

Rozdział 4

POMIAR WILGOTNOŚCI POWIETRZA

4.1. Oznaczenia

A - współczynnik psychrometryczny;
 c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu;
 i - entalpia właściwa;
 H_m - wysokość słupa rtęci;
 m - masa;
 M - masa kilomolowa;
 p - ciśnienie;
 p_s - ciśnienie nasycenia;
 p_{ss}, p_{sm} - ciśnienia nasycenia w temperaturze odpowiednio termometru suchego i mokrego;
 q - ciepło odniesione do 1 kg czynnika;
 R - stała gazowa;
 r - ciepło parowania cieczy (wody);
 T - temperatura bezwzględna;
 t - temperatura w $^{\circ}\text{C}$;
 t_m - temperatura termometru mokrego przy pomiarze psychrometrycznym;
 t_s - temperatura termometru suchego przy pomiarze psychrometrycznym;
 w - prędkość przepływu powietrza;
 X - stopień wilgoci;
 φ - wilgotność względna;
 ρ - gęstość;
 ρ_p - wilgotność bezwzględna;;
 τ - czas;
 ψ - stopień nasycenia;

Indeksowanie:

- _g - gaz (powietrze);
- _p - para (para wodna);
- _r - punkt rosy;
- _w - ciecz (woda);
- _s lub •" - wielkości odpowiadające stanowi nasycenia (z wyjątkiem indeksowania temperatury przy pomiarze psychrometrycznym).

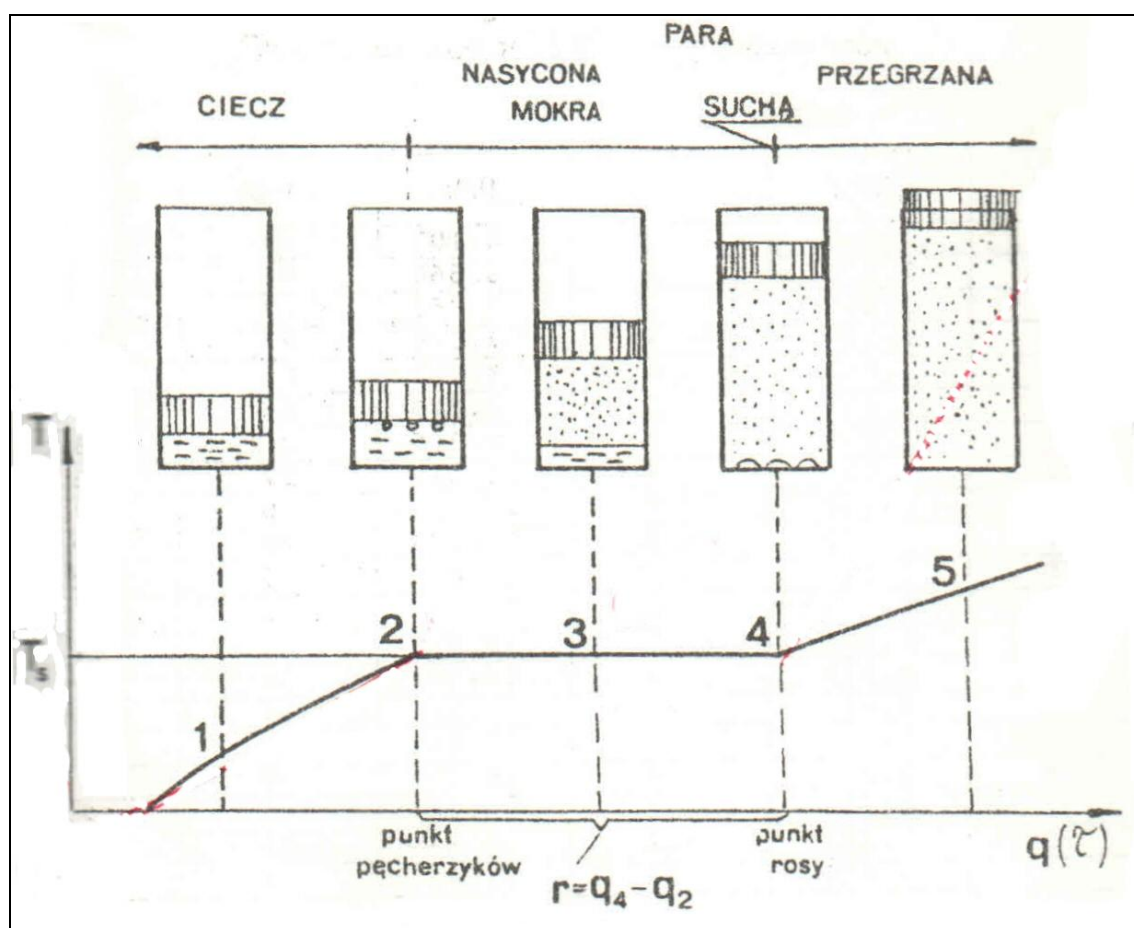
4.2. Proces parowania

W celu łatwiejszego przyswojenia terminologii dotyczącej gazu wilgotnego warto rozważyć przykład wytwarzania samej tylko czystej pary wodnej przy izobarycznym podgrzewaniu wody, aż do jej odparowania. Proces taki przebiega w cylindrze zamkniętym ruchomym tłokiem poruszającym się bez tarcia. Tłok wywiera stałe ciśnienie. Poszczególne etapy procesu zobrazowane zostały na *rysunku 4.1*. Aż do osiągnięcia **stanu nasycenia**, reprezentowanego na *rys. 4.1. punktem pęcherzyków 2*, doprowadzanie ciepła powoduje przyrost temperatury, oraz nieznaczny tylko przyrost objętości czystej cieczy. Stanowi nasycenia odpowiada punkt 2 położony na krzywej parowania na wykresie p - T (*rysunek 4.2*). Przy dalszym doprowadzaniu ciepła w cieczy pojawiają się pierwsze pęcherzyki pary. Objętość układu rośnie już dość znacznie w wyniku przybywania pary (punkt 3), natomiast temperatura pozostaje stała. Proces jest zatem procesem izobaryczno-izotermicznym.

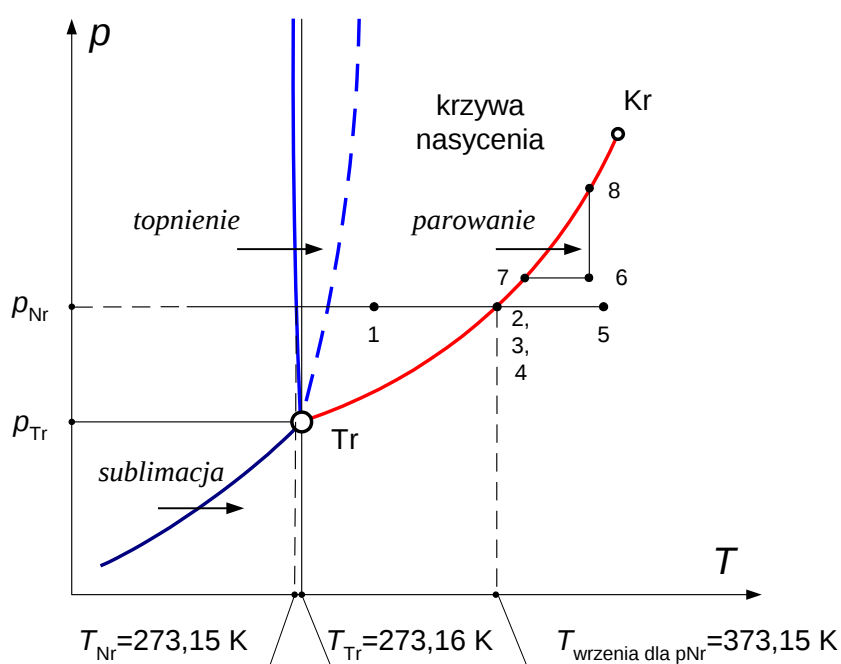
Para będąca w równowadze termodynamicznej z cieczą nazywa się **parą nasyconą**. Parę nasyconą bez kropel cieczy nazywamy **suchą** (punkt 4). Układ dwufazowy złożony z pary nasyconej suchej i cieczy o parametrach punktu pęcherzyków stanowi **parę nasyconą mokrą** (tak jak np. w punkcie 3). Stan nasycenia charakteryzuje się tym, że np. przy zwiększeniu ciśnienia część pary ulegnie skropleniu - wzrośnie zatem masa cieczy a zmniejszy pary.

