

**Katedra Silników Spalinowych  
i Pojazdów ATH  
ZAKŁAD TERMODYNAMIKI**

## **Pomiar wilgotności względnej powietrza**

---

## Wstęp teoretyczny

---

### Skład gazu wilgotnego.

*Gazem wilgotnym* nazywamy mieszaninę gazów, z których jeden może podlegać procesom zmiany stanu skupienia w danym przedziale zmian temperatury i ciśnienia. Najczęściej spotykanym w praktyce przykładem gazu wilgotnego jest powietrze wilgotne nawilżone parą wodną, w zakresie parametrów bliskich parametrom otoczenia.

W odróżnieniu od składników zwykłej mieszaniny, wilgoć w stanie gazowym nie może być zawarta w gazie wilgotnym w dowolnej ilości. Jej udział jest ograniczony taką ilością, przy której ciśnienie cząstkowe pary jest równe ciśnieniu nasycenia  $p_s$  odpowiadającemu temperaturze gazu wilgotnego. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej  $p_p$  spełnia zatem warunek

$$p_p \leq p_s \quad (1)$$

Np. dla powietrza o temperaturze 20°C, nawilżonego parą wodną ciśnienie cząstkowe pary wodnej wynosi 2300 Pa, a zatem przy ciśnieniu 0.1 MPa udział objętościowy pary wodnej w powietrzu nie może przekroczyć 2,3%. Gaz, gaz którego  $p_p \leq p_s$  jest gazem nasyconym wilgocią. Dodatkowa wilgoć ponad tą, która powoduje nasycenie gazu, występuje w postaci ciekłej. Jeżeli są to drobne kropelki cieczy zawieszona w gazie wilgotnym, to mówimy wówczas, że gaz jest zamglony.

Ograniczenie nałożone na zawartość pary w gazie wilgotnym, wynikające z warunku (1) sprawiają, że dla określenia tej zawartości stosujemy tzw. *wilgotność względną*  $\varphi$ . Wyraża ona stosunek masy pary  $m_p$  zawartej w pewnej objętości gazu wilgotnego do maksymalnej zawartości pary  $m_p''$  w tej objętości przy takiej samej temperaturze

$$\varphi = \left( \frac{m_p}{m_p''} \right)_{t,V} = \frac{\rho_p}{\rho''(t)} \quad (2)$$

Para wodna przy tej maksymalnej zawartości jest parą nasyconą suchą, stąd oznaczenie  $m_p''$ .

Stosując prawa gazu doskonałego otrzymujemy zależność

$$\varphi = \frac{p_p}{p_s(t)} \quad (3)$$

przydatną do praktycznych obliczeń.

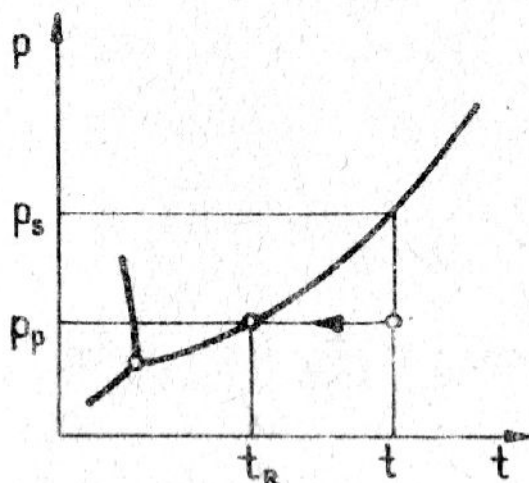
Dla sporządzenia bilansów masowych przemian gazów wilgotnych przydatny jest stopień zawilżenia gazu.

$$X = \frac{m_p}{m_g} \quad (4)$$

Stopień zawilżenia jest bezwymiarowy. Jednakże niekiedy używa się sztucznego wymiaru kg wilgoci/ kg gazu suchego.

