



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

BADANIA SYSTEMOWE
Inżynieria Środowiska

METODY I TECHNIKI OPTYCZNE W BADANIACH ZAWIESIN



Janusz Łomotowski
Ewa Burszta-Adamiak
Magdalena Kęszycka
Zdzisław Jary

Warszawa 2008



**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE
W BADANIACH ZAWIESIN**

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Seria: BADANIA SYSTEMOWE, tom 58

Redaktor naukowy: prof. Jakub Gutenbaum

Podseria: Inżynieria Środowiska

Warszawa 2008

**METODY I TECHNIKI OPTYCZNE
W BADANIACH ZAWIESIN**

**Janusz Łomotowski
Ewa Bursza-Adamiak
Magdalena Kęszycka
Zdzisław Jary**

Publikacja wydana ze środków projektu badawczego MINISTERSTWA NAUKI
i SZKOLNICTWA WYŻSZEGO: nr R 11 001 01.

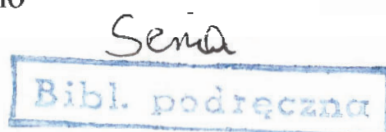
W pracy przedstawiono podstawy działania przyrządów stosowanych do badania zawiesin opartych o dyfrakcję światła. Zaprezentowano sposoby opracowywania wyników badań uzyskiwanych z granulometru laserowego. Praca zawiera oryginalne wyniki badań składu granulometrycznego zawiesin w wodach opadowych, powierzchniowych, ściekach surowych i oczyszczonych oraz osadach czynnych. Wykazano, że instrumentalne badania zawiesin z wykorzystaniem dyfrakcji światła zwiększają zasób informacji o tych, tak ważnych, a rzadko badanych analitycznie domieszkach wód naturalnych i ścieków. Granulometry laserowe pozwalają poznać skład cząsteczkowy zawiesin oraz ich budowę przestrzenną, dzięki identyfikacji wymiaru fraktalnego. Badania z użyciem granulometrów laserowych powinny w większym stopniu być prowadzone przy monitoringu jakości wód naturalnych i technologicznych, badaniach ścieków surowych i oczyszczonych oraz osadów ściekowych.

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Metzger

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Dr inż. hab. Maria Żygadło



45903

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2008

Instytut Badań Systemowych PAN
Newelska 6, PL 01-447 Warsaw

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN
e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl

ISBN 978-83-89475-14-5

ISSN 0208-8029

Druk i oprawa: ARTPRESS, tel. 052 354 95 10

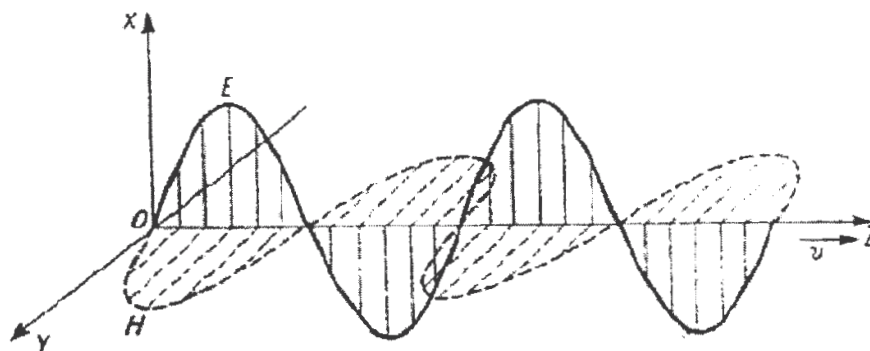
2. PODSTAWY TEORETYCZNE

2.1. Fizyka fal elektromagnetycznych

Światło, to fale elektromagnetyczne opisywane jako drgania w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych z tymi samymi fazami wektorów natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} [V/m] i pola magnetycznego \mathbf{H} [A/m] (Rysunek 3). Prędkość v rozchodzenia się promieniowania świetlnego jest prostopadła do kierunku obu wektorów \mathbf{E} i \mathbf{H} i zależy od ośrodka, w którym fala się przemieszcza. Objętościową gęstość energii fal elektromagnetycznych (w), którą wyraża się w J/m^3 można wyznaczyć z zależności:

$$w = \frac{1}{v} EH = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 = \mu_r \mu_0 H^2 \quad (1)$$

gdzie $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m jest przenikalnością elektryczną próżni, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m·A⁻¹ to przenikalność magnetyczna próżni a ϵ_r , μ_r są odpowiednio bezwymiarowymi wartościami względnej przenikalności elektrycznej (magnetycznej) ośrodka, w którym przemieszcza się fala elektromagnetyczna.



Rysunek 3. Obrazowy model fali elektromagnetycznej

Stała charakterystyczna dla danego ośrodka ϵ_r nazywana jest często stałą dielektryczną.

Natężenie energii fali elektromagnetycznej jest definiowane wzorem:

$$I = \bar{w} \cdot v \quad (2)$$

gdzie \bar{w} jest uśrednioną po czasie objętościową gęstością energii.

Długość fali elektromagnetycznej λ [m] w dowolnym ośrodku materialnym można określić ze związku:

$$f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \frac{c_0}{\lambda} \quad (3)$$

gdzie f jest częstotliwością [Hz], a c_0 oznacza prędkość światła w próżni równą 299792458 m/s. Energię fotonu o długości λ , wyrażoną w J, można określić z zależności:

$$E_\lambda = h \cdot f = h \cdot \frac{c_0}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (4)$$

gdzie h jest stałą Plancka, równą $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s.

Średnie natężenie energii n fotonów o długości λ padających na powierzchnię F [m²] w czasie t [s] wyniesie:

$$I_\lambda = \frac{n \cdot E_\lambda}{F \cdot t} \quad (5)$$

W przypadku analizy świetlnych fal elektromagnetycznych wartość I_λ nazywa się intensywnością światła.

Światło jest falą elektromagnetyczną, która może ulec odbiciu i załamaniu na granicach przezroczystych ośrodków oraz wykazuje zjawiska absorpcji, dyfrakcji, interferencji i polaryzacji. Dla badań zawiesin najbardziej istotne jest zjawisko dyfrakcji rozumiane jako odchylenie się fal elektromagnetycznych od prostoliniowego kierunku ich rozchodzenia w wyniku oddziaływania napotkanej na swej drodze cząstki (przeszkody) oraz absorpcji, czyli pochłanianie energii fal elektromagnetycznych przez substancje, z których zbudowane są zawiesiny i ośrodek, w którym są one rozproszone.

