

Pomiary refraktometryczne w GUM

Beata Warzywoda (Zakład Fizykochemii, GUM)

W artykule przedstawiono metody pomiaru współczynnika załamania, goniometryczną i refraktometryczną. Metoda goniometryczna jest bezwzględną metodą pomiaru i pozwala na uzyskanie najwyższych dokładności. Metoda refraktometryczna najczęściej oparta jest na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia i wykorzystywana w przyrządach zwanych refraktometrami.

Refraktometria

Refraktometria należy do optycznych metod analitycznych i wykorzystywana jest do wyznaczania współczynnika załamania światła lub wielkości funkcjonalnie z nim związanych.

Zjawisko załamania światła jest znane od dawna. W celu ujęcia zjawiska ilościowo, wprowadza się wielkość zwaną współczynnikiem załamania i oznacza literą n . Współczynnik załamania charakteryzuje właściwości optyczne określonego materiału i jest zdefiniowany poprzez prędkość fali świetlnej [1]:

$$n = \frac{c}{v_f} \quad (1)$$

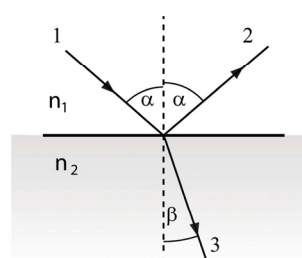
gdzie c jest prędkością fali świetlnej w próżni, a v_f prędkością fazową tej fali w badanym materiale. Inaczej można powiedzieć, że przyczyną załamania drogi promieni jest zmiana prędkości rozchodzenia się światła w ośrodkach o różnej gęstości optycznej. Współczynnik załamania światła jest wielkością charakteryzującą daną substancję. Jest to wielkość bezwymiarowa, zmienna, zależna zarówno od warunków, w których znajduje się badany ośrodek, czyli: temperatura, ciśnienie, wilgotność, jak i od długości fali padającego promieniowania λ . Przy pomiarze współczynnika załamania światła korzystamy z prawa załamania, sformułowanego przez Snelliusa. Mówi ono, że jeśli wiązka światła pada na granicę dwóch ośrodków przezroczystych o różnych współczynnikach załamania n_1 i n_2 , wówczas częściowo zostaje odbita, a częściowo przechodzi do drugiego ośrodka, ulegając załamaniu.

Zgodnie z prawem Snelliusa (rys. obok) promień padający (1), odbity (2) i załamany (3) oraz prosta prostopadła do granicy rozdziału ośrodków (linia przerywana), leżą w jednej płaszczyźnie, kąt odbicia jest równy kątowi padania, a stosunek sinusa kąta padania, a do sinusa kąta załamania β jest dla danej pary ośrodków wielkością stałą, zwaną współczynnikiem załamania [2], czyli:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} \quad (2)$$

W przypadku, kiedy promień świetlny przenika do jakiegoś ośrodka z próżni, czyli gdy $n_1 = 1$, stosunek $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ – wyraża tzw. bezwzględny współczynnik załamania światła, oznaczany czasami w literaturze symbolem N (głównie dla gazów).

Próżnię jako ośrodek odniesienia stosuje się przede wszystkim przy pomiarach współczynnika załamania światła gazów. Przy pomiarach współczynnika załamania światła cieczy i ciał stałych wyznacza się współczynnik załamania światła względem powietrza i oznacza zwykle symbolem n . Współczynnik załamania zależy od długości fali świetlnej λ padającej na granicę rozdziału powietrze – ośrodek, temperatury t , ciśnienia atmosferycznego p i wilgotności powietrza w . Zmiana temperatury badanego medium powoduje zmianę jego gęstości i w konsekwencji zmianę współczynnika załamania światła [3]. Wzrost temperatury wywołuje zmniejszenie wartości współczynnika załamania światła cieczy rzędu 10^{-4} . Dla ciał stałych występują zmiany rzędu 10^{-6} i zazwyczaj są dodatnie. Wpływ ciśnienia na wartość współczynnika załamania światła cieczy i ciał stałych jest nieznaczny ponieważ wzrost ciśnienia o jedną atmosferę powoduje zwiększenie wartości n rzędu $3 \cdot 10^{-5}$. Zależność współczynnika załamania od ciśnienia ma większe znaczenie dla ośrodków gazowych, gdzie wartość bezwzględnego współczynnika załamania gazów wyraża się równaniem:



Bieg promieni na granicy dwóch ośrodków

opr. własne

$$N - 1 = \frac{N_0 - 1}{1 + \alpha \cdot t} \cdot \frac{p}{1013,25} \quad (3)$$

gdzie:

N – bezwzględny współczynnik załamania gazu w warunkach pomiaru, przy temperaturze t i pod ciśnieniem p ,
 N_0 – bezwzględny współczynnik załamania gazu w temperaturze $t = 20$ °C, pod ciśnieniem $p = 1013,25$ hPa,
 α – temperaturowy współczynnik rozszerzalności objętościowej gazów, który przy stałym ciśnieniu w zakresie widma widzialnego wynosi $0,00037$ °C⁻¹.

Jak wspomniano wcześniej współczynnik załamania światła zależy od długości fali świetlnej λ . Zależność tę określa się jako refrakcję dyspersyjną. W zakresie dyspersji normalnej wartość współczynnika załamania światła maleje ze wzrostem długości fali, natomiast w zakresie długości fal odpowiadających absorpcji promieniowania zachodzi dyspersja anormalna i następuje wzrost jego wartości. Związek między długością fali a współczynnikiem załamania światła można przedstawić za pomocą równania Cauch’ego:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (4)$$

gdzie A i B to stałe empiryczne.

Przy pomiarach współczynnika załamania światła z dokładnością 10^{-6} należy również uwzględnić wilgotność powietrza i to szczególnie przy pomiarach w temperaturze wyższej niż pokojowa. Współczynnik załamania jako funkcja wilgotności charakteryzowany jest przez wiele formuł eksperymentalnych [4].

W warunkach laboratoryjnych do pomiaru współczynnika załamania światła cieczy, gazów i ciał stałych stosuje się następujące długości fal promieniowania monochromatycznego:

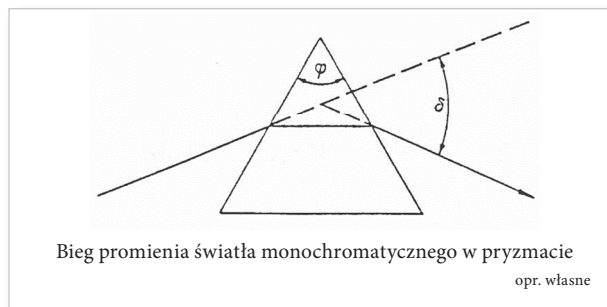
- $\lambda_F = 486,1$ nm – niebieska linia wodoru (F),
- $\lambda_e = 546,1$ nm – zielona linia rtęci (e),
- $\lambda_D = 589,3$ nm – żółte światło dubletu sodu (D),
- $\lambda_C = 656,3$ nm – czerwona linia wodoru (C).

Jako warunki odniesienia w pomiarach współczynnika załamania światła przyjmuje się temperaturę $t = 20$ °C, długość fali świetlnej $\lambda = 589,3$ nm, ciśnienie atmosferyczne $p = 1013,25 \cdot 102$ Pa, wilgotność względną $w = 50$ % [5].

Metody pomiarowe

Metoda goniometryczna

Metoda goniometryczna [4, 6, 7] jest bezwzględną metodą pomiaru współczynnika załamania światła. Zajmuje czołowe miejsce wśród innych metod, jak rów-



nież pozwala na uzyskanie najwyższych dokładności pomiaru współczynnika załamania światła (rzędu 10^{-6}). W pomiarach goniometrycznych materiałem badanym jest pryzmat ograniczony dwoma płaszczyznami tworzącymi ze sobą kąt φ zwany kątem łamiącym (rys. powyżej). Zasada biegu promieni w pryzmacie jest następująca: na pryzmat pada wiązka promieni równoległych, która po wyjściu z pryzmatu zostaje odchylona o pewien kąt δ zwany kątem minimalnego odchylenia. Kąt δ jest najmniejszy, jeżeli wewnątrz pryzmatu promień biegnie prostopadle do dwusiecznej kąta łamiącego.