Przy pobraniu dostatecznej ilości ciepła para mokra dochodzi do stanu reprezentowanego na wykresie T - $q(\tau)$ **punktem rosy** (punkt 4). W punkcie rosy zanikają ostatnie krople cieczy. Przy ochładzaniu pary, punkt rosy odpowiada oczywiście będzie stanowi w którym w gazie pojawią się pierwsze krople cieczy. Dla substancji chemicznie jednorodnej temperatura punktu rosy jest równa temperaturze **punktu nasycenia**. Stany nasycenia, od punktu 2 do 4, reprezentowane są na wykresie p - T punktami krzywej parowania, przebiegającej od punktu potrójnego do punktu krytycznego (*rys. 4.2*). Jak zatem widać temperatura stanu nasycenia, oraz temperatura rosy, są funkcjami ciśnienia. I przeciwnie - ciśnienie nasycenia jest funkcją temperatury. Zależność ciśnienia nasycenia pary wodnej od temperatury przedstawiona została w *tablicy 4.1*.

Dalsze pobieranie ciepła powoduje podwyższenie temperatury pary i przyrost objętości. Przyrost objętości jest związany ze zwiększeniem temperatury, a nie przyrostem masy gazu jak w przemianach w stanie nasycenia reprezentowanych przez odcinek 2÷4. Otrzymuje się **parę przegrzaną**. Z pary przegrzanej można uzyskać ciecz dopiero po wstępnym doprowadzeniu jej do stanu nasycenia przez zmniejszenie jej temperatury lub wzrost ciśnienia (*rys. 4.2* - punkt 6), oczywiście o ile nie została przekroczona temperatura punktu krytycznego T_K .



Rysunek 4.1. Wytwarzanie pary przy stałym ciśnieniu



Rysunek 4.2.

Wykres fazowy we współrzędnych $p - T$. Linia przerywaną zaznaczono krzywą topnienia dla substancji innej niż woda

Tablica 4.1.

Właściwości powietrza wilgotnego - zależność ciśnienia
pary wodnej p_s w hPa od temperatury t w °C

t [°C]	p_s [hPa]	t [°C]	p_s [hPa]	t [°C]	p_s [hPa]
-20	1,029	0	6,107	20	23,37
-19	1,133	1	6,566	21	24,86
-18	1,247	2	7,054	22	26,42
-17	1,369	3	7,575	23	28,08
-16	1,504	4	8,129	24	29,82
-15	1,651	5	8,719	25	31,66
-14	1,809	6	9,346	26	33,60
-13	1,981	7	10,012	27	35,63
-12	2,169	8	10,721	28	37,79
-11	2,373	9	11,473	29	40,04
-10	2,594	10	12,271	30	42,42
-9	2,833	11	13,118	31	44,91
-8	2,094	12	14,015	32	47,54
-7	3,376	13	14,967	33	50,29
-6	3,681	14	15,974	34	53,18
-5	4,010	15	17,041	35	56,22
-4	4,368	16	18,17	36	59,40
-3	4,754	17	19,36	37	62,74
-2	5,172	18	20,63	38	66,24
-1	5,621	19	21,96	39	69,91

Tablica 4.2.

Podstawowe składniki suchego powietrza na poziomie morza

Rodzaj gazu	Masa kilomolowa [kg/kmol]	Udział objętościowy	Udział masowy
N ₂	28,016	0,7803	0,7551
O ₂	32,000	0,2099	0,2315
Ar	39,944	0,0094	0,0130
CO ₂	44,003	0,0003	0,0004
Ne	20,179	0,0002	1,4·10 ⁻⁴
H ₂	2,016	0,0001	6,9·10 ⁻⁶

Masa kilomolowa suchego powietrza $M_p=28,967$ kg/kmol, stała gazowa $R_p=287,03$ J/(kgK)

4.3. Właściwości gazów wilgotnych

Gazy wilgotne to mieszaniny gazu suchego z parą wodną. Jeżeli gaz suchy wymieszany zostanie z parą przegrzaną (taką jak np. para przegrzana, której stan na *rysunkach 3.1 i 3.2* reprezentuje punkt 5), to otrzymamy **gaz wilgotny nienasycony**. Po wymieszanu gazu suchego z parą nasyconą suchą (punkt 4) otrzymuje się **gaz wilgotny nasycony**. Natomiast **gaz wilgotny przesycony** to roztwór pary nasyconej mokrej (np. punkt 3) i gazu suchego, przy czym woda w postaci ciekłej może występować jako mgła ciekła lub lodowa.

Przy opisie zawartości wilgoci w atmosferze gazem stanowiącym jeden ze składników roztworu jest **suche powietrze**. Skład suchego powietrza na poziomie morza podaje *tablica 4.2*.

Przy opisie gazu wilgotnego przyjęta zostanie następująca umowa: wskaźnik dolny '**p**' będzie sygnalizował wielkości dotyczące pary, wskaźnik '**g**' wielkości dotyczące gazu (w szczególnym przypadku powietrza) suchego, wskaźnik '**w**' wielkości dotyczące fazy skondensowanej, czyli wodnej mgły ciekłej lub lodowej, wskaźnik '**s**' wielkości odnoszące się do stanu nasycenia (z angielskiego *saturation* - nasycenie), natomiast wielkości dotyczące gazu wilgotnego nie będą miały żadnych wskaźników.

Ciśnienie powietrza wilgotnego, zgodnie z prawem Daltona [5], jest równe sumie ciśnień składnikowych gazu suchego p_g oraz pary p_p

$$p = p_g + p_p . \quad (4.1)$$

Ciśnienie składnikowe pary wodnej zawartej w gazie wilgotnym jest na ogół na tyle niskie, że para ta może być traktowana jako gaz doskonały. Błąd takiego przybliżenia nie przekracza na ogół 2% w wartościach względnych.