2.2 Rozproszenie światła

Fala elektromagnetyczna padająca na cząstkę materialną może ulec załamaniu, odbiciu, ugięciu lub pochłonięciu (absorpcji). Zjawiska te powodują zmianę kierunku propagacji (przemieszczania się) fali elektromagnetycznej, które nazywane jest rozproszeniem promieniowania.

Badania nad rozpraszaniem światła przez cząstki zawieszony w powietrzu, koloidy i pyły, zostały zapoczątkowane przez Tyndalla (Comtois, 2001). W 1859 przedstawił on hipotezę, później potwierdzoną przez Rayleigha, że niebieski kolor nieba to efekt rozproszenia światła na cząsteczkach wchodzących w skład górnych warstw atmosfery.

Oddziaływanie fal elektromagnetycznych z cząstkami materialnymi może mieć charakter elastyczny, gdy rozpraszanie fal następuje bez zmiany ich długości oraz nieelastyczny w przypadku zmian długości fali (np. rozproszenie Ramana) (Praca zbiorowa, 1974). W badaniach właściwości cząstek zawieszonych w płynach (cieczach lub gazach) używa się promieni Roentgena (promieni X), fal w zakresie ultrafioletu (UV), światła widzialnego lub bliskiej podczerwieni (IR).

Według Berho i in. (2004) w zależności od parametru zdefiniowanego formułą:

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (6)$$

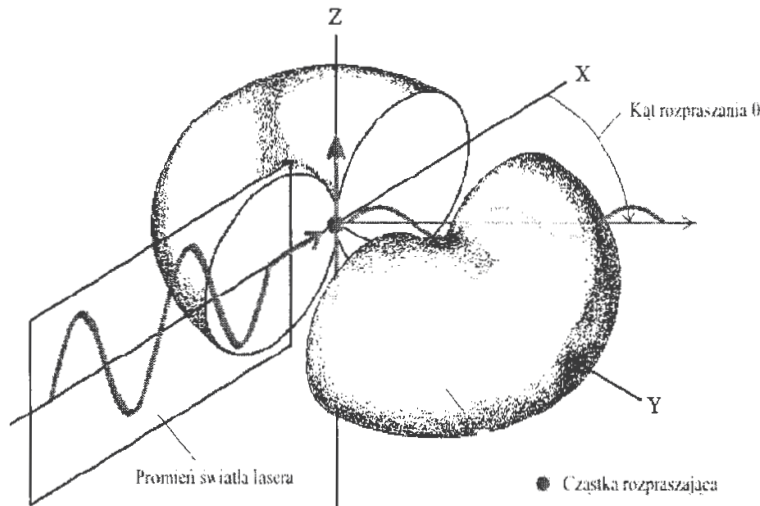
gdzie d jest średnicą cząstki, a λ długością fali elektromagnetycznej, wyróżnić można trzy różne typy rozproszenia światła. W przypadku, gdy $\alpha > 30$ można stosować model Fraunhofera, dla $0,3 < \alpha < 30$ rozproszenie fal opisuje się teorią Lorenza-Mie, a dla wartości $\alpha < 0,3$ dochodzi do rozproszenia typu Rayleigh'a.

2.3. Model Fraunhofera

W modelu Fraunhofera zakłada się, że cząstki zawieszony są nieprzezroczyste, a na ich powierzchni zachodzi jedynie załamanie promieni świetlnych. Intensywność rozpraszania światła określa zależność (Kokhanovsky i Weichert, 2001):

$$I(\theta, d) = I_0 \cdot \frac{J_1^2(\alpha \cdot \theta)}{\theta^2} \cdot \frac{d^2}{R^2} \cdot N \cdot V \quad (7)$$

gdzie N jest liczbą cząstek w objętości V badanej zawiesiny, R – odległością punktu obserwacyjnego, θ – kątem rozproszenia (Rysunek 4), I_0 – natężeniem światła na kierunku wiązki promieni lasera padającego na cząstki, J_1 funkcją Bessela pierwszego rodzaju, a α jest określona wzorem (6).



Rysunek 4. Sposób wyznaczania kąta rozproszenia θ . Przedstawiona na rysunku powierzchnia jest wyznaczona przez punkty o tym samym natężeniu światła (Opracowano na podstawie Nobbmann, 2006)

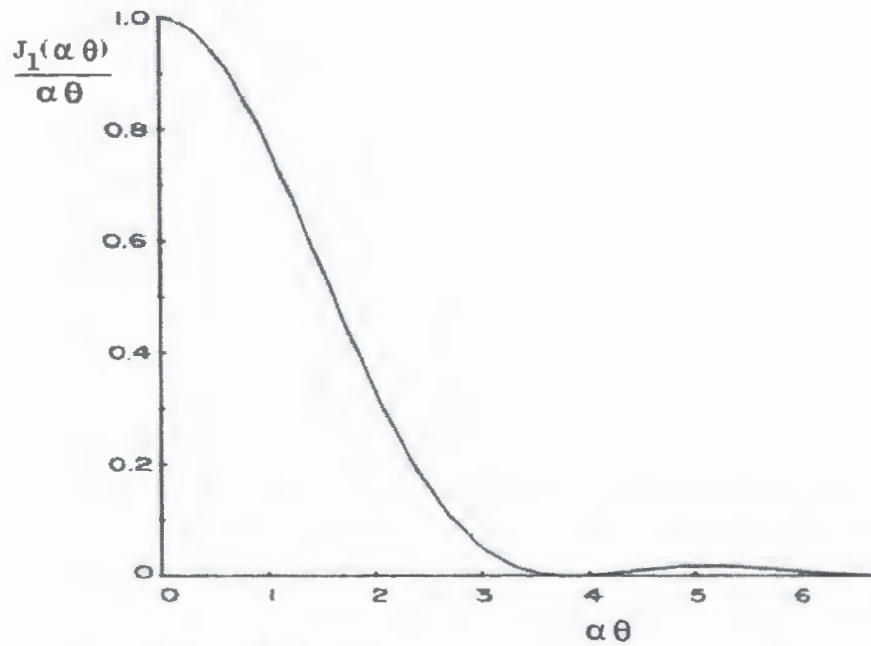
Równanie (7) można przekształcić mnożąc licznik i mianownik przez α^2 do postaci:

$$I(\theta, d) = I_0 \cdot \frac{J_1^2(\alpha \cdot \theta)}{\theta^2 \alpha^2} \cdot \frac{d^2}{R^2} \cdot N \cdot V \cdot \alpha^2 \quad (8)$$