Przy pomiarach współczynnika załamania światła cieczy i gazów umieszcza się je w naczyniu w kształcie pryzmatu o płasko-równoległych ścianach, które nie wnoszą dodatkowego załamania. Pomiar współczynnika załamania światła w metodzie goniometrycznej sprowadza się do wyznaczenia kąta łamiącego oraz kąta minimalnego odchylenia w pryzmacie. Współczynnik załamania światła wyznacza się z następującego wzoru:

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \phi}{2}}{\sin \frac{\phi}{2}} \quad (5)$$

gdzie:

- n – współczynnik załamania światła danej substancji,
- δ – kąt najmniejszego odchylenia w pryzmacie,
- ϕ – kąt łamiący pryzmatu.

Wykonanie pomiarów metodą goniometryczną z dokładnością rzędu 10^{-6} wymaga uwzględnienia parametrów pomiarowych, takich jak: temperatura, długość fali, ciśnienie i wilgotność względna powietrza. Ponadto ważną rolę odgrywają:

- wielkość kąta łamiącego pryzmatu (spełniona nierówność: $\frac{\phi}{2} < \frac{1}{n}$),
- niepewność wyznaczenia kąta łamiącego i najmniejszego odchylenia,
- jakość wykonania pryzmatów (tj. wklęsłość i chropowatość ścian łamiących oraz nieprostopadłość ścian łamiących do podstawy pryzmatu), odpowiednia płaskość powierzchni [1].

Państwowy wzorzec jednostki współczynnika załamania światła

Stanowisko pomiarowe do odtwarzania jednostki współczynnika załamania światła stanowi goniometr-spektrometr firmy Möller-Wedel (fot. poniżej), pryzmaty równoboczne BK7 i PTB 679 oraz dwa pryzmaty wnątko-



Stanowisko państwowego wzorca jednostki współczynnika załamania światła

fot. arch. GUM

we do pomiaru współczynnika załamania światła cieczy. Goniometr-spektrometr zapewnia możliwość wykonywania pomiarów w zakresie od $1,3 \div 1,9$ z dokładnością 10^{-6} wartości współczynnika załamania światła [8].

Budowa i opis działania Goniometru-Spektrometru II VIS-UV-IR

Podstawowymi częściami Goniometru-Spektrometru II VIS-UV-IR są:

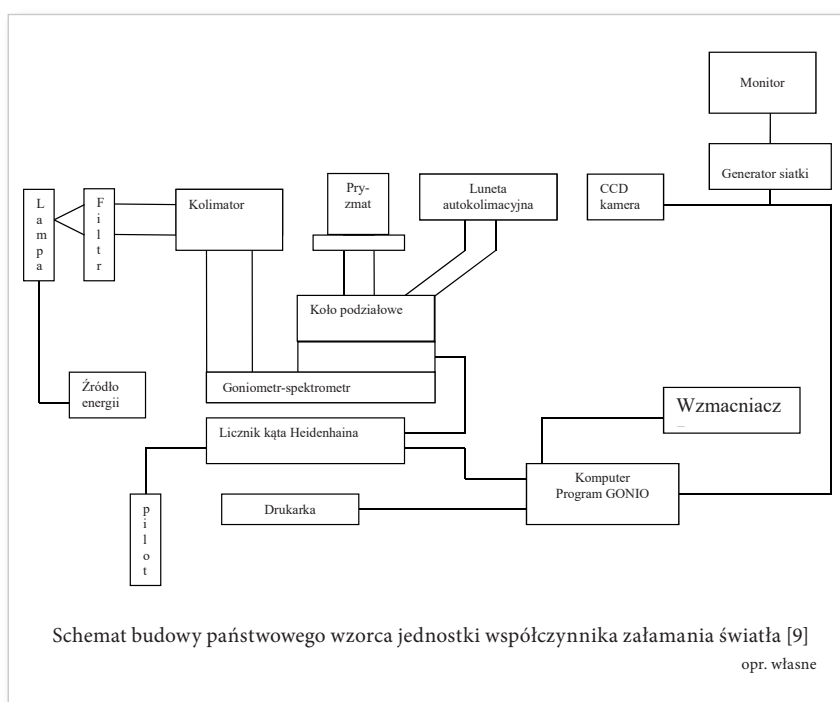
- koło podziałowe z ramieniem obrotowym i dwoma elektronicznymi głowicami umieszczonymi w pozycji 180° względem siebie (zakres koła podziałowego bez kolimatora wynosi od 0° do 360°),
- stolik pryzmatu ze śrubami justującymi służącymi do ustawienia wysokości i obrotu stolika,
- kolimator do pomiarów spektralnych w zakresie od 254 nm do 2325 nm,
- luneta autokolimacyjna,
- kamera CCD z generatorem siatki i monitorem,
- licznik kąta o rozdzielczości $0,0001^\circ$ lub $0,4''$,
- 6 lamp spektralnych w obudowie z filtrami interferencyjnymi,