Ciśnienie składnikowe pary zawartej w gazie nie może przekroczyć ciśnienia nasycenia, gdyż w tym przypadku następuje skraplanie, powodujące jej ubytek. Ciśnienie nasycenia (por. *rys.4.2 i tab.4.1*) pary wodnej rośnie ze wzrostem temperatury. Oczywiście jest jednak, że nie może ono przekroczyć ciśnienia całkowitego gazu wilgotnego p . Zatem maksymalne ciśnienie składnikowe pary w gazie wilgotnym wynosi:

$p_{p \max} = p_s$ - gdy ciśnienie nasycenia pary wodnej jest mniejsze od ciśnienia roztworu ($p_s < p$); właśnie z takim stanem mamy na ogół do czynienia;

$p_{p \max} = p$ - gdy ciśnienie nasycenia pary wodnej jest większe od ciśnienia roztworu ($p_s \geq p$). W przypadku osiągnięcia wartości maksymalnej $p_{p \max}$ roztwór nie zawiera powietrza i składa się wyłącznie z pary wodnej.

Rzeczywistą zawartość pary wodnej w gazie (powietrzu) charakteryzuje **wilgotność bezwzględna (wilgoć)** gazu ρ_p , która jest stosunkiem ilości pary m_p do objętości gazu wilgotnego V

$$\rho_p = \frac{m_p}{V} = \frac{p_p}{R_p T}; \quad (4.2)$$

czyli gęstością pary przy jej ciśnieniu składnikowym p_p i temperaturze wilgotnego gazu. Wilgotność bezwzględna jest maksymalna i równa gęstości pary nasyconej suchej

$$\rho_{p\max} = \rho_p'' = \frac{p_s}{R_p T} \quad (4.3)$$

gdy ciśnienie składnikowe pary jest równe ciśnieniu nasycenia ($p_p = p_s$), tj. gdy temperatura gazu staje się równa temperaturze rosy.

Zawartość pary wodnej w powietrzu najczęściej jednak charakteryzuje się za pomocą wilgotności względnej. **Wilgotność względna** φ jest stosunkiem wilgotności bezwzględnej ρ_p do maksymalnej wilgotności bezwzględnej ρ_p'' dla tej samej temperatury. Z przytoczonych zależności (4.2) oraz (4.3) wynika, że może być określana jako stosunek ciśnienia składnikowego pary p_p do jej ciśnienia maksymalnego $p_{p\max}$ przy tej samej temperaturze

$$\varphi = \left(\frac{\rho_p}{\rho_p''} \right)_T = \left(\frac{p_p}{p_{p\max}} \right)_T; \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad (4.4)$$

Warto zwrócić uwagę na fakt, że zarówno wilgotność bezwzględna, jak i wilgotność względna, charakteryzują zawartość tylko i wyłącznie pary w gazie. Nie mówią one natomiast o łącznej zawartości wody, która może wystąpić jednocześnie i w stanie gazowym, w postaci właśnie pary, i w stanie skondensowanym w postaci mgły ciekłej lub lodowej. Stosunek łącznej ilości pary lotnej m_p i ewentualnie skondensowanej m_w do ilości gazu suchego m_g

$$X = \frac{m_p + m_w}{m_g} \quad (4.5)$$

nazywa się **stopniem wilgoci** (zawilżenia). Dla gazu wilgotnego nienasyconego $m_w=0$, a zatem

$$X = \frac{m_p}{m_g} = \frac{\rho_p}{\rho_g} = \frac{M_p p_p}{M_g p_g} = \frac{M_p}{M_g} \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}, \quad (4.6)$$

natomiast dla gazu nasyconego ($m_w=0$, $\varphi=1$)

$$X'' = \frac{M_p}{M_g} \frac{p_s}{p - p_s}. \quad (4.7)$$

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż stopień wilgoci X odpowiada wyrażonej w kg zawartości wilgoci w 1 kg suchego gazu.

Zawartość wilgoci w gazie może być również charakteryzowana poprzez **stopień nasycenia** ψ , będący stosunkiem stopnia wilgoci X do stopnia wilgoci gazu nasyconego X'' przy tej samej temperaturze T

$$\psi = \left(\frac{X}{X''} \right)_T . \quad (4.8)$$

Warto zauważyć, że w odróżnieniu od wilgotności względnej φ , stopień nasycenia ψ może być większy od jedności - to dla gazu przesyconego.

Dla gazu nienasyconego, z zależności (4.6) oraz (4.7), otrzymuje się

$$\psi = \varphi \frac{p - p_s}{p - \varphi p_s} . \quad (4.9)$$

Na ogół ciśnienie nasycenia pary zawartej w gazie p_s jest dużo mniejsze od ciśnienia gazu wilgotnego p , czyli $p_s \ll p$, co daje $\psi \approx \varphi$.

Łatwo sprawdzić, że po wprowadzeniu do opisu stopnia wilgoci X gazu nienasyconego jego stałą gazową da się przedstawić jako

$$R = \frac{R_g + XR_p}{1 + X} = \frac{R_g}{1 - \left(1 - \frac{R_g}{R_p} \right) \frac{\varphi p_s}{p}} . \quad (4.10)$$

Gęstość gazu wilgotnego jest równa sumie gęstości składników przy ich ciśnieniach składnikowych

$$\rho = \rho_g + \rho_p = \left(\frac{p_g}{R_g} + \frac{p_p}{R_p} \right) \frac{1}{T} = \frac{p_g}{R_g T} (1 + X) . \quad (4.11)$$

Przy opisie gazu wilgotnego wielkości właściwe odnosi się do stałej ilości gazu suchego. Objętość $1 + X$ kg gazu wilgotnego, czyli 1 kg gazu suchego jest równa

$$v_{1+X} = R_g \frac{T}{p_g} = R_p \left(\frac{R_g}{R_p} + X \right) \frac{T}{p} . \quad (4.12)$$

Entalpia $1 + X$ kg gazu wilgotnego nienasyconego lub nasyconego ($X \leq X''$) parą o cieple parowania r w stanie odniesienia o temperaturze T_0 wynosi

$$i_{1+X} = c_{pg}(T - T_0) + X[c_{pp}(T - T_0) + r] . \quad (4.13)$$

Dla powietrza i pary wodnej, po przyjęciu $M_p=18,015$ kg/kmol, $M_g=28,967$ kg/kmol, $R_p=461,52$ J/(kgK), $R_g=287,03$ J/(kgK), $c_{pg}=1,005$ kJ/(kgK), $r=2501$ kJ/kg przy $T_0=273,15$ K, $c_{pp}=1,88$ kJ/(kgK), otrzymuje się odpowiednio:

- stopień wilgoci powietrza:

$$X = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} ; \quad (4.14)$$

- stopień wilgoci powietrza nasyconego:

$$X'' = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} ; \quad (4.15)$$

- stałą gazową powietrza wilgotnego:

$$R = 461,5 \frac{0,622 + X}{1 + X} = \frac{287,03}{1 - 0,378 \frac{\varphi p_s}{p}} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} ; \quad (4.16)$$

- objętość $1 + X$ kg powietrza wilgotnego:

$$v_{1+X} = 461,5(0,622 + X) \frac{T}{p} \frac{\text{m}^3}{(1 + X)\text{kg}} ; \quad (4.17)$$

- entalpię $1 + X$ kg powietrza wilgotnego:

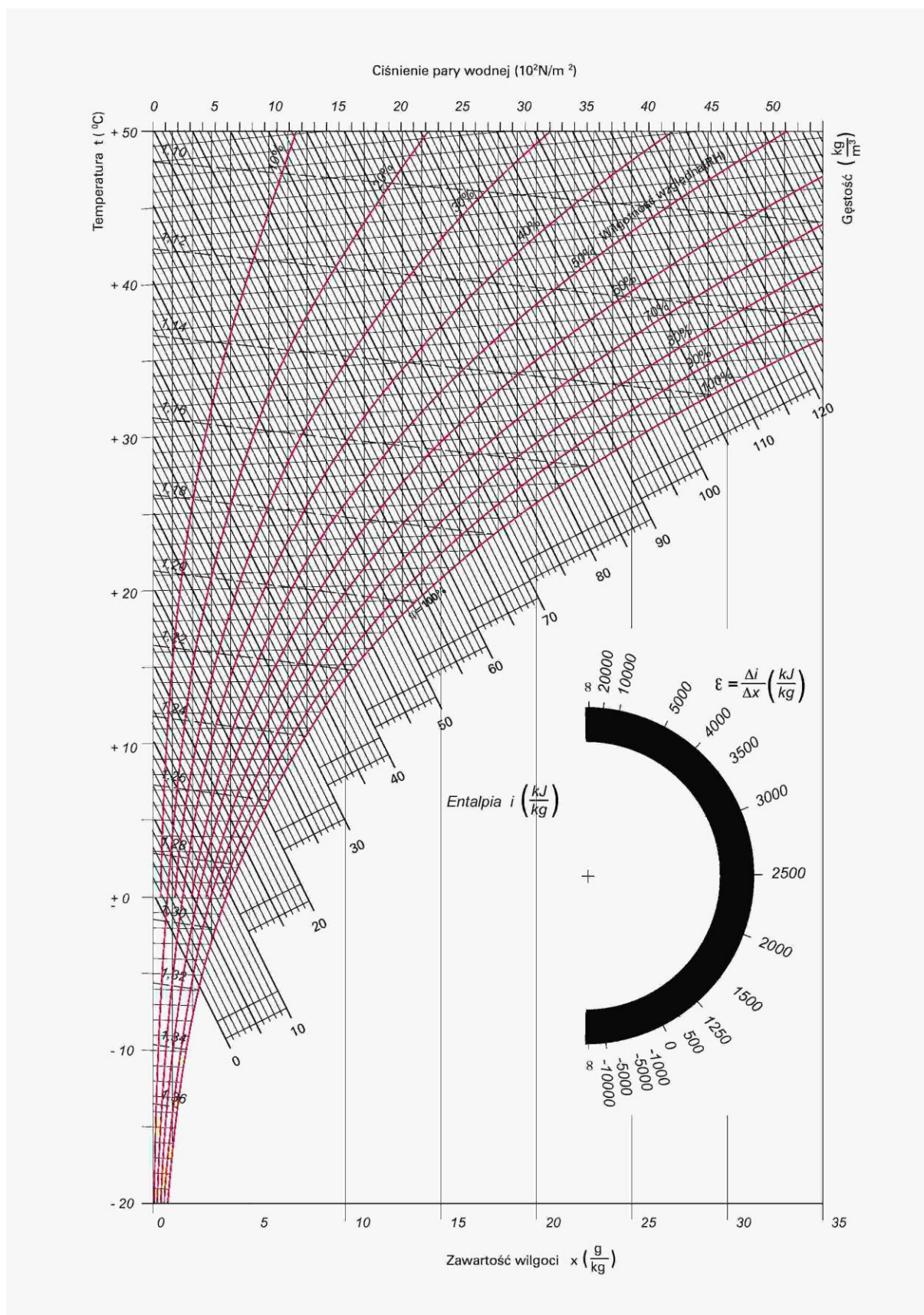
$$i_{1+X} = 1,005t + X(1,88t + 2501) \frac{\text{kJ}}{(1 + X)\text{kg}} . \quad (4.18)$$

4.4. Wykres o współrzędnych i_{1+X} - X dla powietrza wilgotnego

Obliczenia i rozważania związane z wilgotnym powietrzem mogą być bardzo dogodnie interpretowane przy posługiwaniu się wykresem wykonanym w układzie entalpia - stopień wilgoci, czyli wykresem i_{1+X} - X (rysunek 4.3). Nosi on nazwę wykresu Molliera i jest sporządzany dla jednej tylko wartości ciśnienia powietrza. W literaturze podaje się go na ogół dla ciśnienia powietrza wilgotnego $p=1000\text{hPa} \approx 750$ Tr lub $p = 1$ Kg/cm² = 735,56 Tr. Może być z powodzeniem stosowany w zakresie ciśnień różniących się o $\pm 3\%$ od tych wartości.

Entalpię i na tym wykresie oblicza się dla mieszaniny 1 kg powietrza suchego oraz X kg pary, co przedstawia następujący wzór oparty na założeniu, że entalpię oblicza się względem temperatury 0 °C ($i_0=0$; por. 4.13)

$$i = c_{pg}t + X(r + c_{pp}t), \quad (4.19)$$



Rysunek 4.3. Wykres o współrzędnych $i_1 + X - X$ (Molliera) dla wilgotnego powietrza

gdzie c_{pg} i c_{pp} oznaczają odpowiednio ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu p (stąd niezbyt fortunne pokrycie się oznaczeń indeksowych) suchego gazu i pary, a r jest ciepłem parowania wody w temperaturze 0°C . Gwoli przypomnienia można wyjaśnić, że entalpia i przedstawia w tym przypadku ciepło, jakie należy dostarczyć $1+X$ kg powietrza wilgotnego aby go ogrzać od 0°C do temperatury t : czynnik pierwszy to ciepło ogrzewania 1 kg powietrza suchego, czynnik drugi to ciepło odparowania w 0°C X kg wody i ogrzewania powstałej pary.

By nie dopuścić do zbytniego zagęszczenia się linii charakterystycznych i ułatwić odczytywanie danych, osie współrzędnych wykresu Molliera $i_{1+X} - X$ są rozchylone pod kątem 135° . Na wykresie oprócz siatki linii współrzędnych odciętych $X=\text{const}$ oraz rzędnych $i=\text{const}$, wrysowuje się izotermy $t=\text{const}$ i linie stałej wilgotności względnej $\varphi=\text{const}$. Izotermy są liniami prostymi (ze względu na przyjęcie stałych wartości ciepła właściwych), natomiast linie $\varphi=\text{const}$ są krzywymi. Najbardziej charakterystyczna jest linia $\varphi=1$. Jest to linia nasycenia powietrza. Pod linią nasycenia znajduje się obszar powietrza przesyconego czyli mgły, w którym następuje wykraplanie się wilgoci z powietrza, natomiast nad linią $\varphi=1$ położony jest obszar powietrza nienasyconego.

Pochylenie izoterm w strefie powietrza nienasyconego, tzn. nad linią nasycenia, można obliczyć wyznaczając pochodną

$$\left(\frac{\partial i_{1+X}}{\partial X} \right)_t = r + c_{pp}t. \quad (4.20)$$

Pochylenie to jest więc zmienne i zależy od temperatury, przy czym im niższą ona jest, tym pochylenie izotermy jest mniejsze.

