

zatem

$$\delta = \frac{0,918}{0,488} = 1,88, \quad \nu = \frac{0,176}{0,488} = 0,36,$$

$$[\text{CO}_2]_{\max} = \frac{100}{1 + \frac{79}{21} \cdot 1,88 + 0,36} = 11,87\%,$$

$$D = 1,88 \cdot 11,87 = 22,3,$$

$$\Delta = \frac{21}{11,87} - \frac{79}{200} = 1,375.$$

Na podstawie obliczonych wartości można skonstruować wykres Buntego (rys.6.14). Po zmierzeniu zawartości $[\text{CO}_2]$ i $[\text{O}_2]$ w spalinach suchych, można określić z wykresu zawartość $[\text{CO}]$ i współczynnik nadmiaru powietrza λ .

7. POMIAR WILGOTNOŚCI POWIETRZA

Znajomość termodynamicznych parametrów określających stan wilgotnego powietrza ma zasadnicze znaczenie nie tylko w inżynierii sanitarnej, ale również w prawie wszystkich procesach przemysłowych.

W procesach klimatyzacyjnych, suszarniczych itd. własności wilgotnego powietrza odnosi się do powietrza suchego, którego masa nie ulega zmianie podczas przemian termodynamicznych. Zmienia się jedynie masa wody znajdująca się w powietrzu, która może znajdować się w fazie stałej, ciekłej albo gazowej; może się ona również znajdować jednocześnie w dwóch, a nawet w trzech fazach.

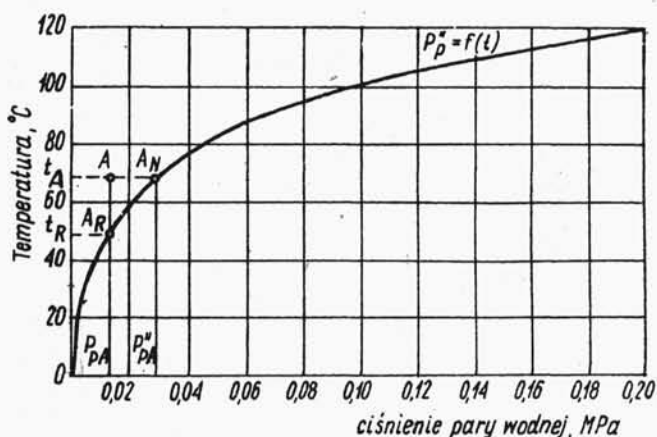
W rozdziale tym będzie mowa tylko o pomiarze wilgotności powietrza, ale te same metody pomiarowe można zastosować do pomiaru wilgotności innych gazów wilgotnych. Trzeba przy tym zwrócić uwagę w jakich warunkach ciśnienia i temperatury znajduje się mieszanina, której wilgotność jest określana.

7.1. POJĘCIA PODSTAWOWE

Powietrze wilgotne z dostateczną dokładnością można traktować jako gaz jednorodny o pewnym ciśnieniu całkowitym p_b , które zgodnie z prawem Daltona jest sumą ciśnienia powietrza suchego p_g oraz ciśnienia pary wodnej p_p . Ciśnienie całkowite jest najczęściej równe ciśnieniu barometrycznemu

$$p_b = p_g + p_p.$$

Wielkość ciśnienia cząstkowego pary wodnej w zależności od temperatury powietrza można odczytać na rys.7.1.



Rys.7.1. Ciśnienie nasycenia pary wodnej w zależności od temperatury powietrza

Powietrze suche, w zależności od temperatury, ma określoną zdolność "pochłaniania" pary wodnej. W zależności od masy pary wodnej znajdującej się w jednostce objętości powietrza o określonej temperaturze, powietrze może występować jako:

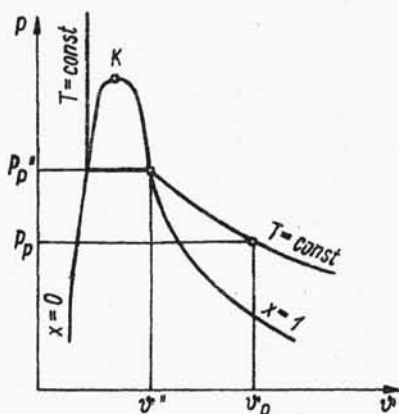
- powietrze wilgotne nienasycone,
- powietrze wilgotne nasycone,
- powietrze wilgotne zamglone.