z przerywaczem strumienia i przysłoną tęczątkową o zmiennej średnicy od 1,2 mm do 3,0 mm,

- komputer z oprogramowaniem do pomiarów kąta i obliczania wartości współczynnika załamania światła.

Pomiary kątów pryzmatu odbywają się na zasadzie fotoelektrycznej przy użyciu kamery CCD. Obrót ramienia koła podziałowego goniometru-spektrometru generuje sygnał elektryczny w dwóch czułych głowicach, który jest wyświetlany na ekranie licznika kąta VRZ 460. Zmierzone wartości kątów przekazywane są poprzez interfejs RS-232C do komputera. Komputer ma zainstalowane programy do pomiarów kątów i obliczania współczynników załamania światła: program „GONIO” – w zakresie UV-VIS oraz „GONIO IR” – dla zakresu bliskiej podczerwieni. Współczynniki załamania światła obliczane są dla warunków otoczenia, a następnie przeliczane przez program „GONIO” na wartości współczynników załamania dla warunków odniesienia, korzystając ze skorygowanego równania dla współczynnika załamania światła powietrza [10]. Temperatura otoczenia, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność względna powietrza oraz współczynnik temperaturowy szkła mierzonego pryzmatu lub cieczy wprowadzane są do programu komputerowego w momencie wyznaczania kąta najmniejszego odchylenia [11].

Niepewność wyznaczenia wartości współczynnika załamania światła metodą goniometryczną uzależniona jest od dokładności pomiaru goniometrycznego (niepew-



Schemat budowy państwowego wzorca jednostki współczynnika załamania światła [9]

opr. własne

ność wyznaczenia kąta łamiącego i kąta najmniejszego odchylenia w pryzmacie) oraz obróbki pryzmatu.

Niepewność rozszerzona wyznaczenia wartości współczynnika załamania światła wzorców stałych dla $k = 2$ i poziomu prawdopodobieństwa ok. 95 %, uzyskana na stanowisku państwowego wzorca jednostki współczynnika załamania światła, wynosi od $3 \cdot 10^{-6}$ do $1 \cdot 10^{-5}$.

Metoda ta stosowana jest do wyznaczania wartości współczynników załamania światła (rzędu 10^{-6}) ciał stałych w postaci pryzmatów, głównie w przemyśle optycznym, lub cieczy umieszczonych w pryzmatach wnikowych.

Metoda refraktometryczna

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia

Metoda refraktometryczna najczęściej oparta jest na wykorzystaniu zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia i wyznaczeniu współczynnika załamania światła poprzez pomiar kąta granicznego w przyrządach zwanych refraktometrami.