Parametrem związanym ze stanem termicznym gazu wilgotnego jest tzw. *temperatura punktu rosy*  $t_R$ . Jest to temperatura, do której należy ochłodzić izobarycznie gaz wilgotny przy  $X = \text{idem}$ , by uzyskać gaz nasycony wilgocią ( $\varphi = 1, X = X''$ ). Przy takim ochłodzeniu nie zmienia się ciśnienie cząstkowe pary ( $p_p = \text{idem}$ ), natomiast wraz ze spadkiem temperatury maleje ciśnienie nasycenia i dla  $t = t_R, p_p = p_s(t_R)$ . Pomiar temperatury  $t$  gazu wilgotnego i temperatury punktu rosy  $t_R$  umożliwia obliczenie wilgotności względnej:

$$\varphi = \frac{p_s(t_R)}{p_s(t)} \quad (5)$$

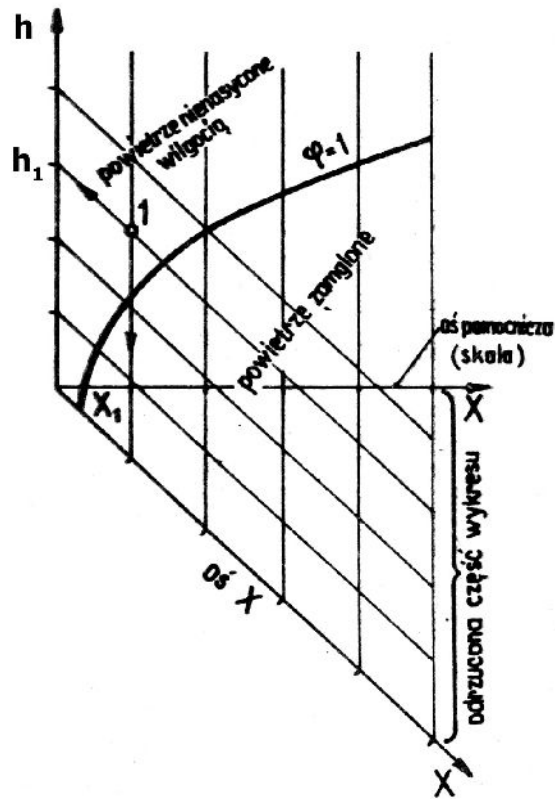


Rys. 1. Punkt rosy na wykresie p-t dla wody.

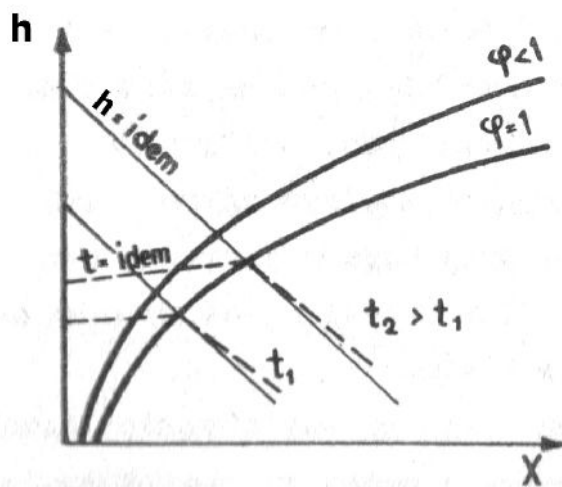
### Wykres h-X

Stan gazu wilgotnego można, podobnie jak dla innych czynników termodynamicznych, przedstawić na wykresie stanu. Stan gazu wilgotnego jest określony za pomocą trzech niezależnych parametrów stanu, gdyż ilość stopni swobody zmiany stanu jest o jeden większa w stosunku do substancji czystej (możliwość zmiany składu - zawartości wilgoci). Aby umożliwić przedstawianie stanu gazu wilgotnego na płaskim wykresie trzeba więc ustalić jeden z parametrów stanu. Najdogodniej jako parametr ten obrać ciśnienie, gdyż większość procesów, jakim podlega gaz wilgotny, przebiega przy stałym lub przy prawie stałym ciśnieniu, równym ciśnieniu atmosferycznemu. Jako współrzędne tego izobarycznego wykresu przyjmuje się entalpię właściwą  $h$  i stopień zawilżenia  $X$ . Ciśnienie, dla którego jest sporządzony wykres na ogół równe 1 bar lub 1 atm.

Linia  $\varphi=1$  (100%) rozdziela wykres  $h$ - $X$  na dwa obszary: gazu nienasyconego wilgocią i gazu zamglonego. Z uwagi na zastosowania praktyczne najbardziej interesujący jest obszar gazu nienasyconego wilgocią. By obszar ten odpowiednio wyeksponować sporządza się wykres we współrzędnych ukośnokątnych, a następnie odrzucamy zbędną część obszaru gazu zamglonego przenosząc skalę z właściwości osi  $X$  na oś pomocniczą.



