

Wilgotność powietrza i gazów

Pomiary i wzorcowanie

Krzysztof Flakiewicz

Główny Urząd Miar – Zakład Fizykochemii

W pracy przedstawiono zarys dziedziny zajmującej się pomiarami wilgotności powietrza i gazów. Dokonano przeglądu zjawisk fizycznych i pojęć stosowanych do opisu wilgotności gazów, zgodnie z aktualnym stanem wiedzy i współczesną praktyką pomiarową. Omówiono różne metody generowania jednostek miary wilgotności, a mianowicie temperatury punktu rosy i wilgotności względnej. Przedstawiono schematycznie budowę i zasadę działania podstawowych wzorców odniesienia (generatorów temperatury punktu rosy oraz wzorca odniesienia wilgotności względnej) opracowanych i stosowanych w Laboratorium Wilgotności GUM. Omówiono metody wzorcowania (przekazywania jednostki wilgotności do wzorców roboczych i przyrządów użytkowych) oraz sposób przedstawiania wyników wzorcowania. Przedyskutowano właściwości metrologiczne różnych typów przyrządów oraz ich przydatność do pomiarów wilgotności w różnych warunkach i zakresach pomiarowych. Podano możliwości pomiarowe Laboratorium Wilgotności GUM z uwzględnieniem udziału Laboratorium w międzynarodowych porównaniach wzorców wilgotności, których wyniki stanowią podstawowe kryterium potwierdzające kompetencje pomiarowe Laboratorium.

Słowa kluczowe: Wilgotność; pomiar wilgotności; wzorce wilgotności; generator wilgotności; temperatura punktu rosy; wilgotność względna; wzorcowanie; spójność pomiarowa.

Humidity of air and gases Measurements and calibration

This paper outlines the subject of measurement of humidity of air and gases. Physical phenomena associated with humidity and the quantities used for description of humidity are briefly reviewed from the viewpoint of the contemporary state of knowledge and the practical aspects of measurements in this area. Different methods of generation of humidity standards are discussed: the method of the dew-point temperature and the relative humidity approach. The principles of operation and design of the primary reference standards (the dew-point generators and the relative humidity standard), which were designed, constructed and are in use in the Humidity Laboratory of the Central Office of Measures (GUM) are briefly discussed. Different methods of calibration are described and the transfer of the unit of humidity to working standards and measuring instruments is discussed. The method of presentation of calibration results is discussed. Evaluation of metrological properties of different measuring instruments is given and their application in different conditions and measuring ranges is discussed. The measurement capability of the Humidity Laboratory is given; it has been confirmed by participation in international comparisons of humidity standards, which confirmed the competence of the Laboratory.

Key words: Humidity; measurement of humidity; humidity standards; humidity generator; dew-point temperature; relative humidity; calibration; traceability.

1. Wstęp

Wilgotność jest pojęciem opisującym zjawisko występowania wody w różnych postaciach w otaczającym nas środowisku. Woda może występować w postaci czystej, w mieszaninie z ciałami stałymi i cieczami, jako składnik roztworów oraz mieszanin parowo-gazowych. Najczęściej spotykaną naturalną mieszaniną parowo-gazową jest oczywiście powietrze. Woda jest wszechobecnym i bardzo aktywnym czynnikiem wpływającym w zasadniczy sposób na stan środowiska naturalnego, na przebieg procesów fizykoche-

micznych w przyrodzie, procesów technologicznych w przemyśle oraz na właściwości substancji naturalnych i produktów przemysłowych.

W celu opisanie tych procesów, konieczne było zdefiniowanie odpowiednich wielkości fizycznych, które w sposób jednoznaczny, ścisły, a jednocześnie funkcjonalny określają ilość wody zawartej w rozmaitych postaciach w fazie czystej i w mieszaninie z innymi mediami, a w szczególności w środowisku naturalnym. Jednocześnie bardzo istotna jest przydatność tak zdefiniowanych wielkości do stosowania w warunkach praktycznych, tak aby można było dokonywać pomiarów wilgotności bez konieczności stosowania złożonych procedur laboratoryjnych.

2. Gaz, para, stan nasycenia

Zarówno powyżej temperatury krytycznej (około 374 °C), jak i w stanie nienasyconym, para wodna zachowuje się jak gaz i jest dobrze opisywana równaniem stanu gazu doskonałego. Po sprężeniu pary do stanu nasycenia może zachodzić jej skraplanie. W tym stanie ciśnienie cząstkowe pary osiąga wartość maksymalną w danej temperaturze; podczas dalszego sprężania nadmiar pary wykrapla się w objętości w postaci mgły lub na elementach stałych jako rosa. Ciśnienie cząstkowe pary pozostaje stałe w miarę sprężania w procesie izotermicznym, choć jest zależne od temperatury oraz, w mniejszym stopniu, od ciśnienia całkowitego. W wyniku kondensacji lub parowania w stanie nasyconym, zmieniają się proporcje masowe pomiędzy poszczególnymi fazami.

W obliczeniach higrometrycznych zasadnicze znaczenie ma zależność ciśnienia nasyconej pary wodnej od temperatury w fazie czystej, nad płaską powierzchnią wody (p_{ws}) lub lodu (p_{is}). Gdy temperatura T jest wyrażona w kelwinach (wg skali temperatur ITS 90), a obliczane ciśnienia cząstkowe są wyrażone w paskalach, zależność ta dla wody ma następującą postać [1]

$$\ln [p_{ws}(T)] = -6096,9385 \cdot T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \cdot \ln T, \quad (1)$$

a dla lodu

$$\ln [p_{is}(T)] = -6024,5282 \cdot T^{-1} + 29,32707 + 1,0613868 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,3198825 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,49382577 \cdot \ln T. \quad (2)$$

Niepewności rozszerzone, związane z obliczeniami wykonywanymi za pomocą tych równań, są szacowane przy prawdopodobieństwie 0,95 na poniżej 0,01 % wartości obliczonej dla wody w przedziale temperatur (0 ÷ 100) °C; poniżej 0,6 % wartości obliczonej dla wody przechłodzonej w przedziale (-50 ÷ 0) °C; oraz poniżej 1,0 % wartości obliczonej dla lodu w przedziale (-100 ÷ 0) °C [2]. W praktyce można spotkać się ze stosowaniem innych równań [3], które dają bardzo zbliżone wyniki obliczeń.

Jeżeli para wodna występuje w mieszaninie z innymi gazami, to w stanie nasycenia ilość pary wodnej jest większa niż w przypadku fazy czystej. Wzrost ilości pary wodnej w mieszaninie w stanie nasycenia, w stosunku do przypadku fazy czystej, zależy od temperatury, ciśnienia całkowitego oraz rodzaju gazów i jest opisywany przez tzw. współczynnik zwiększenia (*enhancement factor*) $f_i(p, T)$, który w literaturze polskiej jest też określany jako lotność pary wodnej [4].

3. Wielkości stosowane do określania wilgotności

Wilgotność bezwzględna lub wilgotność absolutna (*absolute humidity*), $d = m_v / V$, określa stosunek masy pary wodnej m_v do zajmowanej przez nią objętości V (gęstość pary wodnej). Jest to wielkość prosta pojęciowo, ale trudna do wykorzystania w praktyce pomiarowej.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej, p_v , jest to ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej w stanie nienasyconym lub nasyconym.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej, p_{vs} , oznacza ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej w stanie nasycenia.

Temperatura punktu rosy (*dew-point temperature*), T_{dp} , jest to temperatura, do której należy schłodzić izobarycznie parę wodną (lub mieszaninę parowo-gazową), aby osiągnęła ona stan nasycenia.