W miejscu przecięcia się z linią $\varphi=1$ izotermy załamują się i w strefie powietrza przesyconego mają inne pochylenie. Można je określić różniczkując następujący wzór na entalpię powietrza przesyconego, w którym znajduje się wykroplona woda o masie m_w

$$i = c_{pg}t + X''(r + c_{pp}t) + X_w c_{pw}t, \quad (4.21)$$

gdzie c_{pw} jest ciepłem właściwym wody, stopień wilgoci X'' oznacza jednocześnie ilość pary wodnej odpowiadającej stanowi nasycenia, a $X_w = m_w/m_g$, czyli jest ilością wykroplonej wody przypadającej na 1 kg powietrza suchego. Pochodna tej funkcji po X będzie równa

$$\left(\frac{\partial i_{1+X}}{\partial X} \right)_t = c_{pw}t, \quad (4.22)$$

gdyż X'' zależy tylko od temperatury i ma stałą wartość; zmieniać się może jedynie X_w . Izotermy w obszarze powietrza przesyconego są zatem też liniami

prostymi i mają przebieg podobny do linii stałej entalpii. Izotermy $t > 0^{\circ}\text{C}$ przebiegają w stosunku do nich nieco łagodniej, a izotermy $t < 0^{\circ}\text{C}$ nieco bardziej stromo. Na dole wykresu jest zwykle podawana dodatkowo linia określająca zależność ciśnienia nasycenia od zawartości wilgoci.

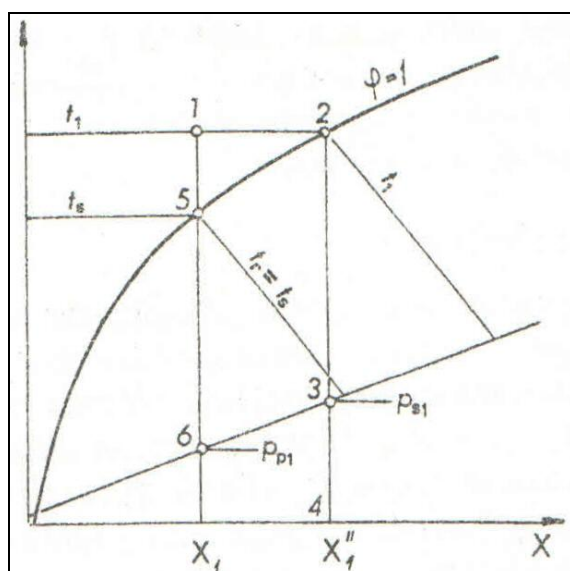
Przykłady posługiwania się wykresem Molliera.

1. Mając daną temperaturę powietrza wilgotnego t_1 można określić dla tej temperatury ciśnienie nasycenia p_s i stopień wilgoci powietrza nasyconego X'' , czyli liczbę określającą maksymalną zawartość pary wodnej. Ilustruje to rysunek 4.4 - z punktu przecięcia izotermy t_1 z linią $\phi=1$ (punkt 2) prowadzi się prostą pionową odpowiadającą stałej zawartości wody charakteryzowanej współrzędną X . Punkt przecięcia z linią "ciśnienia" 3 wyznacza ciśnienie nasycenia p_s , a punkt przecięcia z osią odciętych X stopień wilgoci powietrza nasyconego.

Z wykresu Molliera (rys.4.3), dla izotermy $t_1=22,5^{\circ}\text{C}$ (połowa odległości pomiędzy izotermami 20 i 25 $^{\circ}\text{C}$) otrzymuje się $p_{s1} \approx 2600 \text{ Pa}$ i $X'' \approx 0.0174$. Dla porównania - wartość ciśnienia nasycenia przy 22.5 $^{\circ}\text{C}$ obliczona na podstawie danych z tablicy 3.2 wynosi $p_{s1} = 2721 \text{ Pa}$.

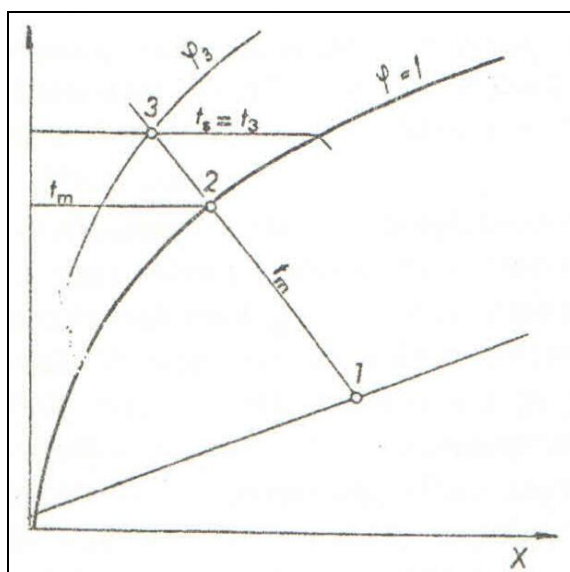
2. Przy danej temperaturze t i wilgotności względnej ϕ , lub temperaturze t i stopniu wilgoci X można odczytać z wykresu temperaturę punktu rosy t_r i ciśnienie składowe pary wodnej zawartej w powietrzu p_p . Pary danych (t, ϕ) lub (t, X) jednoznacznie określają położenie punktu na wykresie Molliera. Przecięcie prostej pionowej poprowadzonej z tego punktu (rys. 4.4, np. punkt 1) z linią $\phi=1$ (punkt 5) wyznacza temperaturę punktu rosy t_r - jest to temperatura izotermy przechodzącej przez punkt przecięcia; $t_r=t_5$. Warto zauważyć, że z fizycznego punktu widzenia proces 1 - 5 odpowiada ochładzaniu powietrza - przecinane są izotermy o coraz to niższych wartościach temperatury - przy stałej zawartości wilgoci ($X = X_1 = \text{idem}$), aż do pojawienia się pierwszych kropeł rosy przy $\phi=1$. Wraz ze zmniejszaniem się temperatury rośnie, wzdłuż odcinka 1- 5, wilgotność względna ϕ . Ciśnienie składowe wyznaczone jest następnym punktem przecięcia - na rys. 4.4 jest to punkt 6.

Przykładowo dla $t_1=22,5^{\circ}\text{C}$ i $X_1 = 0,010$ ($\phi = 0.5$) otrzymuje się z wykresu Molliera: $t \approx 13,8^{\circ}\text{C}$, $p_{p1} \approx 1240 \text{ Pa}$. Ciepło wydzielone przy ochładzaniu $1+X \text{ kg}$ (czyli 1,010 kg w danym przypadku) powietrza wilgotnego, odpowiadające różnicy entalpii i_{1+X} (dla stanu 1 wynosi ona około 48,5 kJ/kg, dla stanu 5 - około 39 kJ/kg), wynosi około 9,5 kJ/kg.



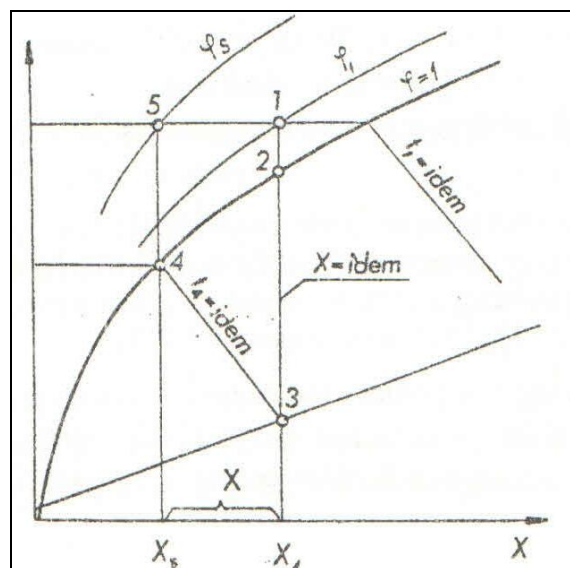
Rysunek 4.4.