Rys. 2. Ukośnokątny wykres  $h$ - $X$



Rys. 2a. Wykres  $h$ - $X$ .

Przy tym obcięciu wykres  $h$ - $X$  tylko z pozoru wygląda jak prostokątny. Należy o tym pamiętać przy odczytywaniu entalpii - z danego punktu trzeba poprowadzić odnoszącą w kierunku osi  $h$ , równoległą do właściwej (ukośnej) osi  $X$ . Na rysunku 2 pokazano przebieg linii  $\varphi=\text{idem}$  i  $t=\text{idem}$  na wykresie  $h$ - $X$ .

## Przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza

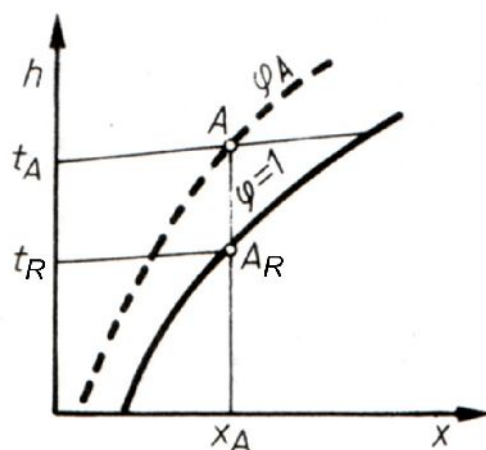
### Higrometry absorpcyjne (grawimetryczne)

W higrometrach tego typu wilgotność powietrza oznacza się metodą bezwzględną drogą pochłaniania pary wodnej z powietrza przez dowolny osuszacz i pomiar ilości tej pary oraz ilości powietrza suchego użytego do analizy. Higrometry absorpcyjne są zbyt skomplikowane i kłopotliwe w użyciu do praktycznego zastosowania w technice cieplnej - służą natomiast do pomiarów laboratoryjnych oraz jako przyrządy wzorcowe.

### Higrometry kondensacyjne

Higrometry tego typu są przyrządami opartymi na pomiarze tzw. temperatury punktu rosy, czyli temperatury, w której rozpoczyna się proces kondensacji pary wodnej z powietrza na gładkiej metalowej lub szklanej powierzchni (tzw. lustrze) - powierzchnia ta musi być chłodzona. Chłodzenie powierzchni można uzyskać np. poprzez efekt Peltiera - chłodzenie termoelektryczne.

Proces kondensacji pary wodnej z powietrza odbywa się przy stałej zawartości wilgoci ( $X=\text{idem}$ ). Określenie stanu powietrza na wykresie  $h$ - $X$  przedstawiono na rys. 2b.



Rys. 2b. Wyznaczanie wilgotności względnej  $\varphi$  na wykresie  $h$ - $X$  wg wskazań higrometru kondensacyjnego.

gdzie:

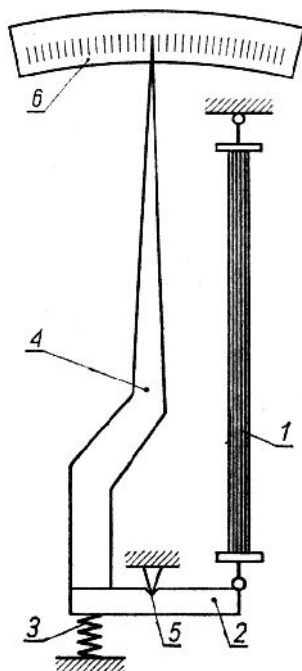
- $t_A$  temperatura badanego powietrza
- $t_R$  temperatura punktu rosy
- $\varphi_A$  wilgotność względna badanego powietrza.

### Higrometry oparte na działaniu higroskopowym

Działanie tych higrometrów oparte jest na zasadzie zmian pewnych własności ciał, zależnych od zmian wilgotności powietrza.

### Higrometry włosowe

Przyrządy te oparte na własnościach włosów ludzkich lub zwierzęcych oraz niektórych włókien syntetycznych, podlegających na zmianie ich długości pod wpływem zmian wilgotności powietrza. Schemat higrometru włosowego przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Schemat higrometru włosowego

Przyrządy te odznaczają się prostotą w budowie oraz działaniu i dlatego znajdują się w powszechnym użyciu - wymagają jednak okresowego sprawdzania i regulacji.

