

# BADANIE WILGOTNOŚCI GAZÓW

## NA PRZYKŁADZIE POWIETRZA

### 1. Własności powietrza wilgotnego

#### 1.1. Podstawowe definicje

Powietrze atmosferyczne jest mieszaniną zawierającą zawsze pewną ilość pary wodnej. Zawartość pary wodnej w powietrzu atmosferycznym zmienia się, a zachowanie się jej jest odmienne od pozostałych gazów (możliwość zmiany stanu skupienia) - można więc do celów praktycznych traktować powietrze atmosferyczne jako mieszaninę powietrza suchego (składającego się wyłącznie z gazów) oraz pary wodnej. Ilość pary wodnej znajdującej się w jednostce objętości powietrza nie może przekraczać pewnej wielkości maksymalnej, która jest zależna od temperatury.

**Powietrze niedosycone** jest to powietrze, które może w danej temperaturze wchłonąć pewną ilość pary wodnej, natomiast powietrze nasycone zawiera już maksymalną ilość pary wodnej w danej temperaturze.

**Ciśnienie powietrza wilgotnego** (ciśnienie barometryczne) wg prawa Daltona jest sumą ciśnień składnikowych powietrza suchego  $p_g$  oraz pary wodnej  $p_p$

$$p_b = p_g + p_p \quad (1)$$

$p_b$  - ciśnienie barometryczne,

$p_g$  - ciśnienie cząstkowe suchego powietrza,

$p_p$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej.

W powietrzu niedosyconym ciśnienie składnikowe pary wodnej  $p_p$  jest mniejsze od ciśnienia nasycenia pary wodnej  $p_p''$  w danej temperaturze. W powietrzu nasyconym parą wodną ciśnienie  $p_p$  jest równe ciśnieniu nasycenia w danej temperaturze - stan ten nazywa się punktem rosy, gdyż najmniejsze obniżenie temperatury spowoduje wykroplenie się pewnej ilości pary, powstanie mgły lub rosy.

**Wilgotność bezwzględna powietrza**  $\rho_p$  jest stosunkiem masy pary  $m_p$  do objętości  $V$  powietrza wilgotnego

$$\rho_p = \frac{m_p}{V} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2)$$

$m_p$  - masa pary wodnej, kg,

$\rho_p$  - gęstość pary wodnej,  $\text{kg} / \text{m}^3$

$V$  - objętość powietrza wilgotnego,  $\text{m}^3$ .

**Wilgotność względna powietrza wilgotnego**  $\varphi$  jest stosunkiem wilgotności bezwzględnej  $\rho_p$  do maksymalnej wilgotności bezwzględnej  $\rho_p''$  dla tej samej temperatury. Może być również określona jako stosunek ciśnienia składnikowego pary  $p_p$  do jej ciśnienia maksymalnego  $p_p''$  w tej samej temperaturze

$$\varphi = \left( \frac{\rho_p}{\rho_p''} \right) = \left( \frac{p_p}{p_p''} \right) \quad (3)$$

$\varphi$  - wilgotność względna (ułamek jednostki),

$\rho_p$  - rzeczywista gęstość pary wodnej w powietrzu,

$p_p''$  - ciśnienie pary suchej nasyconej.

W termodynamice przyjęto umownie, że wskaźnikiem '' (bis) oznacza się stany (parametry) odnoszące się do pary suchej nasyconej.

Wartości  $\rho_p''$  jako funkcji temperatury, podane są w literaturze w tablicach opisujących własności nasyconego powietrza wilgotnego (np. Zagórski – Zarys techniki cieplnej, s. 415).

**Zawartość wilgoci (stopień wilgoci) X** jest stosunkiem masy pary wodnej  $m_p$  do ilości powietrza suchego  $m_g$

$$X = \frac{m_p}{m_g} = \frac{\rho_p V}{\rho_{gs} V} = \frac{\rho_p}{\rho_{gs}} \quad \left[ \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg gs}} \right] \quad (4)$$

$m_p$  - masa pary wodnej,

$m_g$  - masa powietrza suchego.

**Parametr X** zwany jest również stopniem zwilżenia gazu.

Z równania stanu gazu mamy:

$$\frac{\rho_p}{\rho_{gs}} = \frac{p_p}{R_p T} \frac{R_{gs} T}{p_{gs}} = \frac{R_{gs}}{R_p} \frac{p_p}{p_{gs}} \quad (5)$$

W przypadku wilgotnego powietrza otrzymamy

$$X = \frac{R_{gs}}{R_p} \frac{p_p}{p_{gs}} = \frac{287}{461.9} \frac{p_p}{p_{gs}} \approx 0.622 \frac{p_p}{p_{gs}} \quad (6)$$

$R_{gs}$  - stała gazowa powietrza suchego, J/(kg·K),

$R_p$  - stała gazowa (indywidualna) pary wodnej, J/(kg·K).

Wykorzystując **prawo Daltona**

$$p_{gs} = p_b - p_p \quad (7)$$

oraz wzór definicyjny na wilgotność względną w postaci

$$p_p = \varphi p_{gs} \quad (8)$$

otrzymamy praktyczną zależność do obliczania zawartości wilgoci

$$X \approx 0.622 \frac{\varphi p_{gs}}{p_b - \varphi p_{gs}} \quad (9)$$

Ciśnienie pary nasyconej powietrza w danej temperaturze uzyskuje się z tablic lub z zależności

$$p_{gs} = 13.21 - 0.4444 \cdot t + 0.04735 \cdot t^2 \quad (10)$$

$t$  - temperatura wyrażona w °C .