Powietrze wilgotne nienasycone może jeszcze przy danej temperaturze wchłonąć pewną ilość pary wodnej; natomiast powietrze nasycone zawiera przy danej temperaturze maksymalną

ilość wilgoci w gazowej fazie. Na rysunku 7.1 pokazano, że powietrze nienasycone (punkt A) o temperaturze t_A oraz ciśnieniu cząstkowym pary wodnej p_{pA} może być doprowadzone do stanu nasycenia dwoma sposobami:

- przez obniżenie temperatury powietrza przy niezmiennym ciśnieniu cząstkowym pary wodnej (przemiana izobaryczna), aż do osiągnięcia temperatury punktu rosy (punkt A_R),

- przez doprowadzenie pewnej dodatkowej masy wilgoci przy niezmiennym ciśnieniu, aż do osiągnięcia stanu nasycenia (punkt A_N o współrzędnych t_A i p_{pA})



Powietrze jest przesycone wówczas, gdy oprócz pary wodnej nasyconej zawiera: mgłę wodną przy temperaturze wyższej od zera $^{\circ}\text{C}$ oraz mgłę lodową przy temperaturze powietrza niższej od 0°C .

W powietrzu nienasyconym woda występuje jako para przegrzana, natomiast w powietrzu nasyconym jako para sucha nasycona (rys.7.2).

Wilgotność powietrza może być zdefiniowana w różny sposób. W zagadnieniach termodynamicznych (energetycznych) najczęściej stosuje się pojęcie wilgotności bezwzględnej masowej tzw. zawartości wilgoci. Określa ją następujący definicyjny wzór

$$x = \frac{m_p}{m_g}, \quad \text{kg/kg}, \quad (7.1)$$

gdzie:

m_p - masa wilgoci,

m_g - masa powietrza suchego.

|| Wilgotność bezwzględna masowa jest to masa wilgoci przypadająca na 1 kg powietrza suchego.

|| Wilgotność bezwzględna objętościowa jest to masowa zawartość wilgoci w 1 m^3 wilgotnego powietrza. Wilgot-

ność ta równoznaczna jest z gęstością pary wodnej przy danej temperaturze ρ_p kg/m³.

W procesach suszenia, wentylacji i klimatyzacji ważna jest znajomość tzw. wilgotności względnej φ .

Wilgotność względna jest to stosunek gęstości pary wodnej w stanie aktualnym ρ_p do maksymalnej gęstości ρ_p'' przy danej temperaturze

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} 100\% \quad (7.2)$$

lub

$$\varphi = \frac{v_p''}{v_p} 100\% \quad (7.3)$$

Stosując prawo Boyle'a-Mariotte'a dla pary wodnej (rys. 7.2)

$$p_p'' v_p'' = p_p v_p,$$

otrzymuje się

$$\varphi = \frac{v_p''}{v_p} = \frac{p_p}{p_p''}, \quad (7.4)$$

gdzie:

p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu,

p_p'' - ciśnienie nasycenia wody przy tej samej temperaturze.

Zawartość wilgoci zdefiniowana za pomocą wzoru (7.1) trudna jest do określenia w bezpośrednich pomiarach tej wielkości.

Można wyprowadzić inną zależność (wygodniejszą w stosowaniu) tej wielkości, opierając się na równaniu stanu dla pary wodnej i powietrza suchego przy całkowitym ciśnieniu wilgotnego powietrza p_b

$$x = 0,622 \frac{p_p}{p_b - p_p}, \quad \text{kg/kg.} \quad (7.5)$$

Dla powietrza nasyconego wzór (7.5) przyjmie postać

$$x'' = 0,622 \frac{p_p''}{p_b - p_p''}, \quad \text{kg/kg.} \quad (7.6)$$

Wilgotność powietrza można określić również wielkością zwaną stopniem nasycenia ψ wg wzoru

$$\psi = \frac{x}{x''}. \quad (7.7)$$

Po podstawieniu do wzoru (7.7) wielkości opisanych wzorem (7.5) i (7.6) otrzymuje się

$$\psi = \frac{p_p}{p_p''} \frac{p_b - p_p''}{p_b - p_p}. \quad (7.8)$$

Z powyższych rozwiązań wynika, że wilgotność względną, wilgotność bezwzględną masową oraz stopień nasycenia wilgotnego powietrza można określić wówczas, gdy są znane ciśnienia cząstkowe pary wodnej w badanym powietrzu, odczytane z tablic ciśnienia nasycenia pary wodnej w temperaturze badanego gazu oraz całkowite ciśnienie wilgotnego powietrza.