### Psychrometry

Przyrządy te (aczkolwiek nie pozwalają na bezpośrednie odczyty wilgotności względnej powietrza) są proste, tanie i wygodne w użyciu; dlatego też są najczęściej stosowane w praktyce.

### Zasada działania psychrometrów.

Każdy psychrometr składa się z 2 jednakowych termometrów: tzw. suchego i mokrego. Naczynie termometru mokrego owinięte jest koszulką z gazy lub batystu, zwilżoną wodą destylowaną.

Podstawą pomiaru jest założenie, że w warstwie powietrza graniczącego bezpośrednio z naczyniem termometru mokrego ustali się stan nasycenia powietrza parą wodną. Na skutek różnicy ciśnień cząstkowych pary wodnej w tej warstwie granicznej i w dalszych warstwach

powietrza będzie miało miejsce parowania wody z gazy termometru mokrego. Parowanie to obniży temperaturę powietrza naokoło naczynia termometru mokrego, który z tego powodu wskazuje temperaturę niższą niż suchy. Różnica wskazań termometru suchego i mokrego nazywa się różnicą psychrometryczną. Różnica ta jest tym większa im powietrze jest bardziej suche; w powietrzu nasyconym oba termometry wskazują jednakową temperaturę.

Znając temperaturę termometru suchego  $t_s$  [°C] i temperaturę termometru mokrego  $t_m$  [°C] można oznaczyć wilgotność względną powietrza ze wzoru

$$\varphi = \frac{p}{p_{ss}} = \frac{p_{sm} - A \cdot (t_s - t_m) \cdot p_b}{p_{ss}} 100\% \quad (6)$$

gdzie:

- $p$  ciśnienie cząstkowe pary w badanym powietrzu;
- $p_{sm}$  ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru mokrego  $t_m$ ;
- $p_{ss}$  ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru suchego  $t_s$ ;
- $p_b$  ciśnienie barometryczne w chwili pomiaru.

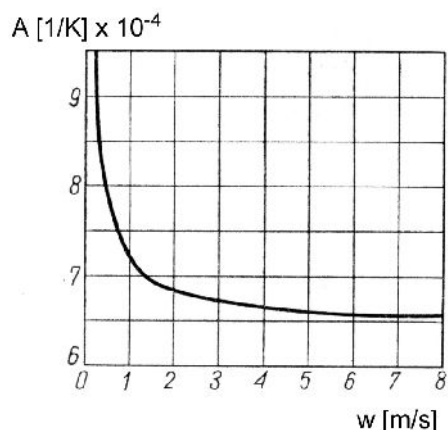
Współczynnik  $A$  nazywa się współczynnikiem psychrometrycznym albo stałą psychrometryczną. Zależy on od współczynników, które są funkcjami prędkości przypyływu powietrza. Na podstawie licznych badań ustalono empiryczny wzór

$$A = \left(65 + \frac{6,75}{w}\right) 10^{-5} \quad (7)$$

gdzie:

- $w$  prędkość powietrza w pobliżu naczynia termometru mokrego, [m/s]
- $A$  Stała psychrometryczna, [1/K]

Jak widać, dla określenia wilgotności względnej powietrza nie wystarczy znajomość temperatur wskazanych przez psychrometr  $t_s$  i  $t_m$ , lecz trzeba jeszcze znać prędkość przepływu powietrza dookoła naczynia termometru mokrego.

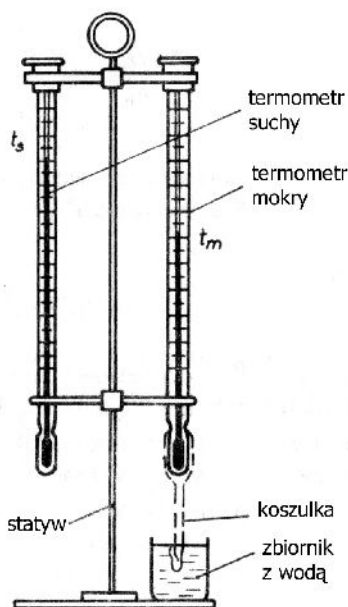


Rys. 4. Wykres zależności stałej psychrometrycznej  $A$  od prędkości przepływu powietrza  $w$ .