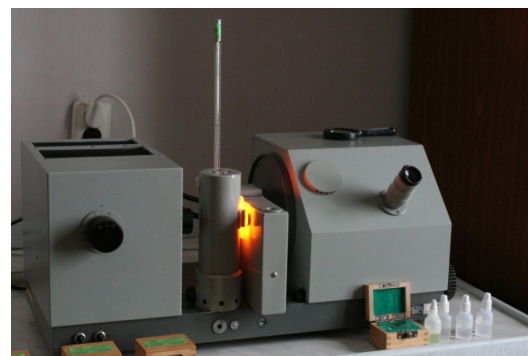
W ośrodku optycznie gęstszym (ośrodek I) promień biegnie bliżej normalnej do powierzchni niż w ośrodku optycznie rzadszym (ośrodek II). Jeżeli promień świetlny biegnący w ośrodku optycznie gęstszym pada na powierzchnię odgraniczającą ten ośrodek od drugiego ośrodka o mniejszej gęstości optycznej, pod kątem α , to promień załamany będzie większy od kąta padania α . Ze wzrostem kąta padania wzrasta kąt załamania. Przy pewnej wartości kąta padania α_{gr} kąt załamania jest równy 90° . Promienie padające powyżej kąta α_{gr} ulegają tylko odbiciu. Zjawisko to nosi nazwę całkowitego wewnętrznego odbicia [12].

W pomiarach refraktometrycznych wykorzystuje się zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia zachodzące przy przejściu promieni z ośrodka optycznie rzadszego do gęstszego. Przy kącie padania α niemal równym 90° promienie załamują się pod kątem granicznym, stanowiącym granicę między częścią oświetloną a nieoświetloną ośrodka optycznie gęstszego. Zgodnie z definicją współczyn-

nika załamania światła, znając współczynnik załamania ośrodka gęstszego, wyznacza się współczynnik ośrodka rzadszego mierząc wartość kąta granicznego.

Stanowisko pomiarowe do wzorcowania wzorców współczynnika załamania światła

Stanowisko pomiarowe do wyznaczania współczynnika załamania światła ciekłych i stałych wzorców refraktometrycznych stanowi refraktometr wizualny Pulfricha. Jest przyrządem bardzo precyzyjnym, dlatego też należy obchodzić się z nim bardzo ostrożnie. Z uwagi na swoją konstrukcję i duże gabaryty, refraktometr Pulfricha nie jest przyrządem typowo użytkowym. Obecnie jest rzadko stosowany.

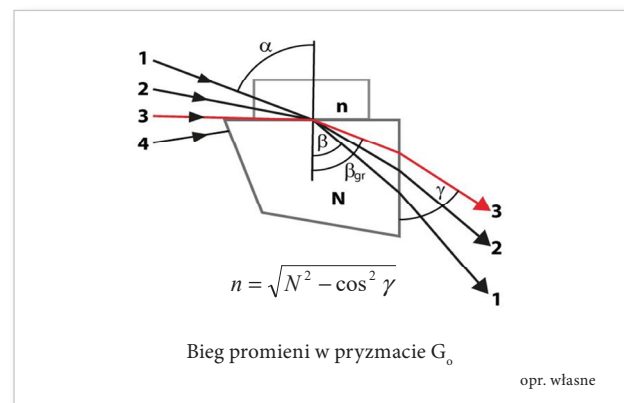
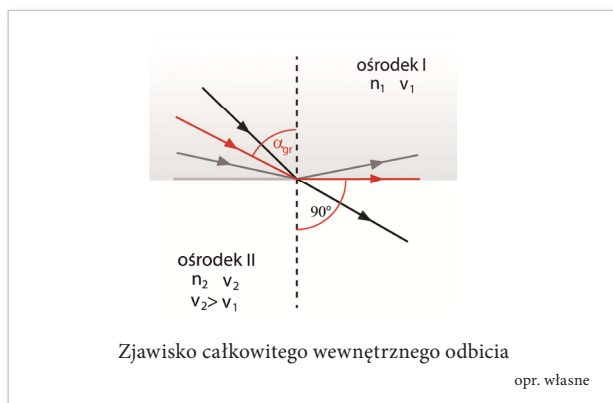


Refraktometr Pulfricha

fol. arch. GUM

Konstrukcja refraktometru Pulfricha umożliwia stosowanie różnych metod refraktometrycznych. Poprzez zastosowanie różnych pryzmatów pomiarowych (G_0 i V_0) możliwy jest pomiar kąta granicznego całkowitego wewnętrznego odbicia, jak również pomiar odchylenia promienia świetlnego.

