego światła wnikającego w obszar zapyłony. Ze względu na potrzeby wykorzystania w praktyce, poddano szczegółowym badaniom rozpraszania opisane równaniem Rayleigha. Na stanowisku laboratoryjnym poddano badaniom ośrodek mętny będący zawiesiną pyłów kredy w wodzie. Badania wykazały, że na cząsteczkach kredy zawieszonych w wodzie światło ulega rozpraszaniu w niewielkich kątach bryłowych rozmieszczonych wokół osi optycznej urządzenia. Z rozkładu natężeń światła rozproszonego wynika, że w pyłach kredy w znikomej ilości występują cząsteczki drobnoziarniste (rys. 3).

Dzięki zmodernizowanemu stanowisku będącemu odmianą pyłomierza przeprowadzono pomiary rozkładu natężeń światła rozpraszanego na drobnoziarnistych pyłach kwarcowych oraz serycytowych. Na wykresach (rys. 5 i 6) widać wyraźnie różnicę rozkładu natężeń wynikających z oddziaływania światła z cząsteczkami różnych materiałów.

Urządzenia, z których korzystano w badaniach mogą mieć zastosowanie w gospodarce morskiej, jak również w żegludze śródlądowej.

Literatura

1. Teisseyre M., *Pyłomierze przemysłowe. Pomiary i aparatura*. Fundacja Ochrony Powietrza Atmosferycznego. Wyd. FOPA, Warszawa 1995.
2. Petykiewicz J., *Optyka falowa*. PWN, Warszawa 1986.
3. Pieńkowski S., *Optyka*. PWN, Warszawa 1955.
4. Kirkiewicz J., Słowiński Z., *Urządzenie do równoczesnego pomiaru ziarnistości i stężenia zapylenia w gazach*. Patent Polski nr 161928.

Wpłynęło do redakcji w grudniu 2005 r.

Recenzent

dr hab. prof. US Henryk Gurgul

Adres Autorów

doc. dr Józef Kirkiewicz, dr Bohdan Bieg, dr Janusz Chrzanowski
Zakład Fizyki
Akademia Morska
Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin
e-mail: kirkjoz@am.szczecin.pl