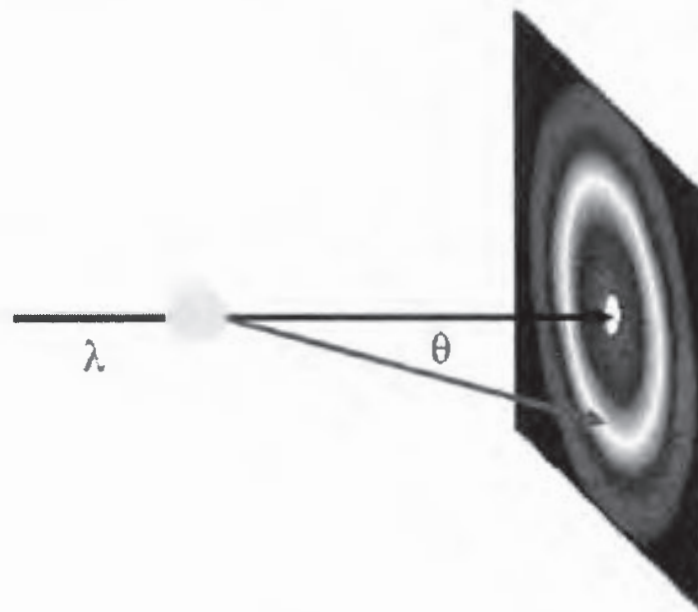
Zakładając, że rozpatrujemy przypadek rozproszenia wiązki światła monochromatycznego o długości λ przez zawiesinę składającą się tylko z cząstek o średnicy d w stałej odległości R , przebieg $I(\theta, d)$ będzie zależeć od wartości funkcji:

$$y(\alpha \cdot \theta) = \frac{J_1(\alpha \cdot \theta)}{\alpha \cdot \theta} \quad (9)$$

Na Rysunku 5 przedstawiono wykres funkcji (9). Widać, że największe wartości funkcja ta przyjmuje dla odciętych $\alpha \cdot \theta$ w przedziale $(0; \approx 3,8)$, gdzie przybliżona wartość 3,8 jest pierwszym miejscem zerowym krzywej opisanej równaniem (9).



Rysunek 5. Przebieg funkcji opisanej równaniem (9)



Rysunek 6. Powstawanie prążków dyfrakcyjnych w wyniku rozproszenia światła na dużych cząstkach (λ oznacza kierunek fali elektromagnetycznej padającej na cząstkę sferyczną, a θ to kąt rozpraszania światła)

Z modelu Fraunhofera wynika, że największe zmiany intensywności wywołane przez rozproszenie światła na dużych cząstkach będą obserwowane w pobliżu osi optycznej (Rysunek 6).

W przypadku oddziaływania na światło wielu cząstek zawiesiny wokół osi optycznej, obserwowane będą prążki o różnej intensywności światła podobne do prążków dyfrakcyjnych.

Wiedząc, że zachodzi zależność:

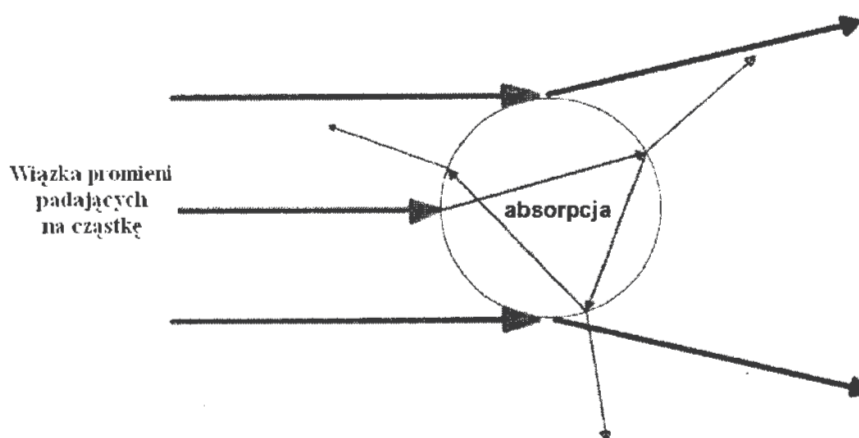
$$\alpha\theta = \frac{\pi d\theta}{\lambda} \approx 3,8 \quad (10)$$

można określić przy znanej długości fali światła monochromatycznego wartość kątów rozproszenia θ , powyżej których obserwowany będzie zanik natężenia światła rozproszonego. W granulometrach laserowych używa się najczęściej światła lasera helowo-neonowego emitującego fale o długości 633 μm .

Model Fraunhofera można stosować dla cząstek większych od 15 μm . Dla cząstek o tej średnicy kąt rozproszenia θ do pierwszego zaniku światła wyniesie 9,2°, dla cząstek 20 μm , 30 μm , 50 μm kąt ten wyniesie odpowiednio 6,9°, 4,6° i 2,8°. Duże cząstki będą powodować zmiany intensywności światła w pobliżu osi optycznej przyrządu.

2.4. Model Mie

Zachowanie światła w kontakcie ze sferycznymi cząstkami materii opisuje model opracowany przez Gustawa Mie (Pluta, 1982). Uwzględnia on rozproszenie (załamanie), absorpcję (pochłanianie) oraz przechodzenie promieni świetlnych przez cząstki o różnej przezroczystości (Rysunek 7).



Rysunek 7. Oddziaływania promieni świetlnych z cząstką materialną w modelu Mie

Model Mie został wyprowadzony z ogólnych równań Maxwella. Szczegółowy opis teorii Mie można znaleźć w pracach Pluty (1982), de Boer G.B. i in. (1987) oraz Mishchenko i in. (2002). Opracowano też uogólnione modele rozpraszania światła na cząstkach innych niż sferyczne (Mishchenko i in., 2000).