Entalpią powietrza wilgotnego i o zawartości wilgoci  $x$  [kg/kg] nazywa się entalpię mieszaniny 1 kg powietrza suchego i  $x$  kg pary wodnej. Przyjmując, że dla takiej mieszaniny powietrza suchego oraz całej zawartości wilgoci w postaci cieczy w temperaturze °C entalpia równa się zeru, otrzymuje się:

$$i = c_{pg} t + x (c_{pp}'' t + r_o) \quad (11)$$

$c_{gs}$  - ciepło właściwe powietrza suchego,  $c_{gs} = 1000 \text{ J}/(\text{kg K})$ ,

$c_{pp}''$  - ciepło właściwe pary wodnej,  $c_{pp}'' = 1965 \text{ J}/\text{kg}$ ,

$r$  - ciepło parowania wody,  $r = 2500000 \text{ J}/\text{kg}$ ,

$t$  - temperatura w  $^{\circ}\text{C}$ .

Po podstawieniu stałych uzyskujemy wzór

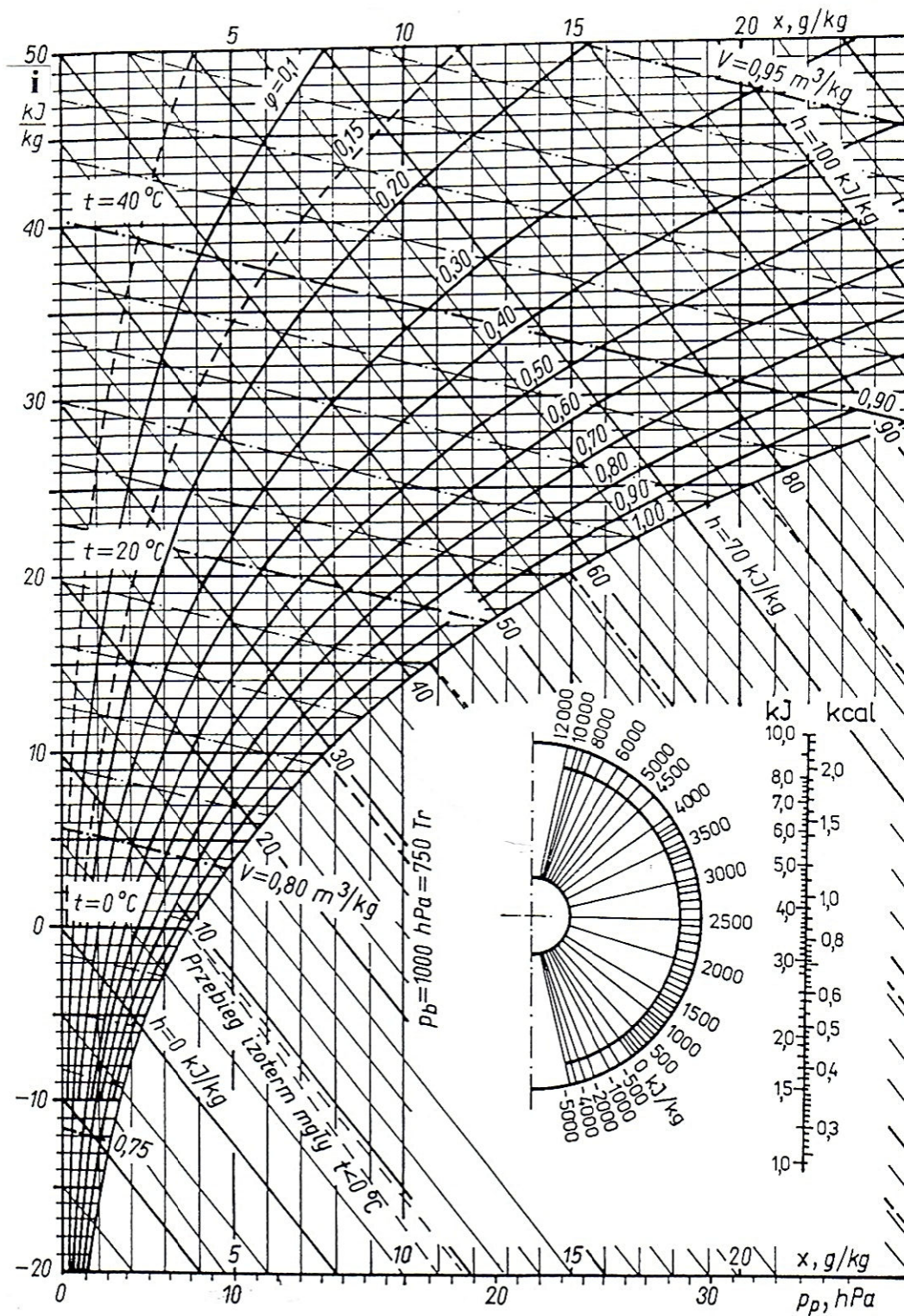
$$i = 1000 \cdot t + x (1965 \cdot t + 2500000) \quad (12)$$

## 1.2. Wykres Molliera $i - x$

W takich działach techniki, jak wentylacja, klimatyzacja, suszarnictwo, w celu obrazowego przedstawienia procesów fizycznych zachodzących w wilgotnym powietrzu oraz uproszczonego dokonywania obliczeń, powszechne zastosowanie znajdują wykresy prezentujące w sposób graficzny zależności parametrów  $t$ ,  $\phi$ ,  $i$  oraz  $x$  przy stałym ciśnieniu ( $p_b = \text{const}$ ).