Sposób odczytywania z wykresu Molliera ciśnienia nasycenia p_s i stopnia wilgoci X'' powietrza nasyconego dla danej temperatury t_1 oraz temperatury punktu rosy t_r i ciśnienia składnikowego pary p_p zawartej w powietrzu dla danych (t, X) lub (t, ϕ)



Rysunek 4.5.

Posługiwanie się wykresem Molliera przy określaniu wilgotności względnej powietrza ϕ na podstawie wyników pomiaru psychrometrycznego w postaci temperatur termometru mokrego t_m i suchego t_s



Rysunek 4.6.

Ilustracja procesu suszenia wilgotnego powietrza o parametrach początkowych określonych położeniem punktu 1 poprzez jego ochładzanie (1-3), a następnie podgrzewanie (4-5)

3. Mając wyniki pomiaru psychrometrycznego w postaci temperatur termometru suchego t_s i termometru mokrego t_m można wyznaczyć przybliżoną wartość wilgotności względnej φ , co obrazuje *rysunek 4.5*. Wilgotność względna φ określona jest punktem 3 przecięcia izotermy t_s z przedłużeniem izotermy t_m z obszaru mgły (odcinek 1 - 2 przedłużony do punktu 3).

Z wykresu Molliera dla $t_s = t_1 = 22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $t_w = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ otrzymuje się wartość wilgotności względnej $\varphi \approx 0,4$.

4. Na *rysunku 4.6* zobrazowany został proces poduszania wilgotnego powietrza, o parametrach początkowych określonych punktem 1, poprzez jego ochładzanie i związane z tym wykraplanie pary. Ochładzanie (odcinek 1 - 3) przebiega przy stałej zawartości wilgoci ($X = \text{idem}$) najpierw w obszarze powietrza nienasyconego (1-2), a potem w obszarze mgły (2-3), aż do osiągnięcia założonej temperatury minimalnej t_3 . Przy stałym stopniu wilgoci X poszczególne punkty odcinka 2-3 odpowiadają stanom przesycenia. Odcinek 3-4 obrazuje wykraplanie się wilgoci przy stałej temperaturze - stopień wilgoci maleje. Po izobarycznym podgrzaniu powietrza od punktu rosy 4 do punktu 5, odpowiadającego temperaturze początkowej ($t_5 = t_1$), otrzymuje się powietrze o mniejszej wilgotności. W wyniku osuszania wykropliło się $\Delta X = X_1 - X_5 = X_3 - X_4$ kg wilgoci na kilogram suchego powietrza, a wilgotność względna zmalała o $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_5$.

Niech $\varphi_1 = 0,4$ przy $t_1 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, oraz niech dolna temperatura chłodzenia wynosi $t_3 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z wykresu Molliera można odczytać następujące wartości: $X_1 = 0,015, X_4 = X_5 = 0,008, \varphi_5 = 0,23$. Przy takim osuszaniu wykropli się $\Delta X = 0,015 - 0,008 = 0,007$ kg wody na kilogram suchego powietrza, a wilgotność względna powietrza zmaleje z 40% do 23 %.

4.5. Higrometry

Do pomiaru wilgotności powietrza służą przyrządy zwane wilgotnościomierzami lub higrometrami. Przy ich konstruowaniu wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne, pozwalające na bezpośrednie lub pośrednie uzyskanie informacji o wilgotności ośrodka. Ze względu na przyjętą zasadę pomiaru można wyróżnić:

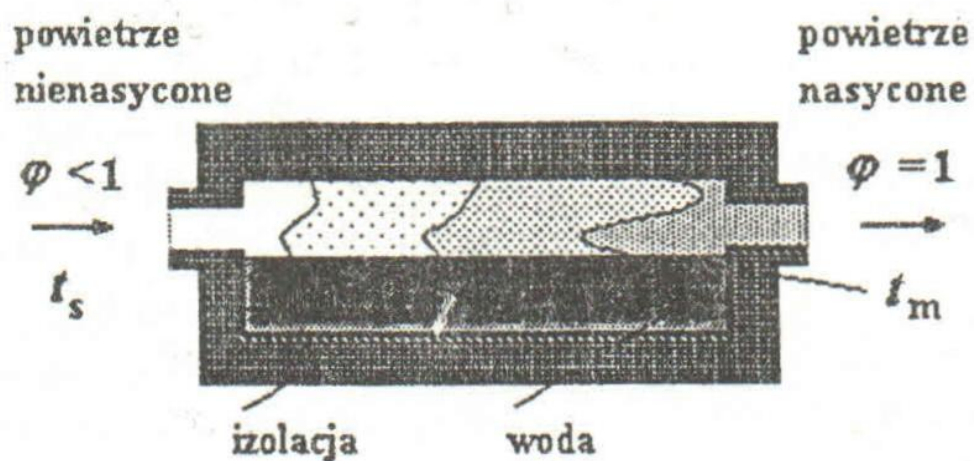
- higrometry grawimetryczne - w których dokonuje się pomiaru ilości wody zawartej w danej porcji gazu, np. poprzez określenie różnicy masy substancji higroskopijnej przed i po zadsorbowaniu wilgoci z powietrza;
- higrometry termometryczne - wilgotność oceniana jest na podstawie pomiaru temperatury. Przyrządy tego rodzaju nazywane są psychrometrami i dokładniej zostaną omówione w następnym paragrafie.

- higrometry punktu rosy - wyznacza się temperaturę rosy dla danej atmosfery i na tej podstawie oblicza wilgotność. Przy pomiarze obserwowana jest polerowana powierzchnia ochładzanego metalu. Pojawienie się na niej kropel wilgoci świadczy o osiągnięciu temperatury rosy. Ochładzania dokonuje się najczęściej poprzez odparowywanie aerozolu eterowego z powierzchni przeciwnej.
- higrometry higroskopowe - wykorzystywane są w nich zmiany właściwości mechanicznych materiałów pod wpływem zmian wilgotności. Do tej grupy zalicza się popularne higrometry włosowe, bazujące na zmianach długości odtłuszczonych włosów ludzkich lub zwierzęcych, a także niektórych włókien syntetycznych pod wpływem zmian wilgotności powietrza. Odkształcenia włosów przenoszone są przez dźwignię na wskazówkę podającą bezpośrednio na skali wilgotność względną.
- higrometry elektryczne - w przyrządach pojemnościowych bada się zmiany pojemności kondensatora, a w przyrządach przewodnościowych, pośrednio, zmiany przewodności cieplnej powietrza. Nazwa "elektryczne" jest trochę myląca w tym drugim przypadku, jednak alternatywne określenie "automatyczne" też niezbyt dobrze oddaje istotę pomiaru. Higrometry oparte na zasadzie zmiany przewodności cieplnej powietrza ze zmianą jego wilgotności mają układ elektryczny w postaci mostka Wheatstone'a, którego dwie gałęzie znajdują się w komorach zawierających powietrze suche i powietrze o badanej wilgotności.