Zmiany natężenia światła opisane teorią Mie można w przybliżeniu wyliczyć z zależności (Nobmann, 2006):

$$I(\theta) = I_0 \frac{d^2}{16} \left\{ \alpha^2 \left[\frac{2J_1(\alpha\theta)}{\alpha\theta} \right]^2 + \left[\frac{4m^2}{(m^2-1)(m+1)} \right]^2 + 1 \right\} \quad (11)$$

gdzie:

m zespolony współczynnik załamania światła wyliczany ze wzoru:

$$m = n + i \cdot \kappa \quad (12)$$

n współczynnik załamania światła dla granicy faz dyspergent (woda)-cząstka zawieszona;

i jednostka urojona;

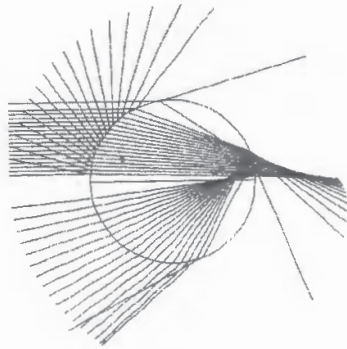
κ współczynnik absorpcji (pochłaniania) fotonów o długości λ , określony wzorem:

$$\kappa = \frac{\alpha_\lambda \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \quad (13)$$

σ_λ współczynnik absorpcji światła przez substancję, z której zbudowana jest cząstka.

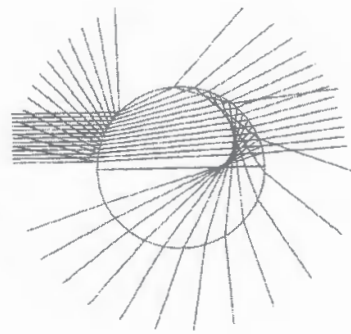
Znaczenie uwzględnienia załamania światła na granicy faz woda-cząstka zawieszona obrazuje Rysunek 8.

Na Rysunkach 9-12 przedstawiono rozproszenie światła, padającego od strony powietrza, przez kuliste krople wody o średnicach 2,5 μm , 5 μm , 10 μm i 20 μm . Widać, że ze wzrostem średnicy cząstek obserwuje się dużą zmienność w intensywności światła rozproszonego, przy czym największe zmiany intensywności mają miejsce wzdłuż linii optycznej. Przy małych średnicach następuje zbliżanie się do równomiernego rozpraszania światła dla wszystkich kątów sferycznych.



Rozproszenie 18 promieni przy ich przejściu z powietrza do kulistej kropli wody.

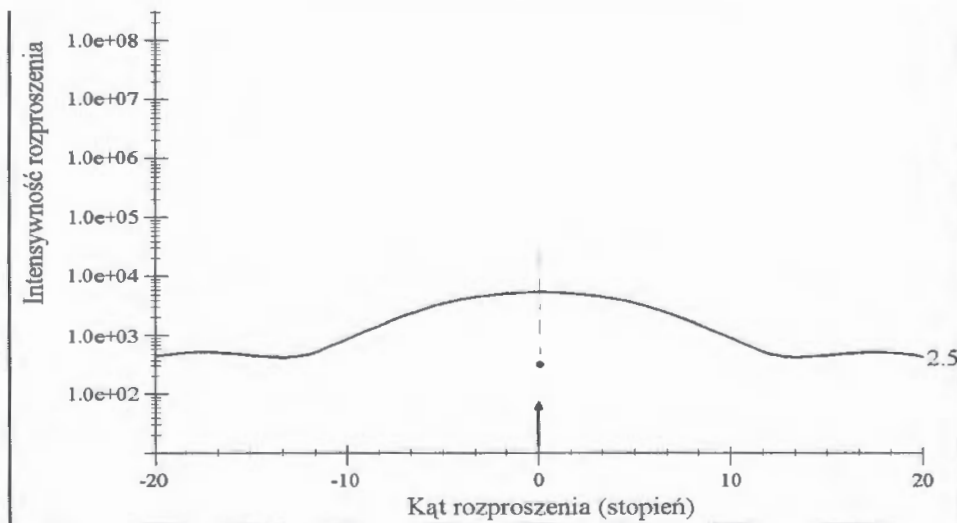
Względny współczynnik załamania światła $m=1,334$



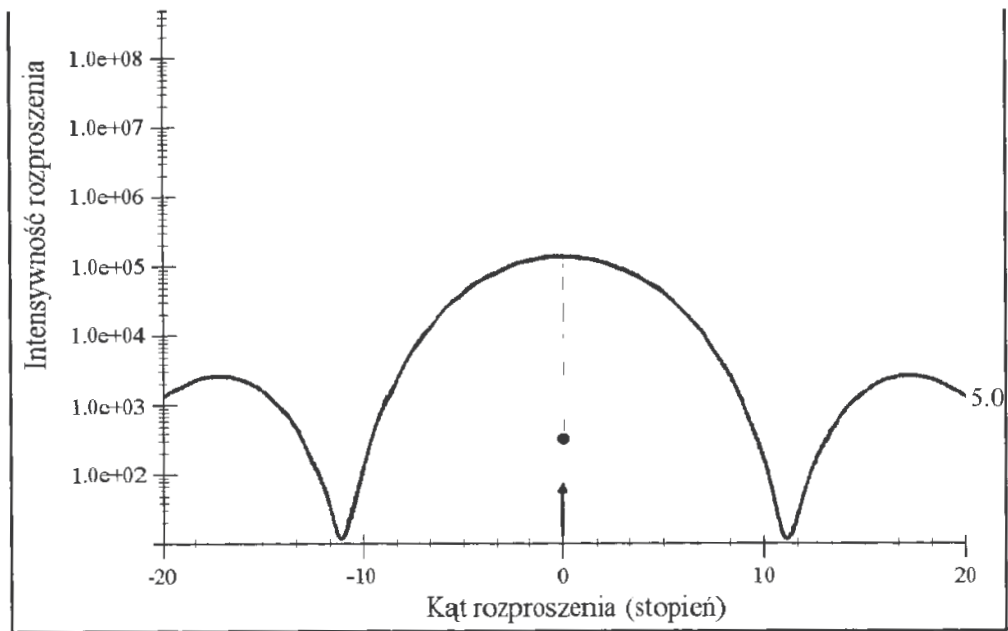
Rozproszenie 18 promieni przy ich przejściu z wody do pęcherzyka powietrznego.