Do budowy wykresu  $i - x$  (rys. 1) stosuje się ukośny układ współrzędnych. Na osi poziomej jest naniesiona skala zawartości  $x$ , w  $\text{g}/\text{kg}$  - linie stałej zawartości wilgoci są pionowe. Na lewej osi pionowej znajduje się skala entalpii  $i$ , w  $\text{kJ}/\text{kg}$  - linie stałej entalpii biegną ukośnie (zazwyczaj pod kątem  $135^{\circ}$  od osi pionowej); w prostokątnym układzie współrzędnych obszar powietrza niedosyconego wypadłby zbyt wąski.

Linie stałej wilgotności względnej  $\phi = \text{const}$ . stanowią rodzinę krzywych biegnących skośnie od lewego dolnego rogu wykresu ku górze. Krzywa  $\phi = 1$  (stan nasyce-  
nia powietrza parą) oddziela obszar powietrza niedosyconego (powyżej krzywej  $\phi = 1$ ) od obszaru mgły (poniżej krzywej  $\phi = 1$ ).



Rys. 1. Wykres  $i - x$  dla powietrza wilgotnego.

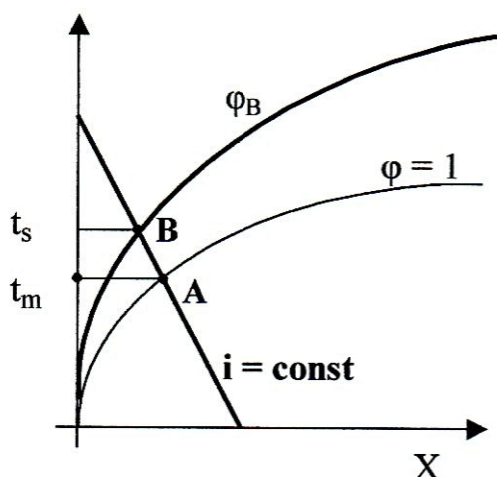
Izotermy stanowią w obszarze powietrza nienasyconego układ prostych nierównoległych, przy czym izoterma  $t = 0^\circ\text{C}$  w obszarze powietrza nienasyconego jest pozioma.

Na linii nasycenia  $\phi = 1$  izotermy ulegają załamaniu i w obszarze mgły są układem prostych prawie równoległych do **izentalp**.

Ponieważ przyjęto, że entalpia 1 kg powietrza suchego dla  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  równa się zero, więc linie  $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  oraz  $i = 0$  przecinają się na lewej osi pionowej.

Sposób określania wilgotności jest następujący (rys. 2):

1. Szukamy **wartości entalpii**  $i_p$  dla powietrza nasyconego wilgocią, czyli dla wartości  $\phi = 1$  dla temperatury termometru mokrego (punkt A)
2. korzystając z zasady niezmienności entalpii (w psychrometrze zachodzi **proces izoentalpowy**) szukamy dla temperatury termometru suchego punktu **B** =  $f(i_p; t_s)$
3. według położenia punktu B odczytujemy wilgotność względną  $\phi_B$  i zawartości wilgoci  $x$  (lub X).



**Rys. 2.**  
Wyznaczanie wilgotności względnej  $\phi_B$   
z wykresu Molliera

## 2. Pomiar wilgotności powietrza

W zależności od budowy i zasady działania przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza można podzielić na: **higrometry**, **psychrometry**.

### 2.1. Higrometry

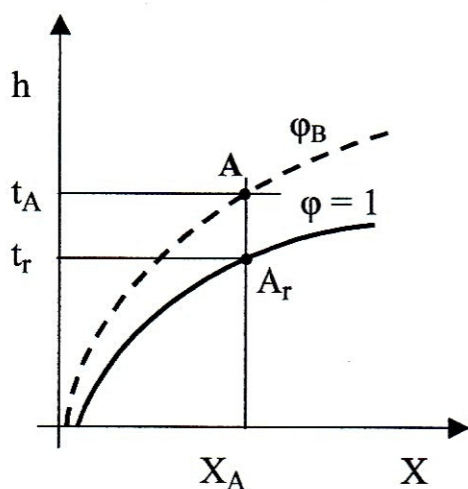
#### Higrometry absorpcyjne (grawimetryczne)

Pomiar polega na pochłanianiu pary wodnej z powietrza przez materiał absorbujący i wyznaczaniu wilgotności bezwzględnej. Jest to metoda skomplikowana i kłopotliwa, używana do wzorcowania i w pomiarach laboratoryjnych.