Z wykresu  $A=f(w)$  (Rys. 4) widać, że im mniejsza szybkość przepływu powietrza, tym większe są zmiany wielkości  $A$ . Odnosi się to zwłaszcza do szybkości poniżej 1 m/s. Wynika stąd praktyczny wniosek, że wokół naczynia termometru mokrego sztuczny przepływ powietrza powinien mieć prędkość tego rzędu, przy którym krzywa  $A=f(w)$  ma przebieg możliwie płaski.

#### Psychrometr Augusta.

Tak zwany psychrometr Augusta (Rys. 5) jest zestawem dwóch termometrów, z których jeden zaopatrzony jest w koszulkę i zbiorniczek wody destylowanej do jej nawilżania.



Rys. 5. Psychrometr Augusta.

Psychrometr ten nie posiada unormowanego przepływu powietrza naokoło swych termometrów - nie nadaje się więc do dokładnych pomiarów i wskazania jego należy

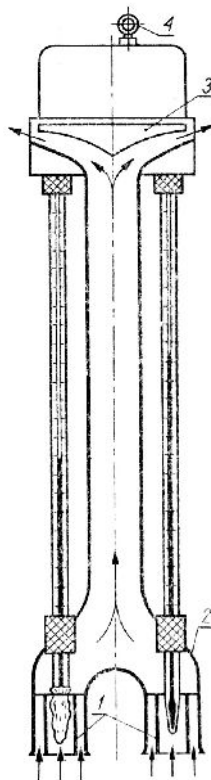


traktować wyłącznie jako orientacyjne (przy niesprzyjających warunkach błędy pomiaru mogą dochodzić do 15%).

Pomimo tych wad przyrządy te są często stosowane ze względu na ich prostotę i tanią. Przy posługiwaniu się psychrometrem Augusta zakładamy, że szybkość przepływu powietrza wokół naczynia termometru mokrego wynosi około 0,5m/s, (ruch wywołany konwekcją naturalną cząstek powietrza) - co odpowiada stałej psychrometrycznej  $A \approx 80 \cdot 10^{-5} [1/K]$ .

### 7. Psychrometr Assmanna

Psychrometr Assmanna (Rys.5a) w odróżnieniu od psychrometru Augusta posiada wymuszony przepływ powietrza dookoła obu termometrów. Przepływ ten wywołuje wentylatorek 3, napędzany przez sprężynę nakręcaną kluczem 4, lub napędzany silnikiem elektrycznym.



Rys. 5a. Psychrometr Assmanna.

Powietrze zasysane od dołu przez tulejki 1 posiada zawsze w przestrzeni obok naczyń termometrów jednakową szybkość około 2,5m/s, czemu odpowiada wartości stałej psychrometrycznej  $A=0,000677 [1/K]$ .

Psychrometry Assmanna są przyrządami prostymi w budowie i wygodnymi w użyciu, dając jednocześnie wystarczająco dokładne pomiary. Z tego powodu psychrometry Assmanna używane są powszechnie do pomiarów wilgotności względnej powietrza oraz do wzorcowania innych psychrometrów i higrometrów.

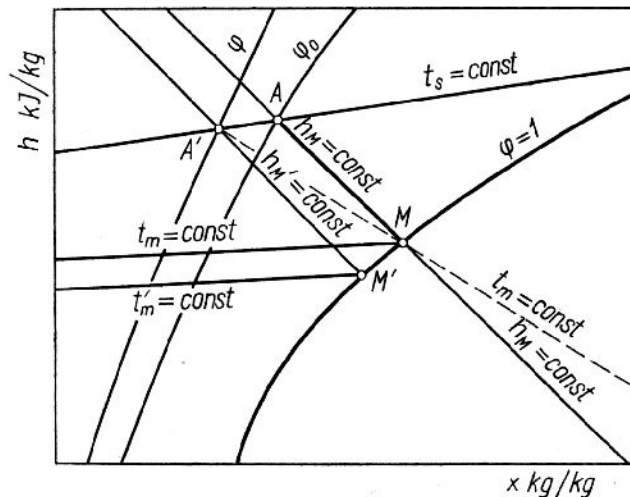
## Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na podstawie wskazań psychrometrów.