Przy zastosowaniu pryzmatu G_0 mierzymy kąt graniczny. Bieg promieni w przypadku pryzmatu G_0 pokazuje rysunek poniżej.

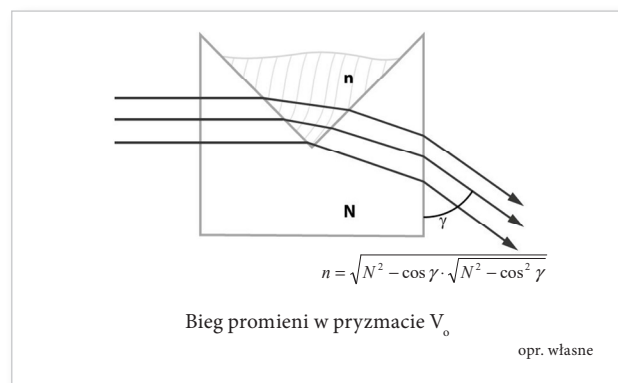


Aby zmierzyć graniczny kąt całkowitego wewnętrznego odbicia, trzeba oświetlić pryzmat sposobem dyfuzyjnym. Padające na pryzmat promienie 1, 2, 3 są załamywane w pryzmacie refraktometrycznym zgodnie z prawem Snelliusa. Promienie te załamują się po raz drugi na powierzchni wyjściowej i „wchodzą” do lunety. Dla kąta $\alpha = 90^\circ$ granicznym kątem całkowitego wewnętrznego odbicia przy wejściu do pryzmatu refraktometrycznego jest kąt $\beta = \beta_{gr}$. Kątowi temu odpowiada kąt γ wyjściowego promienia świetlnego. Ponieważ nie są możliwe większe kąty padania, więc żadne światło nie pada do przestrzeni kątowej większej od γ . Całe pole w lunecie powyżej kąta γ pozostaje ciemne, a pole poniżej kąta γ jest oświetlone. Na refraktometrze Pulfricha mierzy się kąt γ i przelicza na współczynnik załamania n według tabel sporządzonych dla konkretnego pryzmatu G_0 i odpowiednich długości fali, z wykorzystaniem wzoru przedstawionego na rysunku.

Bieg promieni w przypadku pryzmatu V_0 pokazuje rysunek poniżej. W przypadku tego pryzmatu mierzy się kąt odchylenia promienia w pryzmacie. Wychodząca z kolimatora równoległa wiązka promieniowania świetlnego pada na pryzmat V_0 , zostaje załamana na jego powierzchniach skośnych, między którymi mieści się próbka i wychodzi z pryzmatu pod kątem γ . Na refraktometrze Pulfricha odczytuje się kąt γ i przelicza na współczynnik załamania światła według tabel sporządzonych dla konkretnego pryzmatu V_0 i odpowiednich długości fal, z wykorzystaniem wzoru przedstawionego na poniższym rysunku [13]. Zakres pomiarowy współczynnika załamania światła zależy od zastosowanego pryzmatu pomiarowego i wynosi:

- 1,3 ÷ 1,74 dla pryzmatu V_0 przeznaczonego do cieczy i ciał stałych,
- 1,45 ÷ 1,65 dla pryzmatu G_0 przeznaczonego do ciał stałych.