### Higrometry kondensacyjne

Wykorzystano tu pomiar **temperatury punktu rosy**, tj. temperatury początku kondensacji pary wodnej na chłodnej powierzchni metalowej lub szklanej (lustro higrometru). Efekt chłodzenia powierzchni można uzyskać przez parowanie cieczy łatwoprzających (**higrometr Daniella**), adiabatyczne rozprężenie gazu, efekt Peltiera - chłodzenie termoelektryczne.

Proces kondensacji pary wodnej z powietrza odbywa się przy stałej zawartości wilgoci ( $x = \text{const}$ ). Określenie stanu powietrza na wykresie  $h - x$  przedstawiono na rys. 3.



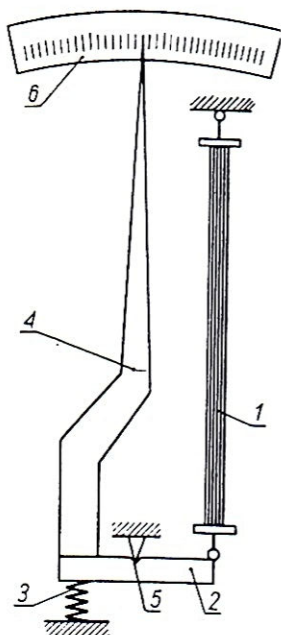
**Rys. 3.**

Wyznaczanie wilgotności względnej  $\varphi$  na wykresie  $h - x$  wg wskazań higrometru kondensacyjnego;  $t_A$  - temperatura badanego powietrza,  $t_r$  - temperatura punktu rosy,  $\varphi_A$  - wilgotność względna badanego powietrza.

### Higrometry włosowe

Wykorzystano tu własności włosów ludzkich, zwierzęcych oraz niektórych włókien syntetycznych polegające na zmianie ich długości pod wpływem zmian wilgotności powietrza. Schemat higrometru włosowego przedstawiono na rys. 4

Ze względu na prostotę budowy i działania higrometry włosowe są powszechnie stosowane. Dokładność pomiaru zawiera się w granicach  $\pm 3\%$ , przy zakresie pomiarowym  $30 \div 100\%$  wilgotności względnej.



**Rys. 4.**

Schemat higrometru włosowego: 1 - wiązka włosów odtłuszczonych, 2 - dźwignia, 3 - sprężyna dźwigni, 4 - wskazówka, 5 - punkt podparcia dźwigni, 6 - skala

Higrometry z włosem ludzkim mają następujące wady:

- występowanie zjawiska histerezy,
- konieczność starannego odtłuszczenia włosów,
- zakres stosowania tylko w temperaturze do 50 °C,
- konieczność okresowej regeneracji.

Higrometry z włókien syntetycznych mogą być stosowane w temperaturze do 120 °C i nie wymagają regeneracji. Nie wymagają również regeneracji higrometry pracujące na zewnątrz pomieszczeń.

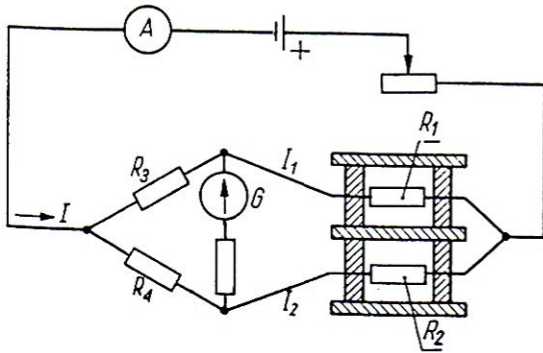
Zaletą higrometrów włosowych jest możliwość pomiaru wilgotności powietrza w temperaturze poniżej 0 °C oraz bardzo mały wpływ temperatury na krzywą wzorcowania.

Higrometry rejestrujące w sposób ciągły zmianę wilgotności powietrza to higrografy, a regulujące wilgotność powietrza to higrostaty (styki elektryczne wartości maksymalnej i minimalnej).



## Higrometry, których budowę oparto na zasadzie zmiany przewodnictwa ciepłego powietrza

W układzie elektrycznego mostka Wheatstone'a (rys. 5) występują rezystory  $R_1 = R_2$ ;  $R_3 = R_4$  (spirale platynowe).



**Rys. 5.** Schemat higrometru działającego na zasadzie zmiany przewodnictwa ciepłego wilgotnego powietrza:  $R_1 = R_2$  - rezystory (spirale platynowe),  $R_3 = R_4$  - rezystory, G - galwanometr, A - amperomierz

Zmiana wilgotności powietrza wokół rezystora  $R_1$  lub  $R_2$  powodują zmianę temperatury spirali rezystora na skutek zmiany przewodnictwa ciepłego wokół rezystora. Wskazówka galwanometru wychyli się, gdy  $R_1 \neq R_2$ . Wychylenie można wyskalować w % wilgotności względnej.

### Higrometry pojemnościowe

Zasada działania jest oparta na pomiarze admitancji (pojemności) pomiarowej warstwy higroskopijnej. Czujnik jest kondensatorem o złotej i aluminiowej porowatej elektrodzie. Charakteryzuje się dużą stałością charakterystyki przy zmianach temperatury oraz małą bezwładnością wskazań.