Wilgotność względna oznaczana jest najczęściej symbolem RH (*relative humidity*) i określa ona w procentach stosunek masy pary wodnej zawartej w danej objętości badanego powietrza w znanej temperaturze, do maksymalnej zawartości pary wodnej w powietrzu o tej samej objętości i temperaturze (tzn. do zawartości pary wodnej w stanie nasycenia). Wilgotność względną $RH(T, p)$ najwygodniej jest wyrazić poprzez stosunek ciśnień cząstkowych pary wodnej:

$$RH(T, p) = \frac{p_v(T)}{f(T, p) \cdot p_{vs}(T)} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

gdzie $RH(T, p)$ – wilgotność względna w temperaturze T , przy ciśnieniu całkowitym powietrza p ; $p_v(T)$ – aktualne ciśnienie cząstkowe pary wodnej w temperaturze T ; $p_{vs}(T)$ – ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze T ; $f(T, p)$ – współczynnik zwiększenia dla nasyconej pary wodnej w powietrzu o temperaturze T i ciśnieniu całkowitym p .

Takie wielkości jak wilgotność bezwzględna, ciśnienie cząstkowe pary wodnej, temperatura punktu rosy oraz wilgotność względna mogą być określane dla pary wodnej występującej zarówno w fazie czystej jak i w mieszaninie parowo-gazowej. Istnieją też wielkości, które z definicji mogą być zastosowane wyłącznie do określania wilgotności mieszanin parowo-gazowych (np. powietrza). Do wielkości tego rodzaju należy zawartość wilgoci, $x = m_v / m_a$, zwana też stosunkiem zmieszania (*mixing ratio*), określająca stosunek masy pary wodnej m_v zawartej w danej objętości powietrza do masy pozostałych (tzw. „suchych”) składników powietrza, m_a . Innym ważnym pojęciem jest zawartość wilgoci (udział pary wodnej) w mieszaninie z powietrzem lub innymi gazami; wielkość ta, zwłaszcza w zakresie niższych wilgotności, jest często wyrażana w jednostkach ppm (*parts per million*). Jednostki ppm wyrażają stosunek objętości cząstkowej zajmowanej przez parę wodną do 10^{-6} objętości cząstkowej zajmowanej przez suchą składową mieszaniny parowo-gazowej, czyli liczbę cząsteczek wody na milion pozostałych cząsteczek mieszaniny parowo-gazowej. Jednostki ppm można również używać do wyrażania stosunku masy pary wodnej w próbce do 10^{-6} masy suchej składowej tej próbki. Dla bardzo suchych gazów stosowane są też jednostki ppb (*parts per billion*, z charakterystycznym czynnikiem 10^{-9} zamiast 10^{-6}). Jednostki te nie są wymienione w rozporządzeniu [5], ale są stosowane w niektórych przyrządach.

Zauważmy, że pewne wielkości, takie jak np. wilgotność bezwzględna, temperatura punktu rosy czy ciśnienie cząstkowe, mają charakter bezwzględny, tzn. podanie wartości tej

wielkości jednoznacznie ją określa. Natomiast inne wielkości, takie jak wilgotność względna czy zawartość wilgoci, są określane odpowiednio względem stanu nasycenia lub ilości innych składników mieszaniny i pełniejsze określenie stanu układu wymaga podania dodatkowych informacji.

4. Metody pomiarowe

Nie wszystkie wymienione wyżej wielkości dają się łatwo i dokładnie zmierzyć. Takie wielkości jak wilgotność bezwzględna i zawartość wilgoci wymagają złożonych procedur laboratoryjnych w celu oddzielenia i zważenia pary wodnej z danej próbki lub oddzielenia i zważenia suchej części mieszaniny parowo-gazowej. Jeszcze pod koniec ubiegłego wieku stosowano takie procedury przy budowie wzorcowych instalacji grawimetrycznych [6, 7, 8, 9]. Z pomiarem ciśnienia cząstkowego są podobne problemy – pomiar jest prosty jedynie w przypadku czystej pary wodnej (ponieważ ciśnienie cząstkowe jest wówczas równe ciśnieniu całkowitemu), ale w przypadku mieszaniny pary wodnej z innymi gazami również pojawia się problem rozdzielania składników. O ile w pomiarach rutynowych ciśnienie cząstkowe nie znalazło większego zastosowania, o tyle w obliczeniach higrometrycznych znajomość ciśnienia cząstkowego pary wodnej nasyconej odgrywa kluczową rolę [1].

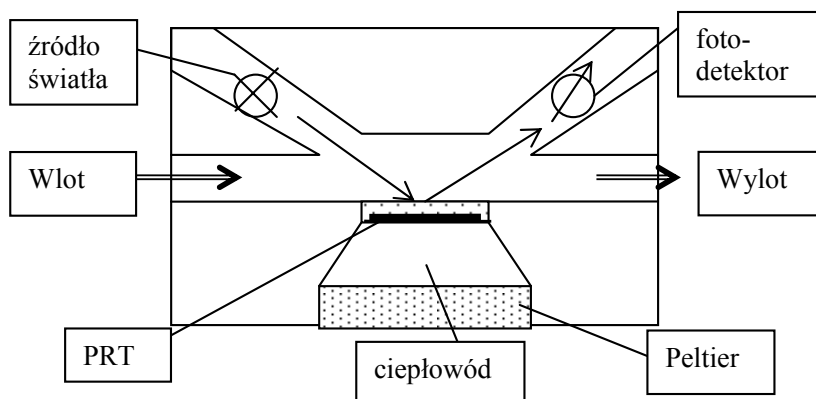
Postęp technologii półprzewodników i elektroniki umożliwił w latach dziewięćdziesiątych budowę na tyle dokładnych i funkcjonalnych higrometrów punktu rosy, że racjonalne stało się oparcie spójności pomiarowej o pomiary temperatury punktu rosy i temperatury powietrza lub innych mieszanin parowo-gazowych. W tym celu opracowano metody wzorcowania i zbudowano liczne stanowiska wzorcowe temperatury punktu rosy; prace takie zostały wykonane również w GUM [10, 11]. Znalazło to odzwierciedlenie w zorganizowaniu przez BIPM, EURAMET i inne regionalne organizacje metrologiczne porównań kluczowych i uzupełniających wzorców temperatury punktu rosy, w których GUM uczestniczy z dużym powodzeniem. W rezultacie możliwe jest powiązanie pomiarów higrometrycznych z dobrze określonym wzorcem temperatury punktu rosy i zagwarantowanie w ten sposób możliwości wykazania się spójnością pomiarową.

W praktyce przemysłowej i laboratoryjnej najczęściej wykonywane są pomiary wilgotności względnej i temperatury punktu rosy. W powiązaniu z równocześnie prowadzonymi pomiarami temperatury i ciśnienia, możliwe są wyliczenia również innych wielkości, których bezpośredni pomiar lub obliczenie byłoby bardzo kłopotliwe, trudne lub wręcz niemożliwe.

4.1 Pomiar temperatury punktu rosy

Temperatura punktu rosy pełni wiodącą rolę w higrometrii. Podstawowa, bezpośrednia metoda pomiaru tej wielkości polega na tym, że pewien obiekt fizyczny (lustro, kryształ kwarcu lub czujnik cienkowarstwowy) jest chłodzony do temperatury, w której pojawia się na nim rosa (lub szron w temperaturach ujemnych). Fakt ten jest rejestrowany optycznie przez pomiar odbicia lub rozproszenia światła na chłodzonym obiekcie. Stosuje się również inne metody, np. pomiar zmiany impedancji obiektu, spowodowanej pojawieniem się rosy lub detekcję skokowej zmiany powierzchniowych drgań akustycznych w punkcie rosy (metoda SAW). Chłodzenie obiektu jest zwykle realizowane za pomocą elementu Peltiera,

a temperatura jest mierzona za pomocą miniaturowego czujnika. Przykład głowicy pomiarowej z chłodzonym lustrem, stosowanej do pomiaru temperatury punktu rosy jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat głowicy pomiarowej urządzenia z chłodzonym lustrem do pomiaru temperatury punktu rosy.

Zasada działania takiego urządzenia jest następująca. Przez czujnik przepływa strumień powietrza, którego wilgotność ma być zmierzona. Na lustro, którego wysokiej jakości powłoka galwaniczna jest często wykonana z metalu szlachetnego (platyna, rod), pada wiązka światła z odpowiednio umieszczonego źródła. Czyste lustro dobrze odbija i słabo rozprasza wiązkę padającego światła; po schłodzeniu lustra do temperatury, w której pojawia się na nim rosa (tzn. do temperatury punktu rosy), następuje skokowe zmniejszenie natężenia wiązki światła odbitego, ponieważ rośnie rozproszenie światła w punkcie odbicia. Zmiany intensywności światła odbitego są rejestrowane przez odpowiednio umieszczony fotodetektor, zaś czujnik temperatury, np. platynowy termometr rezystancyjny (*platinum resistance thermometer*, PRT) mierzy temperaturę graniczną lustra, przy której pojawia się (lub zanika) rosa.