Rozdzielczość skali kątowej refraktometru wynosi 0,1', co odpowiada 0,00001 wartości współczynnika za-



łamania światła. Refraktometr typu Pulfricha posiada lampy spektralne He, Hg i H, które pozwalają na pomiary spektralne w zakresie (435,8 ÷ 656,3) nm. Standardowo pomiary przeprowadzane są w świetle lampy sodowej o długości fali $\lambda = 589,3$ nm. Niepewność rozszerzona wyznaczania wartości współczynników załamania światła wzorców refraktometrycznych dla $k = 2$ i poziomu ufności ok. 95 % wynosi $2 \cdot 10^{-5} \leq U \leq 1 \cdot 10^{-4}$ [14].

Rodzaje refraktometrów

Refraktometr, w zależności od sposobu odczytu wyników pomiaru, może być skonstruowany jako: wizualny typu analogowego lub cyfrowego oraz fotoelektryczny.

Refraktometry z wizualnym odczytem wyniku pomiaru składają się w szczególności z następujących elementów:

- 1) pryzmatu lub kuwety pomiarowej,
- 2) układu soczewek skupiających,
- 3) lunety z podziałką i okulem lub wyświetlacza cyfrowego,
- 4) urządzenia regulacyjnego pozwalającego na sprawdzenie i ustawienie zera lub innego punktu podziałki [15].

Refraktometry wizualne zostały zróżnicowane ze względu na konstrukcję układu optycznego, rodzaj źródła światła i wielkość współczynnika załamania pryzmatu pomiarowego. Wśród nich wyróżniamy refraktometry typu Pulfricha, Abbego, ręczne – lunetowe. Służą do wyznaczania współczynnika załamania światła cieczy i ciał stałych.

Refraktometry fotoelektryczne składają się z następujących elementów:

- 1) monochromatycznego źródła światła o długości fali $\lambda = 589,3$ nm,
- 2) układu soczewek skupiających,
- 3) pryzmatu pomiarowego,
- 4) detektora fotoelektrycznego,
- 5) przetwornika analogowo-cyfrowego,
- 6) układu zerowania,
- 7) układu wyjściowego z wyświetlaczem cyfrowym [15].

Refraktometry fotoelektryczne wykorzystywane są do wyznaczania współczynnika załamania światła cieczy.

W refraktometrach wyposażonych w dwie skale pomiarowe drugą wielkością mierzoną jest zawartość substancji stałych wyrażona ułamkiem masowym % (tzw. skala Brix), zależna wprost proporcjonalnie od n w zakresie badanych stężeń. Zakres pomiarowy wzorcowanych refraktometrów wynosi od 1,33 do 1,70 współczynnika załamania światła, któremu w obszarze od 1,33 do 1,50 odpowiada zakres (0 ÷ 85) % ułamka masowego

zawartości sacharozy w roztworach wodnych (zgodnie z danymi 17 Sesji ICUMSA) [16].

Wzorce refraktometryczne

Wzorce refraktometryczne odtwarzają wartość współczynnika załamania światła n z określoną niepewnością w warunkach odniesienia, w okresie ważności wzorca. Wzorce służą do wzorcowania refraktometrów wizualnych i fotoelektrycznych w zakresie pomiarowym od 1,30 do 1,70. Wyróżniamy stałe i ciekłe wzorce refraktometryczne. Wzorce stałe to szklane pryzmaty i szklane płytki płaskorównoległe, a wzorce ciekłe to woda dwukrotnie destylowana, ciecz organiczne oraz roztwory, wodne glukozy stabilizowanej kwasem winowym.

Spójność pomiarowa

Spójność pomiarowa w Laboratorium Kąta w dziedzinie refraktometrii zachowana jest przez przekazywanie jednostki współczynnika załamania światła od państwowego wzorca pomiarowego (państwowy wzorzec jednostki współczynnika załamania światła) poprzez wzorce odniesienia do wzorców roboczych, wykorzystywanych do wzorcowań przyrządów pomiarowych klientów.