### Higrometry rezystancyjne

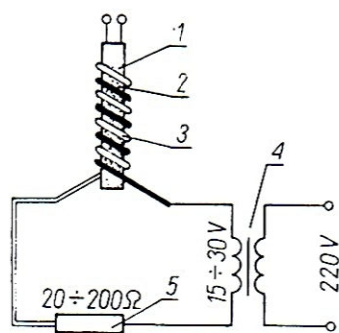
Czujniki tych higrometrów składają się z elektrod rozdzielonych warstwą higroskopijną zmieniającą przewodność elektryczną przy zmianie wilgotności powietrza. Higrometry rezystancyjne można podzielić na dwie grupy:

- **higrometry z czujnikami elektrolitycznymi:** elektrody umieszczone w elektroliście (nienasycone roztwory soli lub kwasów); zmiana wilgotności powietrza powoduje zmianę stężenia elektrolitu; wartość wilgotności względnej  $\varphi$  odczytuje się na odpowiednio wyskalowanym amperomierzu.

- **higrometry z czujnikami sorpcyjnymi:** na warstwie higroskopijnej następuje pochłanianie wilgoci z otoczenia; dyfundująca woda powoduje spadek przewodnictwa elektrycznego warstwy.

### Higrometry z ogrzewanymi czujnikami

Czujnikiem pomiarowym najczęściej jest termometr rezystancyjny (rys. 6) z umieszczoną na nim tkaniną z włókna szklanego nasyconą roztworem chlorku litu i nawiniętymi dwiema elektrodami.



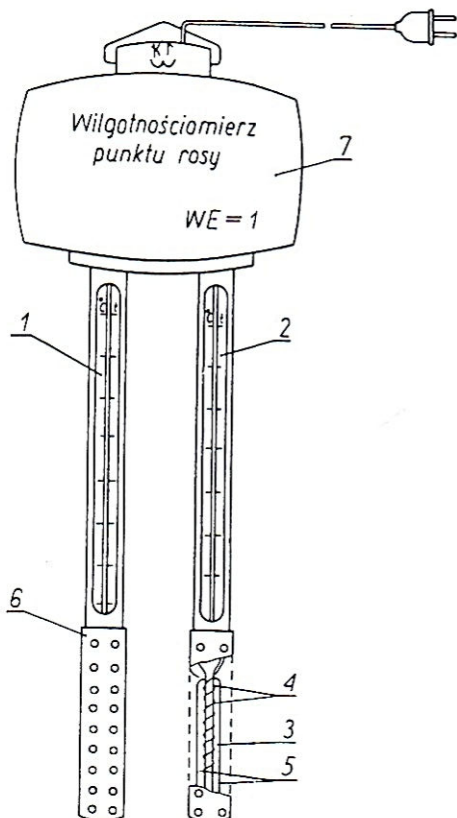
**Rys. 6.**

Schemat ideowy higrometru chlorolitowego: 1 - czujnik termometru rezystancyjnego, 2 - włókno szklane nasycone wodnym roztworem chlorku litu (LiCl), 3 - elektrody, 4 - transformator, 5 - rezystor rozruchowy.

Napięcie przyłożone do elektrod powoduje przepływ prądu przez elektrolit, wskutek czego temperatura czujnika wzrasta do chwili osiągnięcia temperatury przemiany. Ciśnienie składnikowe pary wodnej nad powierzchnią elektrolitu wzrasta, powodując odparowanie wody z roztworu do otaczającego powietrza i zmniejsza przewodność elektryczną. Wskutek tworzenia się kryształów chlorku litu (LiCl) o własnościach higroskopijnych, przerywa się przepływ prądu, powodując ochłodzenie czujnika. To z kolei powoduje absorpcję wilgoci z powietrza i ponowne ogrzewanie czujnika. Proces ten powtarza się aż do ustalenia się stanu równowagi w temperaturze przemiany, odpowiadającej temperaturze punktu rosy, w której nie występuje wymiana wilgoci między chlorkiem litu a otoczeniem. Znając temperaturę punktu rosy i temperaturę powietrza można określić wilgotność względną powietrza.

Czujniki chlorolitowe są stosowane w zakresie temperatury  $- 20 \div + 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej  $10 \div 100 \%$ .

Na rys. 7 pokazano higrometr punktu rosy ze szklanymi termometrami.



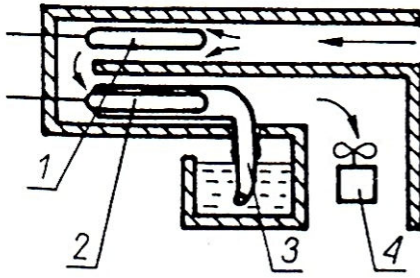
**Rys. 7.**

Higrometr punktu rosy ze szklanymi termometrami: 1 - termometr temperatury powietrza, 2 - termometr punktu rosy, 3 - zbiornik rtęci termometru punktu rosy, 4 - elektrody metalowe, 5 - warstwa włókna azbestowego, 6 - osłona perforowana, 7 - obudowa

## 2.2. Psychrometry

**Psychrometr** jest klasycznym przyrządem do pomiaru wilgotności powietrza umożliwiającym osiągnięcie największej dokładności pod warunkiem właściwego użytkowania.