Elektroniczny układ pomiarowo-zasilający urządzenia pomiarowego jest sterowany przez system komputerowy kierujący jego pracą, co umożliwia pomiary temperatury punktu rosy z bardzo małą niepewnością. Jak każdy przyrząd elektroniczny o bardzo dobrej rozdzielczości, powtarzalności, odtwarzalności i stabilności w czasie, wymaga on jeszcze dokładnego wzorcowania, do czego służą wzorce budowane w GUM. W przypadku higrometrów punktu rosy z chłodzonym lustrem, istnieją jeszcze dodatkowe problemy, związane z jednoznacznością interpretacji wyników. Otóż w niezbyt niskich temperaturach, a w praktyce w przedziale $(-50 \div 0)^\circ\text{C}$, na lustrze mogą pojawiać się różne fazy skondensowane, takie jak szron, rosa lub układ wielofazowy. Dlatego, aby uzyskać jednoznaczny wynik pomiaru, konieczne jest odpowiednie doświadczenie w takich pomiarach.

W praktyce stosuje się również higrometry punktu rosy wykorzystujące zjawisko sorpcji pary wodnej na różnych strukturach (tlenki glinu, ceramika). Wykorzystywane są one głównie w pomiarach przemysłowych, gdyż pomiar za pomocą urządzeń tego typu jest względnie szybki; wadą tej metody jest to, iż ma ona charakter pośredni, zaś przyrząd jest bardzo wrażliwy na zanieczyszczenia i wymaga znacznie częstszego wzorcowania.

4.2 Pomiar wilgotności względnej

Jest to najczęściej wykonywany pomiar wilgotności powietrza i jest obok temperatury i ciśnienia trzecim istotnym parametrem, służącym do określania warunków środowiskowych. Poniżej omówione są trzy metody pomiarowe stosowane do pomiaru wilgotności względnej.

4.2.1 Metoda odniesienia (wzorcowa)

Metoda ta polega na jednoczesnym pomiarze temperatury punktu rosy, T_{dp} , i temperatury pary wodnej, T , w powietrzu lub innej mieszaninie parowo-gazowej. Wilgotność względna odniesienia RH wyliczana jest z zależności

$$RH = \frac{P_s(T_{dp})}{P_s(T)} \cdot 100 \% , \quad (4)$$

gdzie $P_s(T_{dp})$ oznacza ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej w temperaturze T_{dp} , mierzonej przez wzorcowy higrometr punktu rosy, zaś $P_s(T)$ jest to ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej w temperaturze T , mierzonej przez termometr wzorcowy.

4.2.2 Metoda psychrometryczna

Metoda psychrometryczna polega na jednoczesnym pomiarze temperatury termometru suchego, T_s , i wilgotnego, T_w , w przepływającym powietrzu. Termometr suchy mierzy wówczas temperaturę powietrza, a termometr mokry oziębia się aż do ustalenia się pewnej różnicy temperatur, zwanej różnicą psychrometryczną, która zależy głównie od wilgotności powietrza. Wilgotność względna RH może być wyliczona ze wzoru psychrometrycznego

$$RH = \left(1 - \frac{A \cdot P \cdot (T_s - T_w)}{P_{vs}(T_s)} \right) \cdot 100 \% , \quad (5)$$

gdzie A – stała psychrometryczna, której wartość dla psychrometru aspiracyjnego (z wymuszonym przepływem powietrza) zawiera się w przybliżeniu w granicach $(6,4 \div 6,8) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; P – ciśnienie atmosferyczne; $P_{vs}(T_s)$ – ciśnienie pary nasyconej w temperaturze T_s .

Metodę tę stosuje się w zasadzie w temperaturach dodatnich, aczkolwiek może być ona zastosowana, z pewnymi ograniczeniami, również w temperaturach ujemnych. Metoda psychrometryczna ma istotne zalety w przypadku długotrwałych pomiarów wysokich wilgotności względnych ($RH > 90 \%$), gdy metody sorpcyjne w tych warunkach są obciążone problemem kumulacji wody, czyli tzw. „nasiąkaniem” czujników.

4.2.3 Metoda sorpcyjna

W tej metodzie wykorzystuje się zmianę właściwości elektrycznych lub mechanicznych różnych materiałów (głównie organicznych) o konsystencji stałej, wraz ze zmianą ich wilgotności, która zależy z kolei od wilgotności środowiska, w którym są one umieszczone. Dawniej dominowały higrometry mechaniczne (włosowe, membranowe), ale rozwój elektroniki oraz technologii i inżynierii materiałowej umożliwił opracowanie i produkcję tanich cienkowarstwowych impedancyjnych czujników wilgotności względnej, pojemnościowych i rezystancyjnych. Aktywnym elementem czujnika pojemnościowego jest warstwa higo-

skopijnego dielektryka w kondensatorze, zaś czujnik rezystancyjny zawiera higroskopijny materiał przewodzący. Pojemność lub (odpowiednio) rezystancja takich czujników jest skorelowana z wilgotnością otaczającego powietrza wskutek sorpcji i desorpcji cząsteczek pary wodnej w jego warstwie higroskopijnej, która ma porowatą strukturę, umożliwiającą wnikanie cząsteczek wody.

Najbardziej rozpowszechnione cienkowarstwowe czujniki pojemnościowe mają postać cienkiego kondensatora, w którym elementem czułym na wilgoć jest warstwa dielektryka (najczęściej poliamidu). Jedna z elektrod jest tak cienka, że para wodna z łatwością przez nią przenika i jest sorbowana w dielektryku. Pojemność elektryczna takiego czujnika wynosi przeważnie około kilkuset pikofaradów i pod wpływem wilgotności może zmieniać się w granicach około (20 ÷ 30) %. Czujniki pojemnościowe wymagają indywidualnej kalibracji, powtarzanej okresowo ze względu na procesy starzenia materiału i wpływ zanieczyszczeń kumulujących się podczas dłuższej eksploatacji, szczególnie w środowisku o wysokim stopniu zanieczyszczenia, co objawia się zawyżaniem wskazań przyrządu, zwłaszcza przy wyższych wilgotnościach.

Charakter sorpcji decyduje o właściwościach czujników. Ponieważ sorpcja jest procesem o zróżnicowanej naturze fizykochemicznej i wykazuje wyraźną histerezę, to przyrządy z czujnikami sorpcyjnymi wykazują również podobne właściwości (histerezę wskazań). Z praktyki pomiarowej wynika, iż istotną właściwością czujników sorpcyjnych jest zależność charakterystyki od historii pomiarów, która przejawia się szczególnie wyraźnie wówczas, gdy pomiary obejmują zakres wyższych wilgotności, a zwłaszcza powyżej 90 % RH. Bardzo istotny jest również czas trwania pomiarów w wysokiej wilgotności, gdyż przy dłuższym kontakcie ze środowiskiem o dużej wilgotności następuje „nasiąkanie” czujnika, wskutek czego jego wskazania długo nie mogą ustabilizować się i płyną w kierunku rosnących wilgotności. Zjawisko to można w przybliżeniu wytłumaczyć zmianą charakteru sorpcji z powierzchniowej (na powierzchniach porowatej struktury tworzywa) na objętościową (wypełnianie porów w całej objętości). Taki „nasączony” czujnik potrzebuje dłuższego czasu na oddanie zgromadzonej wody i jego wskazania są długo zawyżone – może to być kwestia kilku godzin, a nawet paru dni.