Jeśli znane są odczyty termometrów suchego i mokrego to wilgotność względna powietrza można wyznaczyć w sposób trojaki:

- obliczyć wg wzorów (6) i (7)
- odczytać z gotowych tablic lub wykresów psychrometrycznych
- odczytać z wykresu  $h$ - $X$ .

Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza  $\varphi$  przy pomocy wykresu  $h$ - $X$  przedstawia rysunek (6).

Jeśli na wykresie nie ma izoterm obszaru mgły, wartość znajdujemy drogą następującego rozumowania:



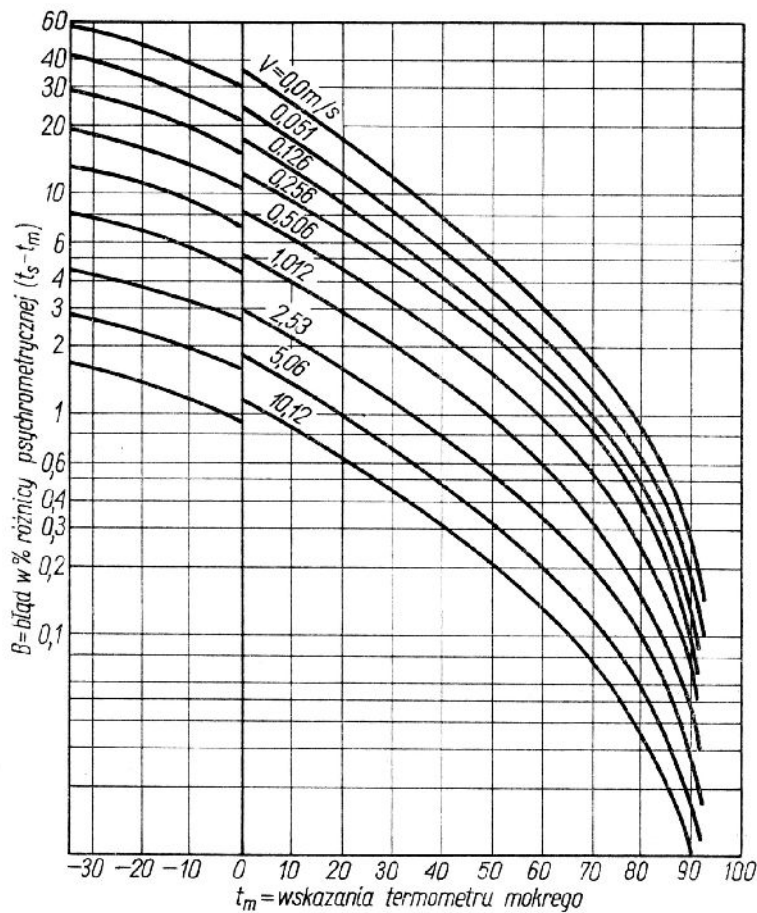
Rys. 6. Wyznaczanie wilgotności względnej  $\varphi$  wg wskazań psychrometru na wykresie  $h$ - $X$ .

Powietrze w warstwie otaczającej naczynie termometru mokrego jest nasycone parą, co stanowi podstawowe założenie pomiaru, i posiada temperaturę  $t_m$ . Stan tego powietrza można więc wyznaczyć jako przecięcie się izotermi  $t_m = \text{idem}$  i krzywej  $\varphi = 1$  (punkt M). Ciepło zużyte na odparowanie wody z koszulki termometru mokrego wraca z powrotem do powietrza w formie ciepła parowania wody. Zmiana stanu powietrza otaczającego do stanu powietrza w warstwie granicznej powinna więc zachodzić adiabatycznie przy  $h = \text{idem}$ .

Prowadząc z punktu M izentalpę  $h_M = \text{idem}$  do przecięcia z izotermą  $t_s = \text{idem}$  (temperatura wskazywana przez termometr suchy) otrzyma się jako stan powietrza otaczającego punkt A i odpowiadającą mu wilgotność względną  $\varphi_0$ .