Względny współczynnik załamania światła $m=0,7496$

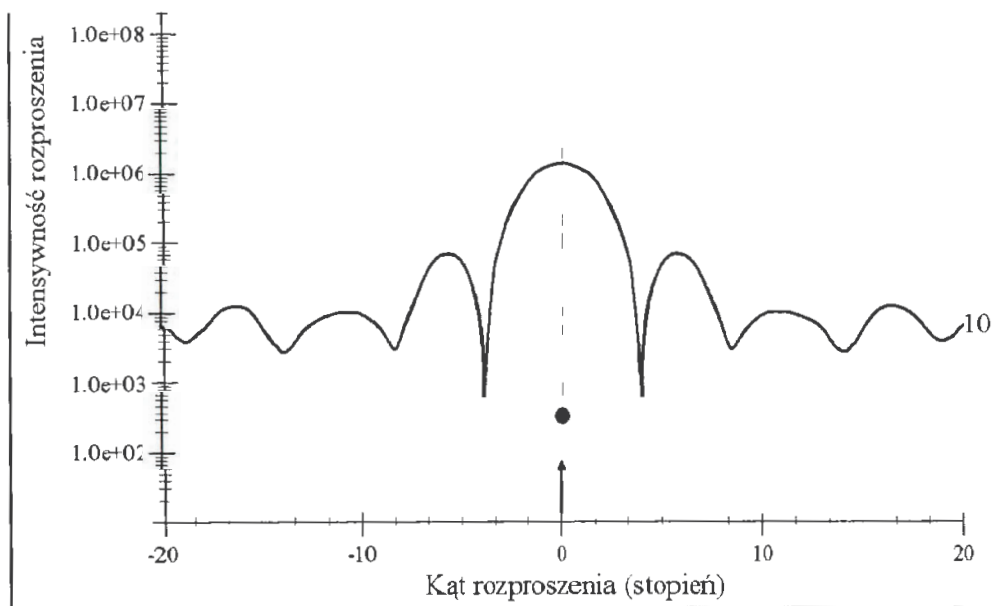
Rysunek 8. Wpływ względnego współczynnika załamania światła na zjawisko rozproszenia promieni (Opracowano na podstawie danych zamieszczonych na stronie <http://hhbconsult.homepage.dk/Basic.html>)



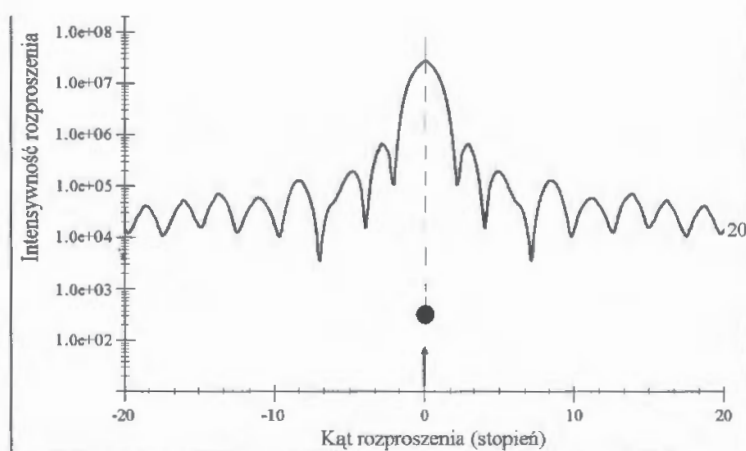
Rysunek 9. Rozproszenie światła padającego od strony powietrza, przez kulistą kroplę wody o średnicy $2,5 \mu\text{m}$ (opracowano na podstawie Bachalo, 2005)



Rysunek 10. Rozproszenie światła padającego od strony powietrza, przez kulistą kroplę wody o średnicy $5 \mu\text{m}$ (opracowano na podstawie Bachalo, 2005)



Rysunek 11. Rozproszenie światła padającego od strony powietrza, przez kulistą kroplę wody o średnicy $10 \mu\text{m}$ (opracowano na podstawie Bachalo, 2005)



Rysunek 12. Rozproszenie światła padającego od strony powietrza, przez kulistą kroplę wody o średnicy $20\ \mu\text{m}$ (opracowano na podstawie Bachalo, 2005).

2.5. Rozproszenie Rayleigha

Rozproszenie Rayleigha polega na absorpcji przez cząstkę (molekułę lub atom) fotonu promieniowania elektromagnetycznego z natychmiastową re-emisją fotonu o tej samej energii z ewentualną zmianą kierunku. Ten rodzaj rozpraszania fal elektromagnetycznych zachodzi praktycznie na całej powierzchni cząstek. Fale są rozpraszane we wszystkich kierunkach prawie równomiernie. Natężenie promieniowania światła rozproszonego do przodu i do tyłu jest porównywalne.

Rayleigh w 1899 (za Pesic, 2005) wykazał, że intensywność rozpraszania fal elektromagnetycznych I_r jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi ich długości:

$$I_r \approx \frac{1}{\lambda^4} \quad (14)$$

Długość fal światła o barwie fioletowej mieści się w przedziale od 380–415 nm, podczas gdy o barwie czerwonej od 650–780 nm. Z zależności (14) wynika, że natężenie części niebieskiej widma światła białego jest blisko szesnastokrotnie silniej rozpraszane niż światła czerwonego. W przypadku, gdy na silnie zmętniony roztwór będzie padać światło białe, barwa światła przechodzącego przez roztwór będzie zbliżać się do światła czerwonego, a rozproszonego do światła niebieskiego, przy czym efekt ten będzie bardziej wyraźny w miarę zmniejszania się cząsteczek wywołujących rozproszenie.