5. Metody wzorcowania i generatory

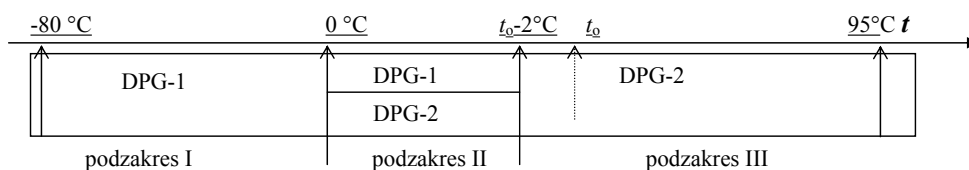
Pomiary temperatury i wilgotności są ze sobą silnie powiązane i w praktyce są wykonywane jednocześnie. W celu wywzorcowania przyrządu do pomiaru wilgotności trzeba wytworzyć powietrze (lub odpowiednią mieszaninę parowo-gazową) o określonej temperaturze, wilgotności i ciśnieniu. Do tego celu służą urządzenia zwane generatorami. Ze względu na zasadę działania i przeznaczenie można wyróżnić następujące typy generatorów:

- Generatory temperatury punktu rosy, stosowane w Laboratorium Wilgotności GUM jako wzorce podstawowe (odniesienia) jednostki miary wilgotności powietrza. Są one przeznaczone do wzorcowania wzorcowych higrometrów punktu rosy, zarówno własnych, jak i stosowanych przez akredytowane laboratoria wzorcujące;
- Generatory dwustrumieniowe (z mieszaniem strumieni suchego i wilgotnego gazu), które stosuje się do wzorcowania użytkowych higrometrów punktu rosy metodą porównania wskazań z higrometrem wzorcowym;
- Generatory dwuciśnieniowe, które są stosowane jako wzorce wilgotności względnej;

- Generatory dwutemperaturowe, które są również stosowane jako wzorce wilgotności względnej;
- Komory klimatyczne, w których – najogólniej mówiąc – realizowane są funkcje grzania i chłodzenia oraz suszenia i nawilżania.
Budowę i działanie niektórych rodzajów generatorów warto omówić bardziej szczegółowo.

5.1 Generatory temperatury punktu rosy

Urządzenia takie służą do wytwarzania strumienia powietrza o dokładnie określonej temperaturze punktu rosy. Zasadniczym elementem generatora tego typu jest precyzyjnie termostatyzowany saturator (nawilżacz), w którym strumień powietrza jest nawilżany parą wodną do stanu nasycenia w znanej temperaturze odniesienia, T_{ref} , która w tych warunkach odpowiada temperaturze punktu rosy, T_{dp} . Tak nawilżony strumień powietrza przesyłany jest dalej, do wzorcowanego higrometru punktu rosy. Temperatura toru przesyłu powietrza nie może być niższa od temperatury punktu rosy strumienia, gdyż wówczas pojawiłyby się w przewodzie wykroplenia, zmieniające w sposób niekontrolowany wilgotność przesyłanego powietrza. Dlatego też, dla temperatur punktu rosy bliskich lub wyższych od temperatury otoczenia, t_o , tor przepływu strumienia powietrza (przewody, złącza, głowica pomiarowa), na odcinku od saturatora do miejsca detekcji w higrometrze, musi być podgrzewany do temperatury wyższej o przynajmniej $(2 \div 10) ^\circ\text{C}$ od mierzonej temperatury T_{dp} . Po dokonaniu pomiaru, strumień powietrza można oziębic i nadmiar pary wodnej skroplic w specjalnym osadniku, aby uniknąć niepożądanego kondensacji pary wodnej w pomocniczych urządzeniach higrometru, takich jak pompka czy przepływomierz. W Laboratorium Wilgotności GUM zostały zaprojektowane i wykonane dwie wersje generatorów temperatury punktu rosy, DPG-1 i DPG-2, których obsługa jest opisana w instrukcji wzorcowania [12], a zakresy pomiarowe są pokazane na rys. 2. Budowę i działanie obu tych generatorów omówiono poniżej.

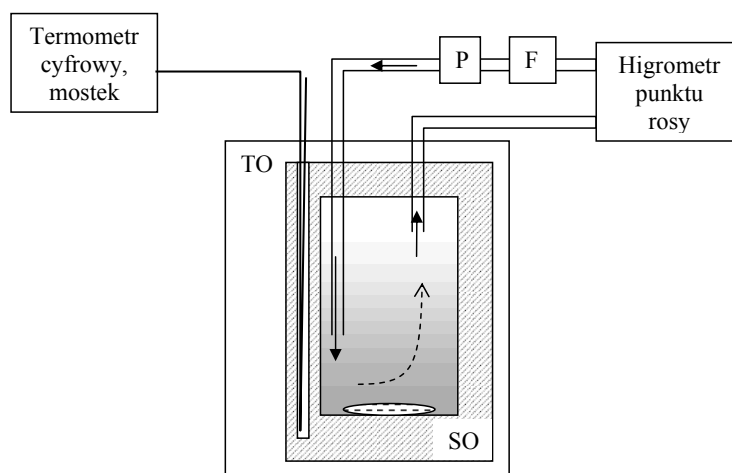


Rys. 2. Zakresy pomiarowe wzorcowych generatorów temperatury punktu rosy w GUM.

5.1.1 Generator temperatury punktu rosy DPG-1

W przypadku temperatur punktu rosy niższych od temperatury otoczenia, generator ten może działać w układzie zamkniętym, ponieważ wielokrotny, cykliczny przepływ strumienia powietrza przez saturator, nad nawet niewielką ilością wody, gwarantuje osiągnięcie stanu nasycenia w temperaturze termostatu. Para wodna wykrapla się w najchłodniejszym miejscu – w praktyce jest to dno saturatora odniesienia. Wynika to z konstrukcji termostatu i jego parametrów technicznych, ale w przypadku grubych ścianek saturatora odniesienia różnice temperatur w jego obrębie są poniżej 1 mK, a więc całkowicie do pominięcia, i tem-

peratura mierzona w kanale znajdującym się wewnątrz bocznej ścianki saturatora jest bardzo dobrym reprezentantem temperatury odniesienia.

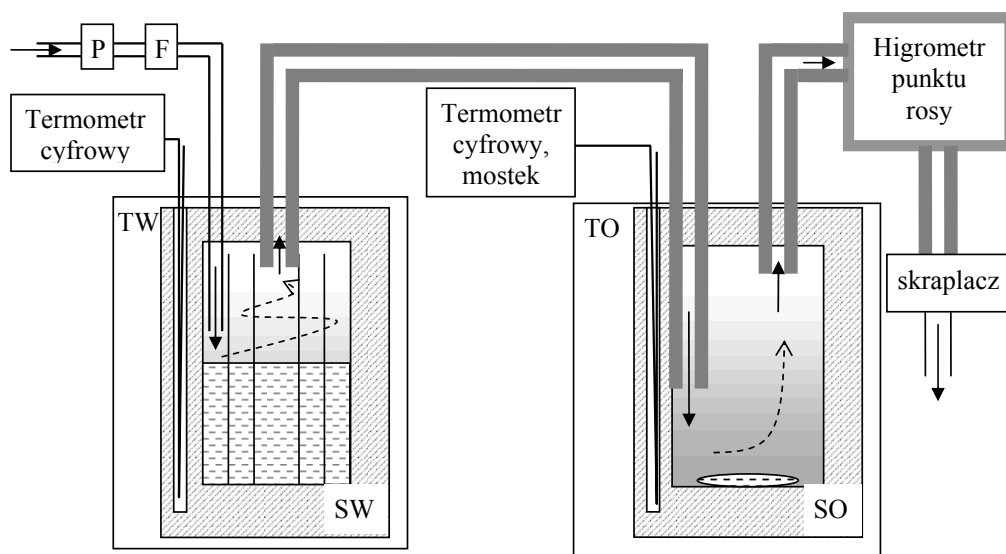


Rys. 3. Schemat generatora temperatury punktu rosy DPG-1. Symbol SO oznacza saturator odniesienia, TO – termostat odniesienia, P – pompkę powietrza, a F – przepływomierz powietrza.