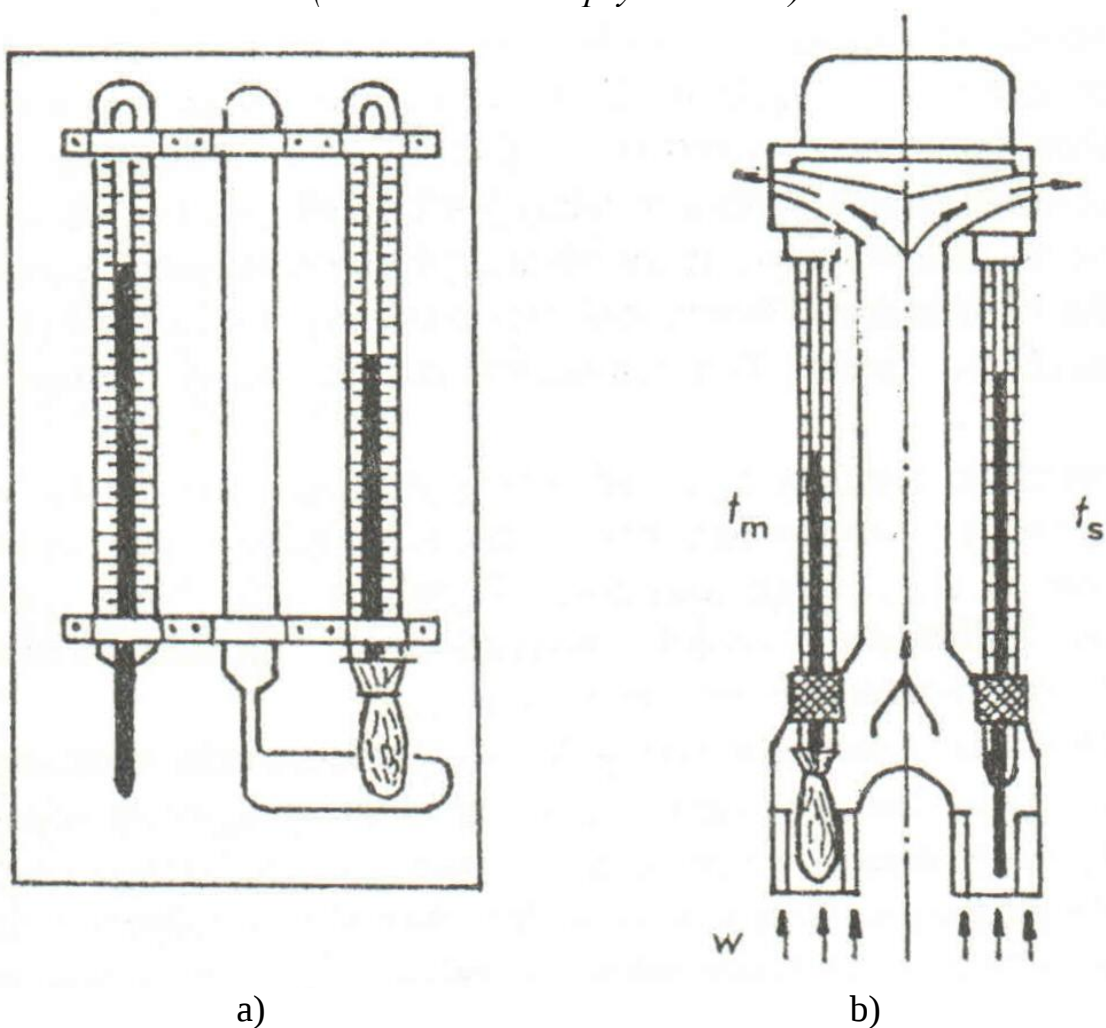
Poza powyżej wymienionymi grupami można byłoby jeszcze wspomnieć o metodach spektrometrycznych. Szczególnie szybko rozwija się ostatnio technika podczerwieni. Przyrządy tego rodzaju nie należą jednak do najtańszych i służą z reguły do globalnej analizy składu ośrodka, przy czym wilgoć jest z reguły wcześniej z niego usuwana. Najpopularniejsze w zastosowaniach pozostają higrometry włosowe i psychrometry. Higrometry włosowe są proste w budowie i bezpośrednio wskazują wielkość będącą celem pomiaru. Wadą ich jest mała dokładność i konieczność okresowego sprawdzania dokładności wskazań poprzez porównanie z innymi wilgotnościomierzami oraz odpowiedniej regulacji. Dziedzinę dokładniejszych pomiarów laboratoryjnych zdominowały zatem psychrometry.

4.6. Zasada działania psychrometrów

Psychrometry działają w oparciu o zjawisko tzw. adiabatycznego nasycania gazu wilgocią (adiabatycznego parowania). Omówione zostanie ono pokrótce na przykładzie przepływu powietrza o wilgotności względnej mniejszej od



Rysunek 4.7. Ilustracja procesu adiabatycznego nasycania gazu wilgocią (zasada działania psychrometru)



Rysunek 4.8. Psychrometry: a) Augusta; b) Assmanna

jedności, nad powierzchnią cieczy znajdującej się w izolowanym cieplnie od otoczenia zbiorniku (*rysunek 4.7*). Na początku przyjmijmy założenie, że przepływ nie występuje. Jak wiadomo, zawartość wilgoci w powietrzu będzie zależała od odległości od powierzchni wody - przy samej powierzchni wyniesie ona 100% zawartości maksymalnej. Im dalej tym wilgotność względna będzie mniejsza. Jeżeli powietrze nad powierzchnią cieczy zostanie wymienione, na przykład w wyniku przepływu, to równowaga musi zostać odbudowana poprzez uzupełnienie wilgoci w masie powietrza wprowadzonego nad powierzchnię cieczy. Uzupełnienie polegać będzie na odparowaniu wody. W wyniku parowania, ze względu na izolację cieplną zbiornika, zmniejszy się temperatura wody. Przy ciągłym przepływie proces ten będzie trwał tak długo, jak długo potrzebne będzie uzupełnianie do 100% zawartości wilgoci w powietrzu. Ustanie zatem dopiero przy takiej temperaturze, przy której nadmuchiwanie powietrze będzie miało wilgotność względną równą jedności, czyli w punkcie rosy. Zjawisko to jest doskonale znane z życia codziennego - wystarczy przywołać przykład ochładzania spoconego ciała przez nadmuch powietrza.

W przypadku pomiarów psychrometrycznych wykorzystane jest zjawisko "adiabatycznego" parowania wody z nasączonej nią np. gazy. Zastosowanie gazy, waty lub innej tkaniny ma na celu maksymalne rozwinięcie powierzchni parowania. Zasadniczymi elementami każdego psychrometru są dwa jednakowe, bardzo dokładne termometry rtęciowe. Zbiorniczek rtęci jednego z nich jest opływany bezpośrednio przez powietrze - jest to tzw. termometr suchy. Zbiorniczek rtęci drugiego termometru owinięty jest koszulką z gazy lub batystu. Dolna część koszulki, nie stykająca się ze zbiorniczkiem termometru, zanurzona jest w zbiorniczku z wodą destylowaną, bądź też zwilżana jest wodą destylowaną bezpośrednio przed pomiarem. Ten termometr jest nazywany termometrem mokrym.

W psychrometrze Augusta (*rysunek 4.8.a*) przepływ powietrza wokół termometru odbywa się w sposób naturalny, a zatem nie tylko w pewnej mierze przypadkowy, ale i stosunkowo powolny. Wynikają stąd błędy pomiaru dochodzące do kilkunastu procent, uwarunkowane przede wszystkim niedostatecznym wychłodzeniem termometru mokrego.