7.2. METODY I PRZYRZĄDY DO POMIARU WILGOTNOŚCI POWIETRZA

Wilgotność powietrza można określać różnymi metodami. Poniżej wymieniono metody najczęściej stosowane w praktyce.

1. Metoda wagowa nazywana również grawimetryczną polega na usunięciu wilgoci z badanego powietrza, np. poprzez całkowite jej pochłonięcie przez absorbenty. Masę usuniętej wilgoci określa się poprzez dokładne ważenie na wadze laboratoryjnej pochłaniacza. Jest to metoda bardzo dokładna, laboratoryjna. Stosuje się ją jako wzorzec dla innych metod pomiarowych.

2. Metoda psychometryczna polega na wykorzystaniu zjawiska obniżenia temperatury spowodowanego odparowaniem wody z wilgotnej powierzchni ciała do otaczającego powietrza nienasyconego.

3. Metoda punktu rosy polegająca na doprowadzeniu pary wodnej znajdującej się w badanym powietrzu do stanu nasycenia przez obniżenie temperatury. Pomiar wilgotności sprowadza się do pomiaru temperatury punktu rosy.

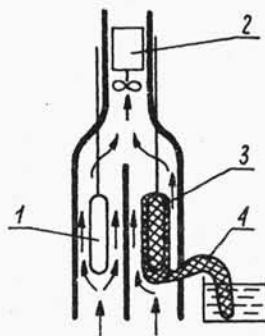
4. Metoda pomiaru temperatury równowagi między wodą w roztworze higroskopijnym (najczęściej LiCl) a parą wodną w otaczającym powietrzu, zwana metodą higrometryczną chlorolitową.

5. Metody, w których wykorzystano zmianę parametrów mechanicznych lub elektrycznych ciał stałych pod wpływem zmiany wilgotności względnej badanego powietrza (jest to również metoda higrometryczna).

Na podanych zasadach (oprócz metody wagowej) oparte jest działanie przyrządów do pomiaru wilgotności powietrza, które można podzielić na 3 rodzaje: psychrometry, higrometry oraz przyrządy pomiaru punktu rosy.

7.2.1. PSYCHROMETRY

Przy pomiarze wilgotności powietrza w przyrządach tych wykorzystano zjawisko obniżania się temperatury zwilżonego czujnika termometru podczas przepływu powietrza nienasyconego. Zasadę działania psychrometru pokazano na rys. 7.3. Psychrometr zbudowany jest z dwóch jednakowych termometrów, tzw. termometru suchego 1 oraz mokrego 3. Czujnik termometru mokrego owinięty jest koszulką 4 z gazy lub batystu, zwilżoną wodą destylowaną. Przepływ powietrza nienasyconego w otoczeniu czujników termometrów wymuszany jest za pomocą wentylatora 2. W warstwie powietrza graniczącej bezpośrednio z czujnikiem termometru mokrego ustali się stan nasycenia. Podczas przepływu powietrza badanego o wilgotności względnej niższej od 100% woda, na skutek różnicy ciśnień cząsteczek pary wodnej, odparowuje z koszulki czujnika termometru mokrego i ochładza go poniżej temperatury powietrza nienasyconego. Po osiągnięciu stanu równowagi, wymiana ciepła i masy między powietrzem a zwilżoną koszulką ustali się i można dokonać odczytu temperatur na termometrze suchym oraz mokrym. Różnica wskazań tych termometrów, tzw. różnica psychrometryczna, zależy od wilgotności badanego powietrza; jest ona tym większa, im bardziej suche jest powietrze. Można przyjąć, że



Rys. 7.3. Schemat zasady działania psychrometru

proces na powierzchni czujnika termometru mokrego przebiega adiabatycznie, to znaczy bez wymiany ciepła z otoczeniem wówczas, gdy zostanie wyeliminowany wpływ przewodności cieplnej oraz promieniowania. W przypadku, gdy na odparowanie wilgoci część energii cieplnej zostanie pobrana z otoczenia drogą promieniowania i przewodzenia, wówczas temperatura wskazana przez ten termometr będzie wyższa od rzeczywistej.