5.1.2 Generator temperatury punktu rosy DPG-2

Gdy temperatura punktu rosy jest wyższa od temperatury otoczenia, pojawia się problem utrzymywania temperatury przewodów, złączy, głowicy higrometru, pompki i przepływomierza w temperaturze wyższej od temperatury punktu rosy. O ile niektóre modele higrometrów mają podgrzewane głowice pomiarowe, a komercyjnie wykonane przewody podgrzewane są dostępne na rynku, o tyle nie spotyka się podgrzewanych pompki i przepływomierzy o odpowiedniej konstrukcji. Stosowane są natomiast skraplacze, które osuszają strumień powietrza po przejściu przez głowicę higrometru. W związku z tym, bardziej funkcjonalne jest zastosowanie generatora działającego w układzie otwartym, z dwustopniowym systemem nawilżania strumienia powietrza. Pompka i przepływomierz mogą być zastosowane na wlocie lub na wylocie generatora. Ponadto, zamiast pompki można zastosować wymuszanie przepływu powietrza za pomocą butli ze sprężonym powietrzem lub odpowiedniego kompresora.

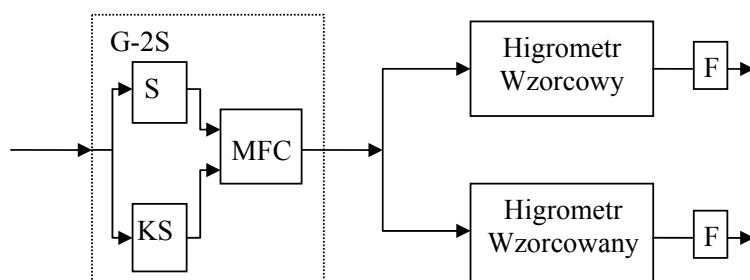
Działanie generatora DPG-2, pokazanego na rys. 4, jest następujące. Powietrze płynie przez przepływomierz i przechodzi do saturatora wstępnego, SW, podgrzanego do temperatury T_w , wyższej o kilka stopni od zakładanej temperatury punktu rosy (T_{ref}) i nawilża się do temperatury punktu rosy, $T_w > T_{dpw} > T_{ref}$. Następnie przepływa przez podgrzewane przewody (gruba linia) do saturatora odniesienia, SO, w którym nadmiar pary wodnej wykrapla się i temperatura punktu rosy strumienia powietrza (T_{dpw}) obniża się do temperatury saturatora odniesienia, T_{ref} . Dalej strumień powietrza płynie podgrzewanymi przewodami do podgrzewanej głowicy pomiarowej higrometru. Po dokonaniu pomiaru temperatury punktu rosy, powietrze przepływa do skraplacza, gdzie schładza się, nadmiar pary wodnej jest wykraplaany i usuwany, a osuszone powietrze wypływa na zewnątrz swobodnie, lub może, w miarę potrzeby, przepłynąć przez pompkę czy przepływomierz. Te dwa dodatkowe elementy mogą być usytuowane na początku lub na końcu generatora, zależnie od potrzeb i warunków stosowania wzorcowanego higrometru.



Rys. 4. Schemat generatora temperatury punktu rosy DPG-2. Symbol TW oznacza termostat wstępny, SW – saturator wstępny, TO – termostat odniesienia, SO – saturator odniesienia, P – pompkę gazową, a F – przepływomierz powietrza.

5.1.3 Wzorcowanie higrometru przez porównanie z higrometrem wzorcowym

Metoda ta jest stosowana głównie przy wzorcowaniu higrometrów użytkowych w zakresie temperatur punktu rosy niższych od temperatury otoczenia, rys. 5. Do zasilania układu pomiarowego wykorzystywany jest generator dwustrumieniowy, w którym określoną wilgotność strumienia powietrza uzyskuje się poprzez zmieszanie w odpowiednich proporcjach strumieni suchego i wilgotnego powietrza.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do wzorcowania higrometrów przez porównanie z higrometrem wzorcowym. Oznaczenie G-2S symbolizuje generator dwustrumieniowy, S – nawilżacz, KS – kolumnę suszącą, MFC – zespół masowych regulatorów przepływu, a F – przepływomierz.

Strumień powietrza dzieli się na dwie równe strugi, które przepływają przez obydwa higrometry połączone w układzie równoległym. Przepływomierze F na wyjściu higrometrów służą do kontroli i regulacji przepływu powietrza przez każdy z higrometrów i utrzymania różnicy ciśnień między higrometrami na optymalnym poziomie, gdyż z uwagi na pewne różnice konstrukcyjne nie zawsze jest możliwe zapewnienie pełnej symetrii w obydwu gałęziach układu przepływu powietrza.

5.2 Wyniki wzorcowania higrometrów punktu rosy

Higrometry są stosowane do pomiarów wilgotności w różnych zakresach pomiarowych, toteż optymalne jest (z punktu widzenia efektywności kosztowej) wywzorcowanie danego przyrządu tylko w takim zakresie pomiarowym, w jakim będzie on rzeczywiście wykorzystywany.

Higrometr wzorcuje się w wybranych punktach, a dla każdego punktu pomiarowego określa się poprawkę

$$\Delta T_{dp} = T_{ref} - T_{dp}, \quad (6)$$

gdzie T_{dp} oznacza wskazanie higrometru wzorcowanego (estymata wartości wskazywanej), zaś T_{ref} symbolizuje wartość odniesienia temperatury punktu rosy (estymatę wartości poprawnej), która obliczana jest ze wzoru

$$T_{ref} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p, \quad (7)$$

gdzie T_s – wskazanie termometru wzorcowego (temperatura saturatora odniesienia) lub higrometru wzorcowego; ΔT_s – poprawka dla wskazań termometru wzorcowego (lub higrometru wzorcowego), określana przy jego kalibracji; ΔT_p – poprawka na różnicę ciśnień pomiędzy saturatorem odniesienia lub głowicą higrometru wzorcowego i głowicą pomiarową. Wartość poprawki ΔT_p wyraża się zależnością

$$\Delta T_p = \left(\frac{p_s(T_{ref})}{b_0} \cdot \frac{\partial T_{ref}}{\partial p_s} \right) \cdot \Delta p, \quad (8)$$

gdzie $p_s(T_{ref})$ – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej w temperaturze T_{ref} ; b_0 – ciśnienie w saturatorze odniesienia (w tym kontekście jest to w przybliżeniu ciśnienie atmosferyczne); $\partial T_{ref} / \partial p_s$ – nachylenie krzywej zależności temperatury punktu rosy w funkcji ciśnienia cząstkowego pary wodnej nasyconej w temperaturze T_{ref} ; zaś Δp – różnica ciśnień pomiędzy głowicą pomiarową sprawdzanego higrometru i saturatorem lub głowicą pomiarową higrometru wzorcowego.

Po uwzględnieniu powyższych zależności poprawka jest określona wyrażeniem

$$\Delta T_{dp} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p - T_{dp} \quad (9)$$

Ciśnienie cząstkowe p_s oraz odpowiednie pochodne cząstkowe są obliczane z równania (1) dla wody lub (2) dla lodu.

Kwestia wyboru przedziału wzorcowania i ilość punktów pomiarowych jest związana z pracochłonnością wzorcowania i wynikającymi stąd kosztami. Racjonalnym rozwiązaniem jest wybór takiej ilości punktów pomiarowych, które umożliwią wywzorcowanie przyrządu w takim zakresie pomiarowym, który zaspokoi potrzeby użytkownika przy akceptowalnych kosztach. W wyniku wzorcowania określone są poprawki w punktach pomiarowych uzgodnionych z klientem oraz określone są niepewności. Dla wartości leżących pomiędzy punktami wzorcowania, wyniki mogą być interpolowane przy pomocy funkcji liniowej lub wielomianu wyższego rzędu, o ile charakter zależności i potrzeby użytkownika to uzasadniają. Interpolacja zwiększa, co prawda, niepewność wzorcowania, ale w stopniu uzasadnionym względami ekonomicznymi i technicznymi. Ponadto, w przypadku niskich

wilgotności, gdy do wartości poprawnej dochodzimy asymptotycznie, istotnym parametrem wzorcowania jest czas, po którym dokonywane były odczyty. Możliwe jest także wykonanie badań charakterystyk badanego przyrządu, ale jest to podejście znacznie różniące się od zwykłego wzorcowania i koszty takiego przedsięwzięcia mogłyby być niewspółmierne do przydatności uzyskanych informacji. Dlatego też określenie zakresu badań metrologicznych i wzorcowań danego przyrządu wymaga uwzględnienia zarówno racji technicznych jak i ekonomicznych.

