

Spójność pomiarowa w dziedzinie wilgotności powietrza

Krzysztof Flakiewicz

1. Wstęp

Sprawa logicznego i przejrzystego usystematyzowania zbioru wielkości pomiarowych jest istotna dla właściwej realizacji spójności pomiarowej w każdej dziedzinie. Stanowi ona podstawę do racjonalnego wyboru nieprzerwanego łańcucha powiązań przy przekazywaniu jednostki miary danej wielkości i optymalizacji hierarchii wzorcowań. Pozwala także na lepszą identyfikację powiązań między różnymi wielkościami stosowanymi w danej dziedzinie. Kiedy mamy do czynienia z mieszaniem pojęć różnego rodzaju, powiązania między nimi stają się mętne, a poruszanie w danej dziedzinie pomiarowej staje się kłopotliwe dla przeciętnego użytkownika. Tak jak w przypadku dziedziny pomiarów wilgotności powietrza i gazów, także w innych dziedzinach istotne jest oddzielenie pojęcia dziedziny od wielkości stosowanych do jej opisu. W niektórych przypadkach pojęcie dziedziny może pokrywać się z pojęciem wielkości stosowanej do jej opisu, jak np. długość, masa, czas. O ile sama dziedzina jest określana opisowo, o tyle od wielkości mierzalnych wymagane jest w zasadzie ściśle zdefiniowanie jej z podaniem odpowiedniej formuły matematycznej.

Zachowanie logicznej struktury pojęć jest istotne nie tylko dla przejrzystego przedstawiania danej dziedziny, zrozumiałego opisu zjawisk i zależności opisujących je, ale także dla tworzenia ścisłego i konsekwentnego łańcucha spójności pomiarowej. W celu dokonania klasyfikacji konieczne jest ustalenie odpowiednich kryteriów. Wybór niewłaściwych kryteriów klasyfikacji pojęć powoduje, że wzajemne relacje między nimi stają się niezrozumiałe, podejście do danej dziedziny staje się mechaniczne, a istota zjawiska niejasna. Określenia takie jak niska czy wysoka wilgotność są niewłaściwe, gdyż to co jest „niską wilgotnością” np. 20 % dla wilgotności względnej w temperaturze 80 °C, będzie już dosyć wysoką wilgotnością dla temperatury punktu rosy (45 °C).

2. Wielkości stosowane w dziedzinie wilgotności (higrometrii)

Pojęcie wilgotności dotyczy zjawisk związanych z występowaniem pary wodnej w różnych układach fizycznych (zamkniętych i otwartych), w obecności lub bez innych faz wody oraz innych składników układów. Jest ono istotne z uwagi na różnorodność oddziaływania pary wodnej z otoczeniem oraz wymianą wody w różnych fazach pomiędzy różnymi elementami tych układów. Zjawiska wilgotności są opisywane głównie przy wykorzystaniu wielkości:

Wilgotność bezwzględna (gęstość pary wodnej) – $d = m_v/V$, określa stosunek masy pary wodnej m_v do zajmowanej przez nią objętości V . Jest wielkością prostą pojęciowo, ale trudną do wykorzystania w praktyce pomiarowej.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej – p_v – ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej (w stanie nienasyconym lub nasyconym). Ciśnienie cząstkowe nasyconej

pary wodnej – p_{vs} – ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej będącej w stanie nasycenia – zależność tej wielkości od temperatury jest podstawową zależnością higrometryczną.

Temperatura punktu rosy T_{dp} (t_{dp} gdy wyrażana jest w °C) – 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 w %, jaka część zawartości pary wodnej występuje w badanym powietrzu w stosunku do maksymalnej zawartości pary wodnej, która może występować w danej temperaturze w stanie nasycenia.

Oczywiście takie wielkości jak wilgotność bezwzględna, ciśnienie cząstkowe pary wodnej, temperatura punktu rosy jak i wilgotność względna mogą być określane dla pary wodnej występującej zarówno w fazie czystej jak i w mieszaninie parowo-gazowej. Są też wielkości, które z definicji mogą być zastosowane praktycznie wyłącznie do określania wilgotności mieszanin parowo-gazowych. Do takich wielkości należy wymieniona poniżej:

Zawartość wilgoci – $x = m_v/m_a$ (mixing ratio – stosunek zmieszania), określa stosunek masy pary wodnej m_v zawartej w powietrzu (mieszaninie parowo-gazowej) do masy pozostałych („suchych”) składników powietrza (mieszaniny) m_a .

Termin zawartość wilgoci jest też stosowany do określenia „udziału pary wodnej” (objętościowego lub masowego) i jest wyrażany często w jednostkach ppm (part per milion), a dla bardzo suchych gazów stosowane są też jednostki ppb (part per bilion).

Szersze omówienie wielkości fizycznych i metod pomiarowych stosowanych w dziedzinie wilgotności można znaleźć w pracach [1, 2].