LITERATURA

- Afoakwa E.O., Paterson A, Fowler M. (2007): Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. *European Food Research and Technology* DOI 10.1007/s00217-007-0652-6
- Agrawal Y.C., McCave I.N., Riley J.B. (1997): Laser diffraction size analysis. In: J.P.M. Syvitski (ed.), *Principles, methods, and application of particle size analysis*. Cambridge University Press, Cambridge. 119-128.
- Ahmed H.A.M, Drzymala J. (2005): Two-dimensional fractal linearization of distribution curves. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, **39**, 129-139.
- Alba F.I. (1999): Acoustic spectroscopy as a technique for the particle sizing of high concentration colloids, emulsions and suspensions. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Engineering Aspects*, **153**, 495-502.
- Allen T. (1997): *Particle size measurement. Vol.1 - Powder sampling and particle size measurement*. 5th ed. Chapman and Hall Ltd., London.
- Andersson S. (1990): *Om mineraljordens och mullens rumsutfyllande egenskaper. En teoretisk studie*. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord, XXVI., Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Azema N., Pouet M.F., Berho C., Thomas O. (2002): Wastewater suspended solids study by optical methods. *Physicochemical and Engineering Aspects*, **204**: 131-140.
- Bachalo W.D. (2005): Spray characterization: techniques, capabilities, limitations, accuracy, and error analysis. *18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Irvine, CA.
- Bale A.J. (1996): In situ laser optical particle sizing. *Journal of Sea Research*, **36**, 1-2: 31-36.
- Bayle S., Azema N, Berho C., Pouet M.F., Lopez-Cuesta J.M., Thomas O. (2005): Study of heterogeneous suspensions: A new quantitative approach coupling laser granulometry and UV-vis spectrophotometry. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **262**: 242-250.

- Berho C., Pouet M. F., Bayle S., Azema N., Thomas O. (2004): Study of UV-vis responses of mineral suspensions in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **248**: 9-16.
- Bertino L. Wackernagel H. (2002): *Case studies of change-of-support problems*. IMPACT Project Report No 20 (Contract IST-1999-11313). Technical Report N-21/02/G ENSMP - ARMINES, Centre de Géostatistique 35 rue Saint Honoré, F-77305 Fontainebleau, France <http://cg.ensmp.fr>.
- Biggs C.A., Lant P.A. (2000): Activated sludge flocculation: on-line determination of floc size and effect of shear. *Wat. Res.* 2000, **34**, 9: 2542-2550.
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, New York: 13-20.
- de Boer G.B., de Weerd C., Thoenes D., Goossens H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Blodgett C., Jakubauskas M., Price K., and Martinko E. (2000): *Remote Sensing-based Geostatistical Modeling of Forest Canopy Structure*. ASPRS 2000 Annual Conference, Washington, D.C., May 22-26, 2000.
- Boeker E., van Grondelle R. (2002): *Fizyka środowiska*. PWN, Warszawa.
- Boer de G.B., de Weerd, C., Thoenes, D., Goossens, H.W.J. (1987): Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characterisation*, **4**: 14-19.
- Bushell G. (2005): Forward light scattering to characterise structure of flocs composed of large particles. *Chemical Engineering Journal*, **111**: 145-149.
- Chapman G. V. (2000): Instrumentation for flow cytometry. *Journal of Immunological Methods*, **243**: 3-12
- Chu B. (1991): *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Academic Press, Boston.
- Clark R.A. (1995): The use laser diffraction for the evaluation of the aerosol clouds generated by medical nebulizers. *International Journal of Pharmaceutics*, **115**: 69-78.
- Comtois P. (2001): John Tyndall and the floating matter of the air. *Aerobiologia*, **17**: 193-202.
- Cornillault, J. (1972): Particle size analyser. *Applied Optics*, **11**: 265-268.
- Ebie K, Yamaguchi D., Hoshikawa H., Shirozu T., (2006): New measurement principle and basic performance of high-sensitivity turbid meter with two optical systems in series. *Water Research*, **40**: 681-691.

- Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. (Eds.) (1997): *Handbook of Heterogeneous Catalysis*. VCH, Weinheim.
- Eshel G. Levy G. J., Mingelgrin U., Singer M. J. (2004): Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**: 736-743.
- Etxebarria N, Arana G., Antolin R, Diez E., Borge G., T. Posada T., Raposo J.C. (2005): Chromium powder as a reference material for the quality control of particle-size measurement by laser diffraction. *Powder Technology*, **155**: 85-91.
- Förster J. (1996): Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Wat. Sci. Tech.*, **33**, 6: 39-48.
- Förster J. (1998): The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 10: 83-90.
- Gerds G. Luedke G. (2006): FISH and chips: Marine bacterial communities analyzed by flow cytometry based on microfluidics. *Journal of Microbiological Methods*, **64**: 232-240.
- Gillberg L., Eger L., Jepsen S.E. (1990): Effect of Coagulants on Particle Distribution and Concentration. W: *Chemical Water and Wastewater Treatment*, Ed. Hahn H.H. and Klute R., Springer Verlag, Heidelberg.
- Gippel C.J. (1994): Monitoring turbidity of stream water. *Austr. J. Soil Water Cons.*, **7**: 37-44.
- Gradziński, R., Kosteczka, A., Radomski, A., Unrug, R. (1986): *Zarys sedymentologii*. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.
- Govoreanu R. (2004): *Activated sludge flocculation dynamics: On-line measurement methodology and modeling*. Universiteit Gent Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Gent (ISBN 90-5989-031-0).
- Guan J., Waite D.T., Amal R. (1998): Rapid structure characterization of bacterial aggregates. *Environ. Sci. Technol.*, **32**: 3735-3742.
- Guinier A. (1994): *X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies*. Dover, New York.
- Heinrich S., Mirko Peglow M., Henneberg M., Drechsler J., Mörl L. (2004): *Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers*. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A., 121-128