Zakresy pomiarowe i najlepsze możliwości pomiarowe osiągnięte w Laboratorium Wilgotności GUM dla metody temperatury punktu rosy przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Zakres pomiarowy oraz najlepsze możliwości pomiarowe w poszczególnych podzakresach osiągnięte w Laboratorium Wilgotności GUM. Najlepsza możliwość pomiarowa jest rozumiana jako niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95 %.

Wielkość fizyczna	Rodzaj przyrządów pomiarowych	Zakres pomiarowy	Najlepsza możliwość pomiarowa
Temperatura punktu rosy	Higrometry punktu rosy	(-80 ÷ +90) °C w podzakresach: (-80 ÷ -50) °C (-50 ÷ +50) °C (+50 ÷ +90) °C	(0,3 ÷ 0,1) °C (0,1 ÷ 0,03) °C (0,03 ÷ 0,1) °C

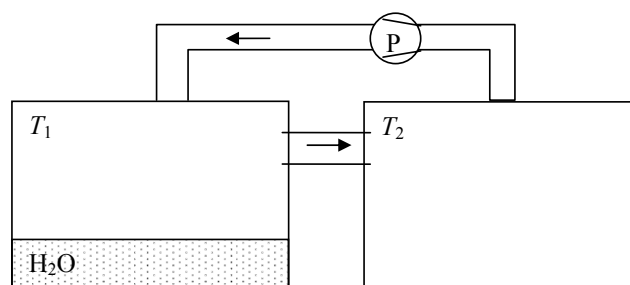
Potwierdzanie zakresów i możliwości pomiarowych jest realizowane poprzez udział Laboratorium Wilgotności w porównaniach kluczowych i uzupełniających, organizowanych przez BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, czyli Międzynarodowe Biuro Miar) oraz EURAMET (European Association of National Metrology Institutes, czyli Europejskie Stowarzyszenie Krajowych Instytutów Metrologicznych, dawniej EUROMET). W ostatnich latach Laboratorium wzięło udział w następujących porównaniach: EUROMET P-511 „Porównania generatorów wilgotności”; EUROMET P-717 „Porównania temperatury punktu rosy (zakres wysoki)”; oraz KC EUROMET.T-K6 (EUROMET P-621) „Porównanie realizacji lokalnych skal temperatury punktu rosy/szronu w zakresie od -50 °C do + 20 °C”, które zakończyły się powodzeniem, wykazując wysoki poziom kompetencji metrologicznych Laboratorium Wilgotności GUM.

5.3 Wilgotność względna

Inną wielkością określającą zawartość pary wodnej w powietrzu (lub innym gazie) jest wilgotność względna. Zależy ona, jak to wynika z równań (3) i (4), od temperatury oraz od ciśnienia całkowitego. Ponieważ nie ma metody absolutnej określającej wartości odniesienia dla tej wielkości, konieczne jest stosowanie metody pośredniej, przedstawionej w punkcie 4.2.1. W praktyce, metoda ta jest wykorzystywana w laboratoriach wzorcujących nawet w przypadku wzorcowania termohigrometrów w generatorach dwuciśnieniowych czy dwutemperaturowych, które z definicji są wzorcami wilgotności względnej. Przyczyną tak powszechnego wykorzystania tej metody jest jej duża dokładność, szeroki zakres zastosowania i możliwość dobrej kontroli zapewniającej wiarygodność pomiarów.

5.3.1 Generator dwutemperaturowy

Jest to urządzenie działające w układzie zamkniętym na zasadzie pełnego nawilżania powietrza w temperaturze T_1 w komorze nawilżającej (saturatorze), połączonej z komorą sprawdzania, w której utrzymywana jest temperatura T_2 . W rzeczywistości, w układzie tym mogą występować pewne niejednorodności termodynamiczne. W praktyce, jako T_1 należy przyjąć temperaturę wody w saturatorze, natomiast jako T_2 bierzemy temperaturę powietrza w komorze sprawdzania, mierzoną jak najbliżej wzorcowanego czujnika. Wymuszanie cyrkulacji gazu przez pompkę P nie powinno być zbyt intensywne, aby nie zakłócać quasi-statycznego, izobarycznego charakteru procesu. Schemat generatora dwutemperaturowego jest przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6. Schemat generatora dwutemperaturowego.

Z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że wilgotność względna w komorze sprawdzania wynosi

$$RH = [p_{vs}(T_1) / p_{vs}(T_2)] \cdot 100 \% , \quad (10)$$

czyli jest równa stosunkowi ciśnień cząstkowych nasyconej pary wodnej w temperaturach T_1 i T_2 pomnożonemu przez 100 %. Znając temperatury w obu komorach można obliczyć oba ciśnienia cząstkowe, korzystając z równań (1) lub (2), a następnie wilgotność względną.

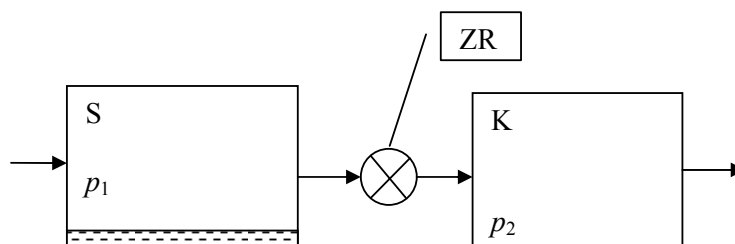
5.3.2 Generator dwuciśnieniowy

Generator dwuciśnieniowy jest przepływowym generatorem wzorcowym wilgotności względnej. Działa on na zasadzie nawilżania w saturatorze strumienia powietrza do stanu nasycenia przy wyższym ciśnieniu p_1 , a następnie rozprężania go do niższego ciśnienia roboczego w komorze sprawdzania p_2 . Proces ten powinien odbywać się izotermicznie. Schemat działania takiego generatora przedstawia rys. 7, na którym kierunek przepływu strumienia powietrza wskazują strzałki.

Wilgotność względną, wytworzoną w komorze sprawdzania tego generatora, można wyliczyć z zależności:

$$RH = \frac{f_s(T, p_1)}{f_s(T, p_2)} \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot 100 \% . \quad (11)$$

W pierwszym przybliżeniu, wilgotność względna jest określona przez stosunek ciśnień, p_2 / p_1 . Uwzględnienie współczynników zwiększenia, $f(T, p)$, zwiększa nieco obliczone wartości RH. Przykładowo, w temperaturze 20 °C poprawka ta daje wzrost o ok. 0,26 % przy RH = 10 % i ok. 0,15 % przy RH = 50 %.

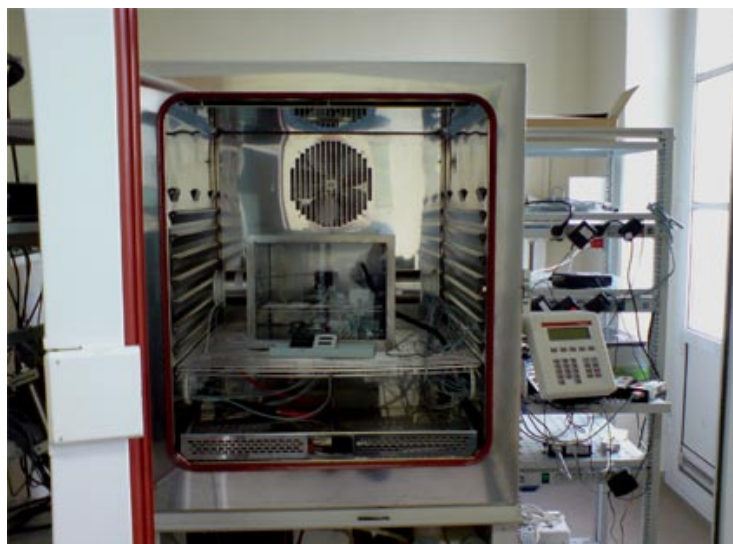


Rys. 7. Schemat generatora dwuciśnieniowego. Symbol S oznacza saturator, ZR – zawór rozprężny, zaś K – komorę sprawdzania.