Psychrometr przedstawiony na rys. 8 składa się z dwóch termometrów, tzw. **termometru suchego i termometru mokrego**. Termometr suchy wskazuje temperaturę powietrza, a termometr mokry, którego czujnik jest owinięty higroskopijną koszulką zwilżaną wodą destylowaną, tzw. temperaturę termometru mokrego.



Rys. 8.

Zasada działania psychrometru: 1 - termometr suchy, 2 - termometr mokry, 3 - koszulka higroskopijna, 4 - wentylator

Podstawą pomiaru jest założenie, że w warstwie powietrza graniczącego bezpośrednio z termometrem mokrym ustali się stan nasycenia powietrza parą wodną. Na skutek różnicy ciśnień składnikowych pary wodnej w tej warstwie i otaczającym powietrzu nastąpi parowanie wody z higroskopijnej warstwy termometru mokrego i ochłodzenie czujnika do temperatury odpowiadającej granicy ochłodzenia. Różnicę wskazań termometru suchego i mokrego nazywa się **różnicą psychrometryczną**. Jest ona tym większa, im powietrze otaczające jest bardziej suche. W powietrzu nasyconym ( $\varphi = 100\%$ ) oba termometry wskazują jednakową temperaturę.

Ciepło pobrane od powietrza na odparowanie wody z koszulki termometru mokrego, przy ustalonej wymianie ciepła i swobodnym dopływie masy, wraca do powietrza w postaci ciepła parowania wody. Można przyjąć, że proces ten jest zbliżony do adiabatycznego, tzn. zachodzi bez wymiany ciepła z otoczeniem. Znając temperaturę termometru suchego  $t_s$  (która jest równa temperaturze badanego powietrza) i temperaturę termometru mokrego  $t_m$ , można wyznaczyć z dostateczną dokładnością wilgotność powietrza dla temperatury do  $50\text{ }^\circ\text{C}$  ze wzoru Sprunga:

$$\varphi = \frac{p_p}{p_{ps}} = \frac{p_{pm} - A(t_s - t_m)p_b}{p_{ps}} 100\% \quad (13)$$

gdzie:  $p_p$  - ciśnienie składnikowe pary wodnej w badanym powietrzu, Pa;  $p_{pm}''$  - ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru mokrego;  $p_{ps}''$  - ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze termometru suchego, Pa;  $p_b$  - ciśnienie barometryczne w chwili pomiaru, Pa;  $t_s$  - temperatura termometru suchego,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_m$  - tempera-

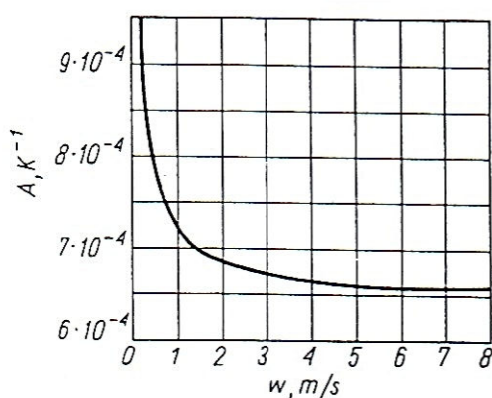
tura termometru mokrego,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A$  - stała psychrometryczna lub współczynnik psychrometryczny,  $^{\circ}\text{C}^{-1}, \text{K}^{-1}$ .

**Stała psychrometryczna** jest zależna od rodzaju gazu, prędkości przepływu gazu wokół czujnika termometru mokrego, temperatury termometru mokrego oraz od konstrukcji psychrometru. Na podstawie badań ustalono empiryczny wzór dla powietrza:

$$A = \left( 65 + \frac{6.75}{w} \right) 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad (14)$$

gdzie:  $w$  jest prędkością przepływu powietrza wokół czujnika termometru mokrego,  $\text{m/s}$ .

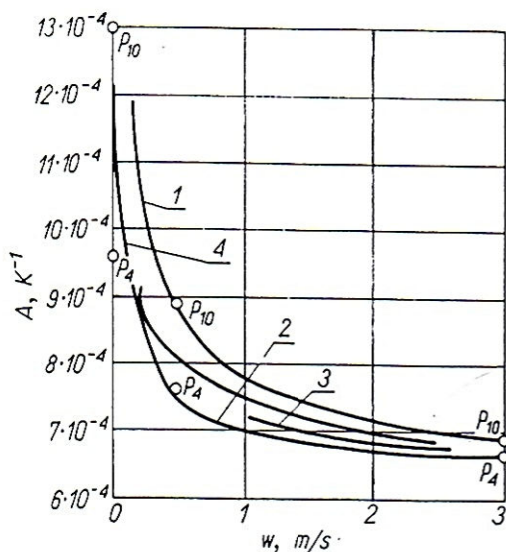
Zależność  $A = f(w)$  przedstawiono na rys. 9.



**Rys. 9.**

Wykres zależności stałej psychrometrycznej od prędkości przepływu powietrza  $A = f(w)$

Badania przeprowadzone w ostatnich latach wykazały, że wartość stałej psychrometru  $A$  zależy nie tylko od prędkości przepływu powietrza, ale i od konstrukcji psychrometru (wymiarów i kształtu czujnika - zbiorniczka cieczy termometrycznej) oraz w mniejszym stopniu od temperatury, ciśnienia i wilgotności badanego powietrza. Na rys. 10 przedstawiono wyniki badań zmiany stałej psychrometrycznej.