- Hejluk L., Banasik K. (2002): *Badania zmienności uziarnienia rumowiska unoszonego w małej zlewni rolniczej*. Mat. Sympozjum Naukowego nt. Erozja gleb i transport rumowiska rzecznego, Zakopane 10-12.10.2002, str. 81-87.
- Ho L., Newcombe G. (2005): Effect of NOM, turbidity and floc size on the PAC adsorption of MIB during alum coagulation. *Water Research*, **39**: 3668-3674.
- Houghton J.I., Burgess J.E., Stephenson T. (2002): Off-line particle size analysis of digested sludge. *Wat. Res.*, **36**: 4643-4647.
- Hutorowicz A. (2005): *Opracowanie standardowych objętości komórek do szacowania biomasy wybranych taksonów glonów planktonowych wraz z określeniem sposobu pomiarów i szacowania*. Olsztyn (http://www.gios.gov.pl/dokumenty/oprac_stan_kom.doc)
- Issmer K. (2000): Optical methods in the grain-size analysis of fine-grained sediments. *Geological Quarterly*, **44**, 2: 205-210.
- Iyer R.S., Stanmore B. (1999): The effect of water absorption and the role of fines on the yield stress of dense fly ash slurries. *Cement and Concrete Research*, **29**: 765-767.
- Jarvis P., Jefferson B., Parsons S.A. (2005): Measuring floc structural characteristics. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. **4**: 1-18.
- Jonker R.R., Meulemans J.T., Dubelaar G.B.J., Wilkins M.F., Ringelberg J. (1995): Flow cytometry: A powerful tool in analysis of biomass distributions in phytoplankton. *Wat. Sci. Tech.*, **32**, 4: 177-182.
- Jauhiainen M. (2004): *Relationships of particle size distribution curve, soil water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity and their implications on water balance of forested and agricultural hillslopes*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Espoo (Finland) (ISBN 951-22-7194-X).
- Kawecka B., Eloranta P.V. (1994): *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*. PWN, Warszawa.
- Kerker M. (1969): *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. Academic Press, New York.
- Kim H.W., Choi M. (2003): In situ line measurement of mean aggregate size and fractal dimension along the flame axis by planar laser light scattering. *Journal of Aerosol Science*, **34**: 1633-1645.
- Kizil M.S., Peterson J., English W. (2000): The effect of coal particle size on colorimetric analysis of roadway dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **14**: 387-394.

- Kokhanovsky A.A., Weichert R. (2001): Multiple light scattering in laser particle sizing. *Applied Optics*, **40**, 9: 1507-1513.
- Kowalski W.P. (2004): Investigation of fine grains distribution using the sedimentation analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, **157-158**, 561-565.
- Kulczycki P. (2005): *Estymatory jądrowe w analizie systemowej*. WNT, Warszawa.
- Lackowski M., Balachandran W., Krupa A., Kulon J., Jaworek A. (2002): Oczyszczanie gazów z drobnych cząstek przy użyciu naładowanych kropli, *Mat. VI Sympozjum Emisje zagrażające środowisku*, Kudowa Zdrój.
- Lee D.G., Bonner J.S., Garton L. S., Ernest A.N.S., Autenrieth R.L. (2000): Modeling coagulation kinetics incorporating fractal theories: a fractal rectilinear approach. *Water Research*, **34**, 7, 1987-2000.
- Leuschner R.G.K, Weaver A.C., Lillford P. J. (1999): Rapid particle size distribution analysis of Bacillus spore suspensions. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*, **13**: 47-57.
- Li D.H., Ganczarczyk J.J.(1989): Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes. *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 1385-1389.
- Lilkov V., Dimitrowa E., Gaidardzhiev S. (1999): Microscopic and laser granulometric analyses of hydrating. *Cement and Concrete Research*, **29**: 3-8.
- Logan, B.E., Wilkinson D.B. (1990): Fractal geometry of marine snow and other biological aggregates., *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 130-136.
- Lunven M., Gentien P., Kononen K., Le Gall E., Daniélou M.M. (2003): In situ video and diffraction analysis of marine particles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**: 1127-1137.
- Madsen J., Harbo J., Nonn T.I., Blondel D., Hjertager B.H, Solberg T. (2003): *Measurement of droplet size and velocity distributions in sprays using Interferometric Particle Imaging (IPI) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)* ICLASS 2003, July 13-17, 2003, Sorrento, Italy
- Mauromicale G., Ierna A., Marchese M. (2006): Chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in field-grown potato as affected by nitrogen supply, genotype, and plant age. *Photosynthetica*, **44**, 1: 76-82.
- Maxwell K., Johnson G.N. (2000): Review article. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, **51**, 354: 659-668.
- McGarvey M., McGregor D., McKay R.B. (1997): Particie size analysis by laser diffraction in organic pigment technology. *Progress in Organic Coatings*, **31**: 228-231.

- McCave, I.N., Bryant, R.S., Cook, H.F., Coughanowr, C.A. (1986): Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, **56**: 61-564.
- McCrae C.H., Lepoetre A. (1996): Characterization of dairy emulsion by forward lobe laser light scattering – Application to milk and cream. *Inst. Dairy Journal*, **6**: 47-256.
- Mishchenko, M.I., Hovenier J.W., Travis L.D., (Eds.) (2000): *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications*. Academic Press, San Diego.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A. (2002): *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Moon B.H., Seo G.T., Lee T.S., Kim S.S., Yoon C.H. (2002): Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*, **47**, 1: 65-70.
- Neis U., Tiehm A. (1997): Particle size analysis in primary and secondary waste water effluents. *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 4: 151-158.
- Neu T.R., Woelfl S., Lawrence J.R. (2004): Three-dimensional differentiation of photo-autotrophic biofilm constituents by multi-channel laser scanning microscopy (single-photon and two-photon excitation). *Journal of Microbiological Methods*, **56**: 161-172.
- Nobbmann U. (2006): *Protein Sizing by Light Scattering, Molecular Weight and Polydispersity*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Orzechowski Z. (1990): *Przeptywy dwufazowe jednowymiarowe ustalone adiabatyczne*. PWN, Warszawa.
- Pedros R., Goulas Y., Jacquemoud S., Louis J., Moya I. (2004): A new leaf fluorescence model. In: *2nd International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence, 17-19 November 2004, Canadian Space Agency Conference Center, St-Hubert, Québec, Canada*.
- Pesic P. (2005): The sky is falling: Newton's droplets, Clausius's bubbles and Tyndall's "sky matter". *Eur. J. Phys.*, **26**: 189-193.
- Pluta M. (1982): *Mikroskopia optyczna*. PWN, Warszawa.
- Podhorecki R, Moniuk W., Bielski P., Sobieszuk P. Dąbrowiecki G. (2000): Bubble diameter correlation via numerical experiment. *Chemical Engineering Journal*, **113**, 1, 35-39.
- Porod G. (1951): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. I. Teil. *Kolloid Z.*, **124**: 83-114.