W praktyce laboratoryjnej niezmiernie ważne jest uzyskanie pełnego lub powtarzalnego nasycenia w saturatorze oraz utrzymanie izotermicznego charakteru procesu. Natomiast obliczenia, łącznie z wyliczeniem poprawek, są w większości przypadków proste i wystarczająco dokładne. Poważnym ograniczeniem w stosowaniu generatorów *RH* jest to, że nie można ich wykorzystać do badania czujników aktywnych, tzn. wytwarzających ciepło, wilgoć lub przepływy, które generują zakłócenia wpływające na wynik pomiaru. Takimi czujnikami są np. psychrometry lub podgrzewane czujniki z LiCl.

5.3.3 Komora klimatyczna i jej zastosowania

Z powodu ograniczeń, jakim podlega stosowanie generatorów wilgotności względnej, bardzo często lepiej jest wykonywać wzorcowanie przyrządów do pomiaru wilgotności względnej z wykorzystaniem komór klimatycznych. Komora klimatyczna służy do wytwarzania powietrza o określonej wilgotności i temperaturze, a wartości odniesienia obliczane są z pomiarów temperatury punktu rosy i temperatury powietrza, jak to opisano w rozdziale 4.2.1.



Rys. 8. Wnętrze komory klimatycznej wraz kasetą, stosowaną do wzorcowania termohigrometrów i elektronicznych psychrometrów o wyższej dokładności, z niepewnością rozszerzoną wartości odniesienia dla wilgotności względnej poniżej 1 % *RH* oraz 0,1 °C dla temperatury.

W komorze występują strugi powietrza o różnej temperaturze i wilgotności, gdyż wewnątrz są elementy o różnej temperaturze (grzałka, parownik i nawilżacz), a powietrze przepływające przez te elementy nie zdąży się wystarczająco wymieszać. Powodowałoby to

dość dużą niepewność wzorcowania, z uwagi na znaczny zakres zmienności temperatury i wilgotności. Wykonanie niewielkich prac adaptacyjnych pozwoliło na uzyskanie takich parametrów metrologicznych komory, które umożliwiły wykorzystanie jej do zbudowania wzorca odniesienia wilgotności względnej.

Przykład takiej adaptacji przedstawiono na rys. 8. Modernizacja komory polegała na wykonaniu specjalnej kasety wyposażonej we własny wentylator, która jest umieszczana wewnątrz komory klimatycznej. Wewnątrz tej kasety istnieją bardziej jednorodne warunki, tzn. temperatura i wilgotność, niż w samej komorze. Kaseca nie jest szczelnie zamknięta, co umożliwia wymianę powietrza z resztą komory, a wewnętrzne mieszanie wyrównuje wilgotność i temperaturę w kasecie, co jest warunkiem koniecznym do wykonywania dokładniejszych pomiarów. O ile w samej komorze, w zależności od miejsca i nastaw komory, rozrzut temperatury może przekraczać nawet 1 °C, a niejednorodność wilgotności względnej może wynosić ok. 2 %, to wewnątrz kasety te rozrzuty są o rząd wielkości mniejsze i wynoszą odpowiednio 0,1 °C i 0,2 %. W centralnej strefie komory, przed kasetą, także można wzorcować przyrządy, ale o mniejszej dokładności, zwłaszcza gdy ich rozdzielczości wskazań wynoszą odpowiednio 1 °C i 1 %.

Na takim właśnie stanowisku, znajdującym się w Laboratorium Wilgotności GUM, wzorcowane są przyrządy do pomiaru wilgotności względnej i temperatury powietrza. Na stanowisku tym można wzorcować jednocześnie kilka przyrządów, jeżeli możliwe jest wykluczenie wzajemnych zakłóceń. W przypadku wilgotności względnej, zakres pomiarowy i najlepsze możliwości pomiarowe zależą od temperatury wzorcowania. Zakresy pomiarowe i najlepsze możliwości pomiarowe uzyskiwane w Laboratorium Wilgotności GUM dla temperatury i wilgotności względnej powietrza są przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zakresy pomiarowe dla temperatury i wilgotności względnej oraz najlepsze możliwości pomiarowe w poszczególnych zakresach uzyskiwane w Laboratorium Wilgotności GUM. Najlepsza możliwość pomiarowa jest rozumiana jako niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95 %. W przypadku wilgotności względnej, najlepsza możliwość pomiarowa jest podawana w procentach wartości zmierzonej *RH*.

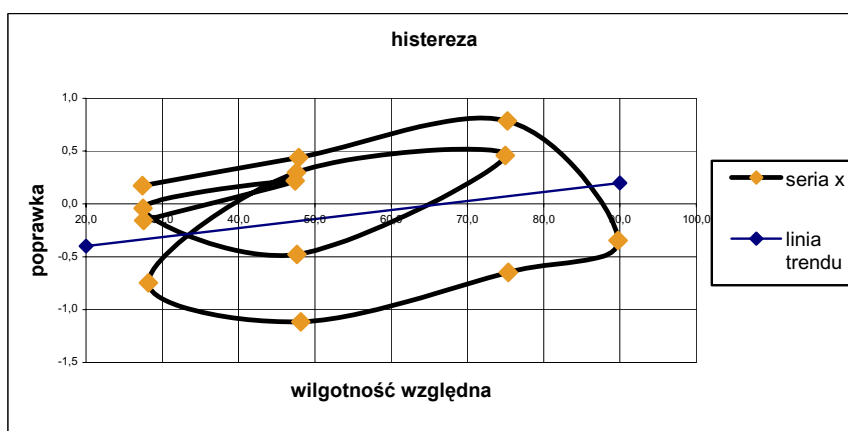
Wielkość fizyczna	Rodzaje przyrządów pomiarowych	Zakres pomiarowy	Najlepsza możliwość pomiarowa	Uwagi
Temperatura powietrza	Termometry elektroniczne, mierniki mikroklimatu	(-40 ÷ +90) °C	(0,1) °C	Wzorcowanie w przedziale temperatur (-40 ÷ +90) °C
Wilgotność względna	Higrometry, termohigrometry, mierniki mikroklimatu oraz psychrometry elektroniczne (dla $t > 0^{\circ}\text{C}$)	(10 ÷ 98) % (10 ÷ 98) % (10 ÷ 98) % (50 ÷ 98) % (80 ÷ 98) %	(0,3 ÷ 0,7) % (0,3 ÷ 0,7) % (0,3 ÷ 0,7) % (0,5 ÷ 1,0) % (1,0 ÷ 1,1) %	przy $t = 90^{\circ}\text{C}$ przy $t = 23^{\circ}\text{C}$ przy $t = 0^{\circ}\text{C}$ przy $t = -20^{\circ}\text{C}$ przy $t = -40^{\circ}\text{C}$

5.4 Przyrządy pomiarowe użytkowe

Wybór przyrządu pomiarowego zależy od zakresu pomiarowego, żądanej dokładności wskazań, szybkości reakcji na zmiany wielkości mierzonej, odporności na obecność zanieczyszczeń oraz od wielu innych parametrów istotnych w warunkach użytkowania. Poniżej omówione są poszczególne typy przyrządów pomiarowych badanych w Laboratorium Wilgotności GUM.

5.4.1 Higrometry i termohigrometry

W pomiarach środowiskowych najczęściej wykorzystywane są higrometry i termohigrometry z impedancyjnymi sorpcyjnymi czujnikami cienkowarstwowymi – pojemnościowymi lub rezystancyjnymi. Są to w większości dobrze dopracowane technologicznie, miniaturowe czujniki nie zakłócające warunków otoczenia. Nie wymagają one specjalnej obsługi, ale należy je chronić przed zanieczyszczeniami. Reagują szybko, ale wykazują zjawisko histerezy, które jest zilustrowane na rys. 9. Poprawka zależy zarówno od kierunku pomiaru jak i od zakresu wielkości mierzonej [13].



Rys. 9. Przykład zależności wskazań higrometru od historii pomiaru.