W psychrometrze Assmanna (*rysunek 4.8.b*) zbiorniczki termometrów umieszczone są w odpowiednich tulejkach, poprzez które przepływa powietrze. Ruch powietrza jest wymuszony za pomocą wentylatora napędzanego sprężyną. Psychrometry Assmanna są proste w obsłudze, wygodne w użyciu i na tyle dokładne, że mogą być wykorzystywane nie tylko do pomiarów wilgotności względnej powietrza, lecz również do sprawdzania i wzorcowania wilgotnościomierzy mniej dokładnych.

Przy pomiarze wilgotności za pomocą psychrometru zjawisko adiabatycznego nasycania, czyli ustalania stanu nasycenia powietrza parą wodną, występuje w warstwie powietrza opływającego zbiorniczek termometru

mokrego. Parowanie wody ze zwilżonej koszulki termometru mokrego obniża temperaturę wokół jego zbiorniczka. Z tej to przyczyny będzie on pokazywał temperaturę niższą niż termometr suchy. Proces parowania wody przebiega, tak jak to już omówiono wcześniej, aż do osiągnięcia równości ciśnienia nasycenia pary wokół zbiorniczka termometru mokrego i ciśnienia składnikowego pary wodnej w badanym powietrzu wilgotnym. Różnica wskazań termometru suchego i termometru mokrego nosi nazwę **różnicy psychrometrycznej**. Różnica ta jest tym większa, im powietrze jest bardziej suche - trzeba go bowiem uzupełnić o większą ilość wody i więcej potrzeba ciepła do jej odparowania.

Na podstawie znanych temperatur wskazywanych przez termometry suchy i mokry, czyli znanej psychrometrycznej różnicy temperatur, można bądź to przy wykorzystaniu odpowiednich tablic dołączonych do każdego przyrządu, bądź na podstawie wykresu $i_{1-X} - X$ odczytać wilgotność względną powietrza.

Wilgotność względną powietrza określić można również posługując się zależnością

$$\varphi = \frac{p_p}{p_{ss}} = \frac{p_{sm} - A(t_s - t_m)p}{p_{ss}}, \quad (4.23)$$

gdzie: p_p - ciśnienie składnikowe pary w badanym powietrzu, p_{sm} - ciśnienie nasycenia pary w temperaturze termometru mokrego t_m , p_{ss} - ciśnienie nasycenia pary w temperaturze termometru suchego t_s , p - ciśnienie atmosferyczne w hPa, A - współczynnik psychrometryczny zależny od prędkości przepływu powietrza w pobliżu zbiorniczka termometru mokrego, określony przez następujący wzór empiryczny

$$A = \left(65 + \frac{6,75}{w} \right) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}. \quad (4.24)$$

W ostatniej zależności w jest właśnie prędkością przepływu powietrza i wynosi:

- dla psychrometru Augusta $w = 0,4 \div 0,5 \text{ m/s}$;
- dla psychrometru Assmanna $w \approx 2,5 \text{ m/s}$.

Można w związku z tym przyjąć następujące wartości stałych:

- dla psychrometru Augusta $A \approx 80 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$;
- dla psychrometru Assmanna $w \approx 67,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$.

4.7. Przebieg ćwiczenia laboratoryjnego

Cel: pomiar wilgotności względnej powietrza.

Przyrządy:

- psychrometr Assmanna;
- barometr rtęciowy.

Przebieg pomiarów:

1. Odczytać ciśnienie atmosferyczne na barometrze.
2. Zwilżyć koszulkę z gazy na zbiorniczku termometry mokrego wodą destylowaną za pomocą pipety.
3. Nakręcić sprężynę napędzającą wentylatorek psychrometru.
4. Uruchomić wentylatorek.
5. Po ustaleniu się wskazań termometrów dokonać odczytu temperatury wskazywanej przez termometr mokry t_m i termometr suchy t_s .

Opracowanie wyników:

1. Przeliczyć wartości ciśnienia odczytane z barometru na hPa

$$p = 1,333 \cdot H_m [1 - (\beta - \alpha)t] \text{ hPa}, \quad (4.25)$$

gdzie H_m - wysokość słupa rtęci w milimetrach odczytana z barometru,

$\beta - \alpha = 0,000182 \text{ 1/K}$ - względny (względem szkła) współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci, $t = t_s$ - temperatura otoczenia.

2. Odczytać z *tablicy 4.1* ciśnienia nasycenia pary wodnej p_{ss} oraz p_{sm} odpowiednio przy temperaturze termometru suchego t_s i temperaturze rosy t_r . Jak łatwo zauważyć ciśnienie nasycenia pary wodnej przy temperaturze rosy jest równe ciśnieniu składnikowemu pary w powietrzu wilgotnym przy temperaturze termometru suchego: $p_{sr} = p_{ps}$.

3. Wyznaczyć wilgotność względną powietrza ze wzoru (ciśnienia w Pa):

$$\varphi = \frac{p_{sm} - 6,77 \cdot 10^{-6} (t_s - t_m)p}{p_{ss}}. \quad (4.26)$$

4. Obliczyć na podstawie uzyskanych wartości:

- a) stopień wilgoci powietrza nienasyconego X w temperaturze termometru suchego wykorzystując (4.14) ($p_s = p_{ss}$, $p_p = \varphi p = p_{sr}$);
- b) stopień wilgoci powietrza nasyconego przy temperaturze termometru suchego X'' ze wzoru (4.15);
- c) stopień nasycenia ψ - (4.8);
- d) stałą gazową powietrza wilgotnego R - (4.16);

- e) objętość właściwą powietrza wilgotnego v_{1+X} - (4.17);
 - f) entalpię właściwą powietrza wilgotnego i_{1+X} - (4.18).
5. Odczytać z wykresu $i_{1+X} - X$ (Molliera):
- a) ciśnienie nasycenia p_{ss} i p_{sm} ($p_{sm} = p_{ps}$ por. pkt. 2);
 - b) wilgotność względną ϕ ;
 - c) stopień wilgotności X ;
 - d) entalpię właściwą powietrza wilgotnego i_{1+X} .
6. Porównać poprzez zestawienie w tabeli wyniki obliczeń z punktu 4 i odczytów z punktu 5.
7. Obliczyć masę wody zawartej w 1 m³ wilgotnego powietrza.

3.8. Przykładowe pytania kontrolne

1. Podać definicję pary nasyconej, pary nasyconej suchej i mokrej.
2. Co to jest temperatura rosy?
3. Scharakteryzować proces parowania posługując się wykresem $p - T$.
4. Omówić wielkości charakteryzujące zawartość wilgoci w powietrzu.
5. W jaki sposób oblicza się parametry powietrza wilgotnego przy wykorzystaniu zależności dla roztworów gazów doskonałych?
6. Omówić wykres Moliera.
7. Podać sposób określania ciśnienia nasycenia, ciśnienia cząstkowego i wilgotności względnej z wykresu Moliera.
8. Co to są higrometry i jak je klasyfikujemy?
9. Omówić zasadę działania psychrometrów w oparciu o zjawisko adiabatycznego parowania.
10. Podać sposób pomiaru wilgotności względnej za pomocą psychrometru Assmanna.

Literatura

- [1] Warren H. Giedt *Thermophysics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1971.
- [2] B. V. Karlekar *Thermodynamics for Engineers*. Prentice Hall Inc., New York, 1987.
- [3] Bogumił Staniszewski *Termodynamika*. PWN, Warszawa, 1986.
- [4] Jan Szargut *Termodynamika*. PWN, Warszawa, 1985.
- [5] Stefan Wiśniewski *Termodynamika techniczna*. WNT, Warszawa, 1987.