- Porod G. (1952): Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloiden Systemen. II. Teil. *Kolloid Z.*, **125**: 108-122.
- Porter J., Deere D., Hardman M., Edwards C., Pickup R. (1997): Mini review. Go with the flow - use of cytometry in environmental microbiology. *FEMS Microbiology Ecology*, **24**: 94-101.
- Porter J., Pickup P.W. (2000): Nucleic acid-based fluorescent probes in microbial ecology: application of flow cytometry. *Journal of Microbiological Methods*, **42**, 75-79.
- Praca zbiorowa (1974): *Encyklopedia fizyki*. PWN, Warszawa.
- Provencher, S. W. (1982): A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic or integral equations. *Comput. Phys. Commun.* **27**: 213-227.
- Pye K., Blott S.J. (2004): Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. *Forensic Science International*, **144**: 19-27.
- Racinowski R., Szczepk T., Wach J. (2001): *Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych*. Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Rawle A. (2005): *Basic principles of particle size analysis*. Malvern, Worcestershire WR14 1XZ.
- Rideal G. R. (2007): *Particle characterization. Setting the standard – the development of particle size reference standards*. http://whitehousescientific.com/pdf%20reports/intlabmate_0806_particlecharact.pdf.
- Rideal G. R., Jones R., M. (2000): The production and application of particle size reference standards. *International Laboratory (ISC)*, June 2000, 1-4.
- Robens E., Benzler B., Buchel G., Reichert H., Schumacher K. (2002): Investigation of characterizing methods for the microstructure of cement. *Cement and Concrete Research*, **32**: 87-90.
- Sadar M. (2002): *Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology*. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 - May 2, 2002, Reno, NV.
- Sampei M. i in. (2002): Seasonal and spatial variability in the flux of biogenic particles in the North Water, 1997-1998. *Deep-Sea Research II*, **49**: 5245-5257.
- Santos N.C., Castanho M. A. R. B. (1999): Teaching light scattering spectroscopy: The dimension and shape of tobacco mosaic virus. *Biophysical Journal*, **71**, 9: 1641-1646.
- Selomulya C. (2001): *The effect of shear on flocculation and floc size/structure*. The University of New South Wales, Australia (tezy rozprawy doktorskiej).

- Sorensen C. M. (2000): The optics of single particles and fractal aggregates. *Journal of Aerosol Science*, **31**: 952-954.
- Sorensen C. M. (2001): Light scattering by fractal aggregates: a review. *Aerosol Science and Technology*, **35**: 648-687.
- Sozański M.M, (Red.) (1999): *Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody*. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Stasicka Z. (2001): *Procesy fotochemiczne w środowisku*. Wydaw. Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Swithenbank J., Beer J.M., Taylor D.S., Abbot D., McGreath G.C. (1977): A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distributions. In: B.J. Zinn (Ed.), *Experimental Diagnostics in Das Phase Combustion Systems: Progress in Astronautics and Aeronautics*, **53**: 421-447.
- Syroeshkin A.V., Popov P.I., Grebennikova T.V., Frolov V.A., Pleteneva T.V. (2005): Laser diffraction for standardization of heterogeneous pharmaceutical preparations. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **37**: 927-930.
- Szewald O., Kotsis I. (2001): Setting the optimal technological parameters for producing ceramic substrates. *Ceramics International*, **27**: 467-471.
- Tang S., Ma Y., Sebastine I.M. (2001): The fractal nature of Escherichia coli biological flocs. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **20**: 211-218.
- Tani K., Kurokawa K., Nasu M. (1998): Development of a direct in situ PCR method for detection of specific bacteria in natural in environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**: 1536-1540.
- Using laser diffraction analysis in pigment sizing. Particle characterization. Application information A-1994A*. Beckman Coulter Inc.
- Vesey G., Hutton P., Champio, A., Ashbolt N., Williams K.L., Warton A., Veal D. (1994): Application of flow cytometric methods for the routine detection of Cryptosporidium and Giardia in water. *Cytometry*, **16**: 1-6.
- Viklander M. (1999): Dissolved and particle-bound substances in urban snow. *Wat. Sci. Tech.*, **39**, 12: 27-32.
- Vives-Rego J., Lebaron P, Nebe-von Caron G. (2000): Current and future applications of flow cytometry in aquatic microbiology. *FEMS Microbiology Reviews*, **24**: 429-448.
- Vyas H.K., R.J. Bennett R.J., A.D. Marshall A.D. (2000): Influence of feed properties on membrane fouling in crossflow microfiltration of particulate suspensions. *International Dairy Journal*, **10**: 855-861.

- Waite T.D. (1999): Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. *Colloids Surf. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **151**: 27-41.
- Weiss, E.L., Frock, H.N. (1976): Rapid analysis of particle-size distributions by laser light scattering. *Powder Technology*, **14**: 287-293.
- Wilson R, Leschonski K, Alex W, Allen T, Koglin B, Scarlett B. (1980): *BCR (Community Bureau of Reference) Quartz Reference Standards: Certification Report on Reference Materials of Defined Particle Size*, Commission of the European Communities, Document EUR 6825 EN.
- Wiłun Z. (2001): *Zarys geotechniki*. Wydaw. Komunikacji i Łączności Warszawa.
- Wright D.L., Jr (2000): Retrieval of optical properties of atmospheric aerosols from moments of the particle size distribution. *J. Aerosol Sci.*, **31**, 1: 1-18.
- Wu R.M., Lee D.J., Waite T.D. Guan J. (2002): Multilevel structure of sludge flocs. *J. Col. Inter. Sci.*, **252**: 383-392.
- Zaidi S.H., Altunbas B.J., Azzopardi B.J. (1998): A comparative study of phase Doppler and laser diffraction techniques to investigate drop size in annular two-phase flow. *Chemical Engineering Journal*, **71**: 135-143.
- Zhang H., Hu X. (2004): Catalytic oxidation of carbon monoxide in a fixed bed reactor. *Separation and Purification Technology*, **34**, 1-3: 105-108
- Zobrist J., Müller S.R., Ammann A., Mottier V., Ochs M., Schoenenberger R., Eugster J. (2000): Quality of roof runoff for groundwater infiltration. *Wat. Res.*, **34**, 5: 1455-1462.



ISSN 0208-8029

ISBN 978-83-89475-14-6

5

Bibl. podlegna

45903

IBS PAN
Sema