Główną rolą państwowego wzorca jednostki współczynnika załamania światła jest porównanie wyników uzyskiwanych na tym stanowisku z wynikami otrzymanymi na stanowiskach innych państw. Do porównań służą pryzmaty wzorcowe 679 PTB 97 i pryzmat równoboczny umownie oznaczony jako BK7. Przekazywanie jednostki współczynnika załamania światła od wzorca państwowego do przyrządów klientów realizowane jest za pomocą kompletu stałych wzorców refraktometrycznych (pryzmatów), których wartości współczynnika załamania światła wyznaczono na stanowisku wzorca państwowego w GUM oraz na stanowiskach w PTB i SMU. Ten komplet wzorców służy do wzorcowania refraktometru Pulfricha, stanowiącego wzorzec roboczy. Następnie, za pomocą wzorców refraktometrycznych (ciekłych i stałych), których wartości n wyznaczone są poprzez zastosowanie refraktometru Pulfricha, wzorcowane są przyrządy pomiarowe klientów. Również poprzez zastosowanie refraktometru Pulfricha wyznaczane są wartości współczynnika załamania światła stałych i ciekłych wzorców refraktometrycznych, zgłaszanych przez klientów.

Podsumowanie

Metoda refraktometryczna pomiaru współczynnika załamania światła, znana od ponad stu lat, nie straciła znaczenia do dnia dzisiejszego, pomimo rozwoju w ostatnim czasie wielu nowoczesnych fizycznych i fizykochemicznych metod pomiaru. Zawdzięcza to takim swoim zaletom jak prostota pomiaru, jego krótkotrwałość, małe ilości substancji badanej, możliwość automatyzacji pomiarów oraz wysoka dokładność uzyskiwanych wyników. W oparciu o pomiar współczynnika załamania światła można identyfikować związki chemiczne, ustalać ich budowę, skład mieszanin, badać reakcje chemiczne w układach złożonych, np. reakcje kompleksowania czy dysocjacji. W przemyśle metoda refraktometryczna jest stosowana głównie do sterowania procesami produkcyjnymi i do określania stężeń składników w wielu produktach w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym czy maszynowym.

Literatura

- [1] Mendoń E., Warzec K.: *Państwowy wzorzec jednostki współczynnika załamania światła*, GUM, Warszawa, 2009.
- [2] Szyszko E.: *Instrumentalne metody analityczne*, PZWL, Warszawa, 1982.
- [3] Tilton W. L.: *Standard conditions for precise prism refractometry*, J. Res. Nat. Bur. Of Standard, t. 14, 1935.
- [4] Tarasiuk M.: *Refraktometryczne wzorce miar*. Opracowanie wewnętrzne CUJiM Nr 77/66, Warszawa, 1969.
- [5] Edlen B.: *The refractive index of air*, Metrologia, 1966.
- [6] Werner A. J.: *Methods in high precision refractometry of optical glasses*, Applied Optics, t. 7, 1968.
- [7] Tentori D., Lerma J. R.: *Refractometry by minimum deviation accuracy analysis*, Optical Engineering, t. 29, 1990.
- [8] *Stanowisko pomiarowe do odtwarzania jednostki współczynnika załamania światła*, nr syst. DG19-L.DM, 2008.
- [9] Patej K.: *Państwowy wzorzec jednostki współczynnika załamania światła*, prezentacja, Warszawa, 2007.
- [10] Birch K. P., Downs M. J.: *An updated Edlen equation for the refractive index of air*, Metrologia, 30, 1993.
- [11] *Wzorcowanie stałych i ciekłych wzorców refraktometrycznych metodą goniometryczną*, nr syst. IW30-L.DM, 2008.
- [12] Bobrowski Cz.: *Fizyka – krótki kurs*, WNT, Warszawa, 1995.
- [13] *Refraktometr Pulfricha typu PR2 – instrukcja użytkownika*, M(p)G 7-071-76 600 IV 1 18 365.
- [14] *Wzorcowanie refraktometrów Pulfricha i wzorców współczynnika załamania światła*, nr syst. IW31-L.DM.
- [15] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 26 marca 2003 r. w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać refraktometry, Dz. U. z 2003 r. Nr 67 poz. 625.
- [16] *Wzorcowanie refraktometrów wizualnych i fotoelektrycznych*, nr syst. IW32-L.DM.