Przy dokładniejszych pomiarach można oddzielnie uwzględnić historię pomiaru dla każdego punktu. To podejście możemy zastosować wtedy, gdy mamy możliwość wyboru wartości temperatury i wilgotności, jak to ma zazwyczaj miejsce w procesie wzorcowania. W mniej dokładnych pomiarach przemysłowych, a takich jest większość, zazwyczaj nie mamy możliwości wyboru sekwencji zmian temperatury i wilgotności. Korzystniejsze jest wtedy oszacowanie poprawek na podstawie linii trendu (wyznaczonej np. graficznie) oraz uwzględnienie tego efektu jako składowej niepewności, oszacowanej na podstawie przedziału zmienności, przyjmując np. założenie jednostajnego rozkładu poprawek wokół linii trendu. W tym celu wzorcowanie jest wykonywane dwukrotnie w środku przedziału wilgotności względnej, zarówno dla wartości rosnących jak i malejących. Na podstawie tych dwóch pomiarów można oszacować szerokość przedziału zmienności oraz składową histeresową poprawki i niepewności. Ostateczny wynik wzorcowania zależy wówczas od założonego zakresu wzorcowania, wynikającego z docelowego zakresu pomiarowego, w którym przyrząd ma być stosowany.

Istotny wpływ na charakterystyki czujników wilgotności względnej ma temperatura pracy. We współczesnych przyrządach problem uwzględnienia nieliniowości, korekty temperaturowej czy adiustacji charakterystyk jest skutecznie rozwiązywany dzięki wykorzystaniu mikroprocesorów.

5.4.2 Psychrometry elektroniczne

Ta kategoria przyrządów pomiarowych, podobnie jak wiele innych przyrządów elektronicznych, ma swoje niepodważalne zalety, a ich stosowanie jest szczególnie korzyst-

ne w zakresie wyższych wilgotności. Przyrządy te wymagają nieco większej staranności obsługi (czystość i efektywność układu zwilżania), ale nie są wrażliwe na kumulację wody i praktycznie nie wykazują histerezy. Charakterystyka psychrometrów elektronicznych jest opisana za pomocą wzoru psychrometrycznego z dokładnością wystarczającą dla większości zastosowań. Przy prowadzeniu pomiarów należy jednak pamiętać o tym, że psychrometr jest przyrządem aktywnym, który wytwarza strumień powietrza i nawilża go. Konieczna jest więc ocena wpływu psychrometru na otoczenie, w którym pracuje, ponieważ w niewielkich układach termodynamicznych może on powodować wzrost wilgotności i temperatury.

Psychrometry, zwłaszcza elektroniczne, posiadają istotne walory, dzięki którym są one w pełni doceniane i wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Są one szczególnie użyteczne w sytuacji, gdy trzeba prowadzić długotrwałe pomiary w wysokiej wilgotności. W takich warunkach, najbardziej rozpowszechnione termohigrometry pojemnościowe wykazują istotne wady: nasiąkają wodą, wskutek czego zawyżają wskazania wilgotności, pogarsza się ich czułość i dokładność pomiarów. W takich warunkach fizycznych psychrometry sprawują się znacznie lepiej, a ich wersje elektroniczne mają ponadto tę zaletę, że pomiar i obliczenia higrometryczne są wykonywane automatycznie.

5.4.3 Psychrometry Assmanna

W użyciu jest jeszcze pewna liczba psychrometrów Assmanna, które wykorzystują termometry cieczowe. Ze względu na wpływ różnych rozwiązań konstrukcyjnych na wynikowe parametry metrologiczne, wymagania dotyczące konstrukcji takich przyrządów są ściśle określone. Pomiary wilgotności względnej za pomocą psychrometru Assmanna wymagają użycia tablic psychrometrycznych [14] lub obliczeń za pomocą wzoru (5). Dokładność tych przyrządów jest ograniczona głównie przez zastosowanie termometrów cieczowych, znacznie mniej dokładnych od termometrów elektronicznych. Stosunkowo duże rozmiary psychrometru oraz konieczność każdorazowego zwilżania tamponu (knota) termometru wilgotnego przed pomiarem, znacznie ogranicza możliwości jego zastosowania.

5.4.4 Inne przyrządy i metody wzorcowania

Można czasem jeszcze spotkać przyrządy mechaniczne do pomiaru wilgotności, sięgające swoimi korzeniami ubiegłych stuleci. Są to różne konstrukcje działające na zasadzie dylatacji włosów czy membran organicznych, które rozszerzają się ze wzrostem wilgotności, przetwarzając wilgotność na wielkości mechaniczne. Są to więc czujniki sorpcyjne, ale ich wady są znacznie bardziej uciążliwe niż niedogodności stosowania współczesnych czujników impedancyjnych, przetwarzających wilgotność na sygnały elektryczne.

Warto wspomnieć, że w higrometrii stosowano również wzorce w postaci nasyconych roztworów soli nieorganicznych. Wzorców takich dotyczyło nawet zalecenie OIML [15]. Jednakże, ze względów praktycznych, rola takich wzorców i owej metody jest obecnie marginalna, a samo zalecenie zostało wycofane.

6. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe pojęcia z dziedziny wilgotności powietrza i innych mieszanin parowo-gazowych, najważniejsze metody pomiarowe, me-

tody wzorcowania oraz najczęściej spotykane typy użytkowych przyrządów pomiarowych. Szczególną uwagę poświęcono praktycznym aspektom współczesnej higrometrii.

Omówiono w tej pracy stanowiska pomiarowe, które zostały zaprojektowane i zbudowane w ramach prac własnych Laboratorium Wilgotności GUM. Opracowanie metod pomiarowych i metod wzorcowania jest również dziełem pracowników naszego Laboratorium. Przedstawione w tym artykule możliwości pomiarowe Laboratorium Wilgotności GUM są potwierdzone pomyślnie zakończonym udziałem w kilku porównaniach międzynarodowych.

Literatura

- [1] Sonntag D.: *Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae*. Zeitschrift für Metrologie, vol. 40 (5), pp. 340–344, 1990.
- [2] *Guide to the Measurement of Humidity*. The Institute of Measurement and Control, London 1996.
- [3] Hardy B.: *ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature and Enhancement Factors I n the Range -100 to +100 °C*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 214–222, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [4] Kabza Z., Kostyrko K., Zator S., Łobzowski A., Szkolnikowski W.: *Regulacja mikroklimatu pomieszczenia*. Agencja Wydawnicza PAK-u, Warszawa, Listopad 2005.
- [5] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. Nr 225, poz. 1638).
- [6] Kostyrko K.: *Etałonnij sorpcjonno gravimetriczeskij gigromieter*. Izmeritel'naja Tiejchnika nr 11, 1976.
- [7] Wexler A., Hyland R. W., Rhodes S. W.: *A Comparison between the NBS Two-Pressure Humidity Generator and the NBS Standard Hygrometer*. Meas. and Control in Science and Industry, Vol. 3, Reinhold Publishing Company, 1965.
- [8] Bell S.: *Validation of the NPL Primary Gravimetric Hygrometer*. Papers and Abstracts from the third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 20–27, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [9] Bell S.: *Validation of the NPL Primary Gravimetric Hygrometer*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 62–67, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [10] Flakiewicz K.: *Implementation of the dew-point temperature generator as the primary standard in GUM*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 62–67, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [11] Flakiewicz K.: *Improvement of the primary humidity standard in GUM*. Proc. 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMEKO 2001, vol. 2, VDE Verlag GMBH, Berlin 2001.
- [12] Flakiewicz K.: *Instrukcja wzorcowania wzorcowych higrometrów punktu rosy z chłodzonym lustrem w odniesieniu do wzorca podstawowego – generatora temperatury punktu rosy*. Instrukcja wewnętrzna GUM.
- [13] Flakiewicz K.: *Błędy histerezowe w pomiarach wilgotności względnej*. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53 BIS (9'2007).
- [14] Kostyrko K., Szumowski J., Wyżkowska A.: *Tablice psychrometryczne i higrometryczne*. PWN Warszawa, 1986.
- [15] *The Scale of Relative Humidity of Air Certified against Saturated Salt Solutions*. International Recommendation OIML R 121 – 1990.