Niedokładność w odczytach na wykresie, przyjęcie procesu nawilżania warstwy granicznej za adiabatyczny - co nie jest ściśle - oraz fakt, że ze względu na niedokładność wymiany cieplnej termometr mokry wskazuje zawsze temperaturę wyższą od temperatury pełnego nasycenia powietrza, powodują, że tak znaleziona wilgotność względna  $\varphi_0$  obarczona jest pewnym

błędem. Przy określeniu  $\phi$  wg metody (1) i (2) błąd ten kompensowany jest empirycznie określoną stałą psychrometryczną  $A$ .



Rys. 7. Wykres błędów dla wskazań psychrometrów.

Dokładny odczyt można uzyskać, znajdując błąd wskazań termometru mokrego. Do tego celu służy wykres błędów termometru mokrego w % różnicy psychometrycznej ( $t_s - t_m$ ) w funkcji prękości przepływu powietrza (Rys.7). Po znalezieniu z wykresu błędu  $B\%$  właściwą temperaturę nasycenia powietrza w warstwie granicznej  $t_m$  znajduje się ze wzoru:

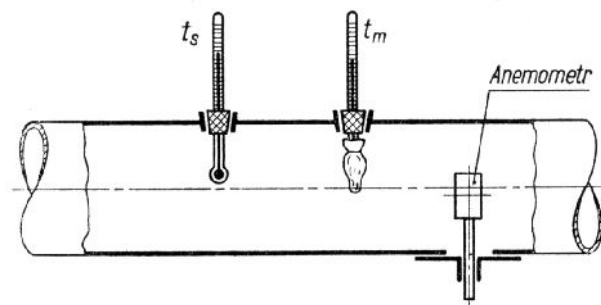
$$t'_m = t_m + \frac{B}{100}(t_s - t_m) \quad (8)$$

Rzeczywisty stan powietrza w warstwie granicznej dookoła naczynia termometru mokrego znajduje się jako przecięcie się izotermy  $t'_m = \text{idem}$  i krzywej  $\phi = 1$  (punkt  $M'$  na rys.4). Prowadząc teraz izentalpę  $h_M = \text{idem}$  do przecięcia się z izotermą  $t_s = \text{idem}$  znajdujemy rzeczywisty stan powietrza otaczającego (punkt  $A'$  na rys.6) oraz rzeczywistą wilgotność względną  $\phi$ .

## Pomiar wilgotności powietrza w kanale

---

W technice wentylacyjnej, klimatyzacyjnej oraz w suszarnictwie często dochodzi potrzeba zmierzenia wilgotności względnej powietrza, płynącego z pewną stałą szybkością wewnątrz przewodu (kanału) o przekroju okrągłym lub prostokątnym. Korzystając z tego, że przepływ powietrza w kanale jest ustalony, możemy łatwo zmierzyć jego wilgotność w sposób pokazany schematycznie na rys. 8.



Rys. 8. Schemat pomiaru wilgotności powietrza w kanale (tunelu).

Termometry suchy i mokry mocujemy w ściankach kanału w korkach gumowych lub igielitowych. Naczynie termometru mokrego owinięte jest gazą, która musi być w czasie pomiarów systematycznie nawilżana wodą destylowaną- należy więc co pewien czas wyjmować korek z termometrem mokrym i zwilżać jego koszulkę przy pomocy pipetki, względnie zaopatrzyć termometr mokry w zbiorniczek z wodą destylowaną.

Szybkość powietrza w kanale mierzymy- zależnie od zakresu tej prędkości- jednym ze sposobów pomiaru szybkości powietrza. Mając zmierzone temperatury  $t_s$  i  $t_m$  oraz szybkość powietrza w znajdujemy wilgotność względną  $\varphi$ :

ze wzorów (6) i (7)

z wykresu  $h-X$ .

## Pomiar wilgotności powietrza przy pomocy ogniwa Peltiera

---

W ćwiczeniu dokonujemy pomiaru temperatury punktu rosy przy pomocy półprzewodnikowego ogniwa Peltiera. Wytwarzając napięcie na ogniwie następuje różnicowanie się temperatur po obu stronach ogniwa. „Zimną” stronę ogniwa stanowi wypolerowana metalowa płytką a ciągły pomiar temperatury płytki umożliwia umieszczona pod nią termopara. Obserwujemy przy jakiej temperaturze  $t_R$  płytką pokrywa się mgiełką. Odczytujemy temperaturę  $t$  powietrza, po czym wyznaczamy wilgotność względną

ze wzoru (5)

z wykresu  $h-X$ .