**Rys. 10.**

Zależność stałej psychrometrycznej od prędkości przepływu powietrza wg: **Zworykina** (krzywa 1- zbiorniczki kuliste  $\phi$  10 mm, krzywa 2- zbiorniczki cylindryczne  $\phi$  4 mm, długość 8 mm); **Łykowa** (krzywa 3 - zbiorniczki cylindryczne  $\phi$  4 mm, długość 8 mm); **Yamarumoto** (krzywa 4 - zbiorniczki kuliste  $\phi$  9 mm), **Pusanowa** (punkty  $P_{10}$  - zbiorniczki kuliste  $\phi$  10 mm, punkty  $P_4$  - zbiorniczki cylindryczne  $\phi$  4 mm, długość 8 mm)

W niskich temperaturach badanego powietrza woda w koszulce termometru mokrego może zamarznąć, co spowoduje pewną zmianę stałej psychrometrycznej. W związku z powyższym nie należy dokonywać pomiaru psychrometrem, gdy na koszulce termometru znajduje się jednocześnie woda i lód.

### Psychrometr Augusta

Psychrometr Augusta jest to zestaw dwóch termometrów, z których jeden jest zaopatrzone w koszulkę i zbiorniczek wody destylowanej do jej nawilżania. Psychrometr ten ma przypadkowy przepływ powietrza wokół termometrów i nie nadaje się do pomiarów dokładnych. Wskazania jego należy traktować jako orientacyjne (w niesprzyjających warunkach błędy pomiaru mogą dochodzić do 15%).

### Psychrometr Assmanna

Psychrometr Assmanna (rys. 11) ma czujniki termometrów zabezpieczone przed wpływem promieniowania oraz wymuszony przepływ powietrza z prędkością 2,5 m/s, czemu odpowiada wartość stałej psychrometrycznej  $A = 67.70 \cdot 10^{-5}, K^{-1}$ .

Psychrometry Assmanna są przyrządami prostymi w budowie, wygodnymi w użyciu i dającymi jednocześnie wystarczająco dokładne wyniki pomiarów. Używane są więc powszechnie do pomiarów wilgotności względnej powietrza oraz do wzorcowania innych psychrometrów i higrometrów.

Zakres pomiarowy: temperatura  $0 \div 50$  °C, wilgotność względna  $5 \div 95$  %. Przy

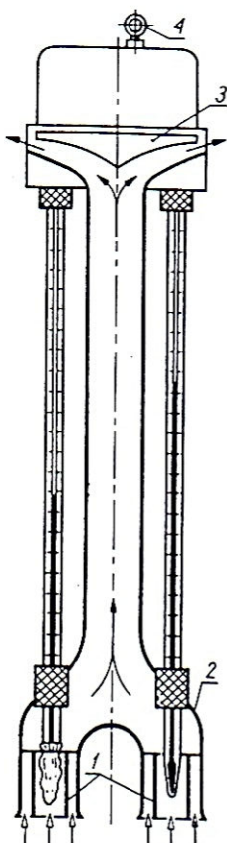
temperaturach wyższych od 50 °C rośnie błąd spowodowany nieadiabaticznym procesem nawilżania.

Jeżeli są znane odczyty termometrów suchego i mokrego, to wilgotność względną powietrza można wyznaczyć trzema sposobami:

1. Obliczając ze wzorów (13) i (14). Konieczna jest tutaj znajomość ciśnienia barometrycznego w chwili pomiaru lub przyjęcie średniej wartości dla Polski (tj. 1000 hPa). Ciśnienia nasycenia pary wodnej  $p_{ps}''$  i  $p_{pm}''$  (hPa) należy przyjąć z tablic opracowanych dla pary nasyconej lub z wykresu h-x..

Korzystając z psychrometru Augusta, dla przyjętych wielkości  $w = 0.4 \div 0.5$  m/s;  $A = 80 \cdot 10^{-5}$ ,  $K^{-1}$ ;  $p_b = 1000$  hPa mamy:

$$\varphi = \frac{p_{pm}'' - 0.8 (t_s - t_m)}{p_{ps}''} 100 \quad (15)$$



**Rys. 11.**

Psychrometr Assmanna: 1 - tulejki, 2 - osłona, 3 - wentylator, 4 - klucz do nakręcania sprężyny

Dla psychrometru Assmanna zaś dla przyjętych wielkości -  $w = 2.5 \text{ m/s}$ ;  
 $A = 67.7 \cdot 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$ ;  $p_b = 1000 \text{ hPa}$  mamy:

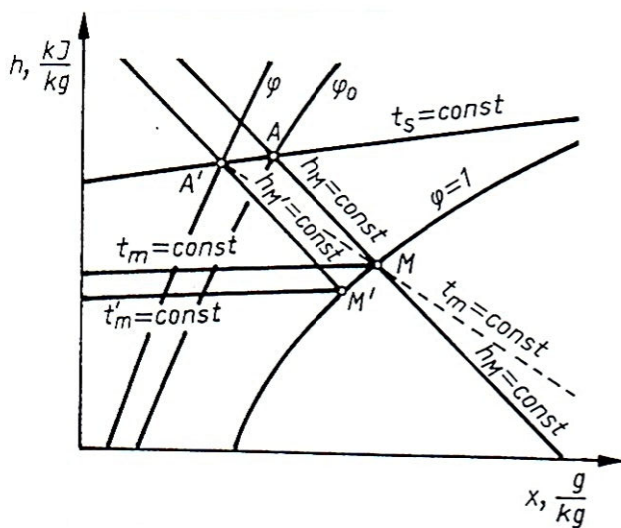
$$\varphi = \frac{p_{\text{pm}}'' - 0.68 (t_s - t_m)}{p_{\text{ps}}''} 100 \quad (16)$$

2. Odczytując z gotowych tablic lub wykresów psychrometrycznych. Przy posługiwaniu się psychrometrem Assmanna można korzystać z tablic psychrometrycznych, które opracowano dla ciśnienia  $p_b = 1007 \text{ hPa}$ , stałej psychrometrycznej: dla wody  $A_w = 50 \cdot 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$ , dla lodu  $A_L = 43 \cdot 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$  oraz dla zakresu temperatury  $-30 \text{ }^\circ\text{C} \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tablice umożliwiają wprowadzenie pewnych poprawek w zależności od aktualnego ciśnienia barometrycznego. Dla odczytanej temperatury termometru suchego  $t_s$  i różnicy psychrometrycznej  $\Delta t = t_s - t_m$  odczytuje się wilgotność względną  $\varphi$ . Przy posługiwaniu się psychrometrem można korzystać z wykresu  $\varphi = f(t_s, \Delta t)$ .

3. Wyznaczając wilgotność powietrza z wykresu  $h - x$  bądź wykresu Carrier'a.

Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na wykresie  $h - x$  pokazano na rys. 12.

Prowadząc z punktu M izentalpę  $h = \text{const}$ . do przecięcia z izotermą  $t_s = \text{const}$ . otrzyma się, jako stan powietrza otaczającego, punkt A o wilgotności względnej  $\varphi_0$ .



**Rys. 12.**

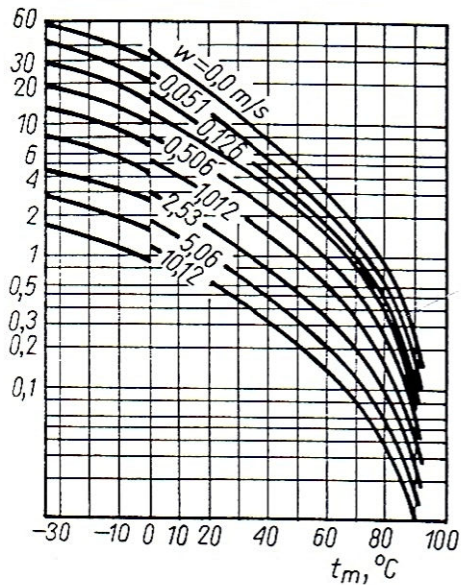
Wyznaczanie wilgotności względnej do wskazań psychrometru na wykresie  $h - x$ .



Niedokładności w odczytach wilgotności względnej  $\varphi$  na wykresie wynikają z założenia, że proces nawilżania jest adiabatyczny oraz z faktu, że termometr mokry wskazuje temperaturę wyższą ( $t_m$  nie osiąga temperatury granicy chłodzenia). Dokładny odczyt można uzyskać, znajdując błąd wskazań termometru mokrego w funkcji prędkości przepływu powietrza (rys. 13).

Znając  $t_m$  oraz w odczytuje się B, a następnie oblicza właściwą temperaturę  $t_m$  ze wzoru:

$$t'_m = t_m - \frac{B}{100} (t_s - t_m) \quad (17)$$



**Rys. 13.**  
Wykres błędów dla wskazań psychrometrów

Z przecięcia  $\varphi = 1$  i  $t'_m$  znajduje się punkt  $M'$  (rys. 12), następnie prowadząc izentalpę  $h_{M'} = \text{const.}$  do przecięcia z izotermą  $t_s$ , znajduje się punkt  $A'$  o wilgotności rzeczywistej  $\varphi$ .

Jeżeli na wykresie  $h - x$  występują izotermy obszaru mgły, wówczas z punktu  $M$  prowadzi się linię będącą przedłużeniem izotermy  $t_m$  obszaru mgły w obszar powie-

trza niedosyconego i w miejscu przecięcia z izotermą  $t_s$  znajduje się punkt A, znaleziony poprzednio przy użyciu wykresu błędów (rys. 13).

**Wykres Carriera** jest wykresem psychrometrycznym, za pomocą którego, znając temperaturę termometru suchego  $t_s$  oraz termometru mokrego  $t_m$ , można wyznaczyć w punkcie ich przecięcia wilgotność względną  $\varphi$ .

#### **Inne typy psychrometrów**

W psychrometrach zamiast termometrów rtęciowych (cieczowych) można stosować np. termometry: ciśnieniowe, rezystancyjne, termoelementy. Poza pomiarem temperatury czujniki te mogą być wykorzystane jako element sterujący, regulacyjny bądź rejestrujący wartość wilgotności względnej powietrza.