Potocznie pojęcie wilgotności jest traktowane zamiennie z niektórymi pojęciami wielkości, stosowanymi do opisu zjawiska wilgotności. Wielkości tych jest kilka, a praktycznie stosowane są głównie temperatura punktu rosy/szronu i wilgotność względna. Pierwsza z nich jest wielkością podstawową, a druga – wielkością pochodną. Spośród innych wielkości warto zwrócić uwagę na wilgotność bezwzględną – gęstość pary wodnej, która jest pojęciowo bardzo prosta i oczywista, ale niewiele mówi ona o istocie zjawiska wilgotności i jest trudna do zastosowania w praktyce pomiarowej. W celu zmierzenia tej wielkości należałoby zastosować złożone procedury laboratoryjne i samą wielkość należałoby potraktować jako wielkość pochodną. Z tych powodów nie ma w zastosowaniach przyrządów wyskalowanych w jednostkach wilgotności bezwzględnej.

Druga z wielkości o istotnym znaczeniu praktycznym – wilgotność względna, ma charakter wielkości pochodnej i jej wartości odniesienia są wyliczane na podstawie pomiarów temperatury punktu rosy i temperatury tej pary.

Istotną wielkością możliwą do zastosowania przy opisie stanu pary wodnej jest jej ciśnienie cząstkowe. W stanie nasycenia, w fazie czystej pary wodnej, korelacja ciśnienia cząstkowego nasyconej pary wodnej i temperatury punktu rosy jest jednoznaczna dla temperatur dodatnich. W temperaturach ujemnych, gdzie może występować metastabilny stan wody przechłodzonej (do około -50 °C), korelacja ma charakter dwuznaczny. Dla określonego ciśnienia cząstkowego nasyconej pary wodnej wartości temperatury punktu rosy i szronu różnią się nieznacznie – w przybliżeniu o około 11 % wartości mierzonej, wyrażonej liczbowo w °C. Wybór wartości dla stanu rosy czy szronu zależy od tego, która faza utworzyła się na obiekcie wykorzystanym do detekcji stanu nasycenia pary wodnej. Takim obiektem najczęściej wykorzystywanym we współczesnych higrometrach punktu rosy są metalowe lusterka, chłodzone za pomocą elementów Peltiera.

3. Metody pomiarowe

W praktyce dla każdej z wielkości są określone właściwe metody pomiarowe – bezpośrednie lub pośrednie.

Z wymienionych wcześniej wielkości temperatura punktu rosy ma charakter wielkości podstawowej, pozostałe natomiast są wielkościami pochodnymi. Możliwy jest bezpośredni pomiar temperatury punktu rosy jako pewnej charakterystycznej temperatury, skorelowanej ze stanem nasycenia pary wodnej. Temperatura punktu rosy może być przyjęta jako wielkość podstawowa w pomiarach w dziedzinie wilgotności. Charakter tej wielkości jest bardzo bliski samej temperaturze, gdyż jest to pomiar temperatury obiektu fizycznego, zastosowanego do detekcji temperatury w momencie osiągnięcia na nim stanu nasycenia pary (lustro, generator kwarcowy). Oczywiście taki obiekt powinien być na tyle mały, aby nie zakłócał stanu układu, którego temperatura punktu rosy jest mierzona. Skala temperatury punktu rosy oparta jest na kontinuum stanów nasycenia pary wodnej, a więc podejście jest podobne jak w skali temperatury, opartej o zbiór punktów stałych. Jako wzorce podstawowe stosowane są generatory temperatury punktu rosy [3], względem których wzorcowane są wzorce wtórne – higrometry punktu rosy z chłodzonym lustrem lub rezonatorem kwarcowym. Temperatura punktu rosy jest także mierzona na drodze pośredniej – jest ona wyliczana z jednoczesnych pomiarów temperatury i wilgotności względnej.

Pozostałe wielkości to wielkości pochodne, których pomiar ma charakter pośredni. Przy pomiarach wilgotności względnej stosowane są głównie dwie metody: sorpcyjna i psychrometryczna. W metodzie sorpcyjnej wykorzystuje się zjawiska zmiany właściwości elektrycznych lub mechanicznych różnych materiałów (stałych lub ciekłych), występujących wraz ze zmianą ich wilgotności – zawartej w nich wody. Te zmiany są skorelowane z wilgotnością względną otoczenia. W przypadku właściwości elektrycznych mamy do czynienia z higrometrami z czujnikami impedancyjnymi (zazwyczaj miniaturowymi), a w przypadku mechanicznych – z higrometrami włosowymi lub membranowymi. W metodzie psychrometrycznej wykorzystywane jest chłodzenie zwilżonego czujnika przez ruch powietrza wokół niego na skutek parowania wody z czujnika. Różnica temperatur pomiędzy takim chłodzonym czujnikiem i czujnikiem suchym, mierzącym temperaturę powietrza, jest zależna od temperatury i wilgotności względnej powietrza, przy uwzględnieniu wpływu ciśnienia barometrycznego i prędkości przepływu powietrza.

4. Spójność pomiarowa i propozycja klasyfikacji serwisów w higrometrii

Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*) prowadzi między innymi bazę porównań kluczowych (KCDB – *Key Comparison Data Base*) i najlepszych możliwości pomiarowych (CMC – *Calibration and Measurement Capabilities*) dla narodowych instytutów metrologicznych (NMI – *National Metrological Institute*). Istotnym elementem tej bazy jest wykaz usług metrologicznych dla dziedziny wilgotności. W tabeli poniżej przedstawiona została obecnie przyjęta klasyfikacja [4] (kolumna 1) z terminologią angielską i odpowiednikami polskimi, a w kolumnie 2 – propozycje w terminologii polskiej. W dotychczasowej wersji trudno dopatrzeć się jakiegoś racjonalnego kryterium uporządkowania. Po przyjęciu następujących kryteriów (z zachowaniem uporządkowania):

DZIEDZINA -> WIELKOŚĆ -> METODA -> NIEPEWNOŚĆ

proponowana klasyfikacja serwisów dla dziedziny wilgotności będzie się przedstawiała jak w kolumnie 2.

Stan aktualny	Rozwiązanie proponowane
<p style="text-align: center;">BRANCH: HUMIDITY [DZIEDZINA: WILGOTNOŚĆ]</p> <p>3. Hygrometers [higrometry]</p> <p>3.1 Dew-point hygrometers [higrometry punktu rosy]</p> <p>3.1.1 Dew-point hygrometers [higrometry punktu rosy]</p> <p>3.2 Psychrometers [psychrometry]</p> <p>3.2.1 Psychrometers [psychrometry]</p> <p>3.3 Relative humidity sensors [czujniki wilgotności względnej]</p> <p>3.3.1 Relative humidity sensors [czujniki wilgotności względnej]</p> <p>3.4 Other hygrometers [inne higrometry]</p> <p>3.4.1 Other hygrometers [inne higrometry]</p> <p>4. Dynamic generators [generatory dynamiczne]</p> <p>4.1 Dew-point generators [generatory punktu rosy]</p> <p>4.1.1 Dew-point generators [generatory punktu rosy]</p> <p>4.2 Relative humidity generators [generatory wilgotności względnej]</p> <p>4.2.1 Relative humidity generators [generatory wilgotności względnej]</p> <p>4.3 Flow mixing [z mieszaniem strumieni]</p> <p>4.3.1 Flow mixing [z mieszaniem strumieni]</p> <p>4.4 Permeation tube, diffusion tube [rurka permeacyjna, rurka dyfuzyjna]</p> <p>4.4.1 Permeation tube, diffusion tube [rurka permeacyjna, rurka dyfuzyjna]</p> <p>5. Static generators [generatory statyczne]</p> <p>5.1 Salt solutions [saturated, unsaturated] [roztwory soli (nasycone, nienasycone)]</p> <p>5.1.1 Salt solutions (saturated, unsaturated) [roztwory soli (nasycone, nienasycone)]</p> <p>5.2 Reference gases [gazowe materiały odniesienia]</p> <p>5.2.1 Reference gases [gazowe materiały odniesienia]</p>	<p style="text-align: center;">DZIEDZINA: WILGOTNOŚĆ</p> <p>3. Temperatura punktu rosy</p> <p>3.1 Generatory temperatury punktu rosy</p> <p>3.1.2 Wzorcowe generatory temperatury punktu rosy</p> <p>3.1.3 Generatory z mieszaniem strumieni</p> <p>3.1.4 Rurki permeacyjne, rurki dyfuzyjne</p> <p>3.2 Higrometry punktu rosy</p> <p>3.3 Inne higrometry punktu rosy</p> <p>4. Wilgotność względna</p> <p>4.1 Generatory wilgotności względnej</p> <p>4.1.1 Generatory dynamiczne dwu-ciśnieniowe</p> <p>4.1.2 Generatory dynamiczne dwu-temperaturowe</p> <p>4.2.3 Generatory statyczne – roztwory soli nasycone i nienasycone.</p> <p>4.2 Higrometry wilgotności względnej</p> <p>4.3 Psychrometry</p> <p>4.3.1 Psychrometry Assmanna</p> <p>4.3.2 Psychrometry elektroniczne</p> <p>4.4 Inne higrometry wilgotności względnej</p> <p>5. Zawartość wilgoci</p> <p>5.1 Higrometry grawimetryczne</p> <p>5.2 Gazowe materiały odniesienia</p>

5. Podsumowanie

Przedstawione spostrzeżenia dla wilgotności powietrza dotyczą także innych dziedzin pomiarowych, jak np. lepkości, gdzie wielkościami są lepkość dynamiczna lub kinematyczna. Nie można więc mówić zarówno o pomiarach wilgotności jak też lepkości. Spójność pomiarowa nie dotyczy dziedziny, ale każdej z wielkości z osobna i w takim kontekście powinna być rozważana.

Literatura

1. Guide to the Measurement of Humidity, The Institute of Measurement and Control, London 1996.
2. Flakiewicz K.: *Wilgotność powietrza i gazów. Pomiary i wzorcowanie*. Biuletyn Głównego Urzędu Miar, Nr 4(15) 2009.
3. 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.
4. http://kcdb.bipm.org/AppendixC/T/T_services.pdf