Wilgotność względną powietrza w zależności od różnicy psychrometrycznej i prężności pary nasyconej określa wzór

$$\varphi = \frac{p_{pm}'' - A(t_s - t_m) p_b}{p_{ps}'} 100\%, \quad (7.9)$$

gdzie:

p_{pm}'' - ciśnienie nasycenia wody przy temperaturze mokrego termometru t_m , Pa,

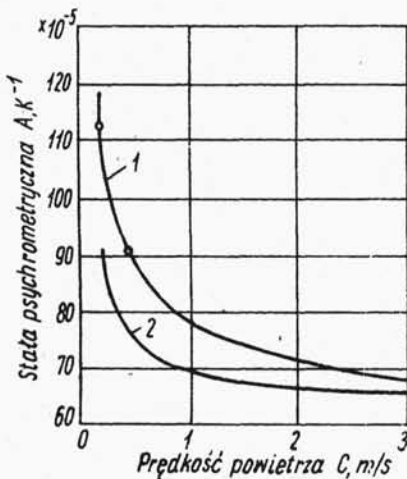
p_{ps}' - ciśnienie nasycenia wody przy temperaturze suchego termometru t_s , Pa,

$t_s - t_m$ - różnica psychrometryczna, K,

A - stała psychrometryczna, $1/K$,

p_b - ciśnienie barometryczne, Pa.

Stałą psychrometryczną wyznacza się w sposób doświadczalny, można ją określić również opierając się na rozważaniach teoretycznych. Wartość stałej A zmienia się w zależności od wymiarów czujników termometrów oraz od prędkości przepływu powietrza wokół tych czujników. W niewielkim stopniu zależy ona również od temperatury, ciśnienia i wilgotności badanego powietrza. Na rysunku 7.4 pokazano dwie

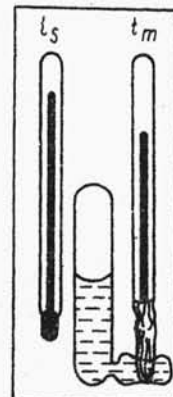


Rys. 7.4. Zależność stałej psychrometrycznej od prędkości przepływu powietrza (krzywa 1 - czujniki kuliste $\varnothing 10$ mm, krzywa 2 - czujniki cylindryczne $\varnothing 4$ mm, długość 8 mm)

krzywe wyznaczone doświadczalnie dla dwóch różnych typów termometrów. Z wykresu widać, że przy prędkości przepływu powietrza mniejszej od 1 m/s występują bardzo duże zmiany stałej psychrometrycznej. Wynika stąd wniosek, że w celu zwiększenia dokładności pomiaru wilgotności powietrza konstrukcja psychrometru powinna zapewnić w miarę możliwości stały przepływ powietrza wokół czujników o prędkości powyżej 2 m/s.

Psychrometr Augusta

Opisane powyżej zjawisko wykorzystał po raz pierwszy do pomiaru wilgotności powietrza August. Przyrząd skonstruowany przez niego pokazano na rys.7.5. Składa się on z dwóch jednakowych szklanych termometrów, których czujniki stanowią kulę o średnicy 10 mm oraz zbiornika na wodę destylowaną do zwilżania koszulki termometru mokrego. Termometry oraz zbiorniczek zawieszone są na wspólnej desce. Powietrze badane omija czujniki termometrów w sposób niewymuszony (naturalny). Do obliczeń wilgotności względnej powietrza przyjmuje się, że prędkość gazu opływającego czujniki wskutek konwekcji naturalnej wynosi 0,5 m/s. Założenie to w praktyce najczęściej nie jest spełnione, co powoduje (łącznie z wpływem promieniowania cieplnego) niedokładność pomiaru wynoszącą $\pm 15\%$ wilgotności względnej.

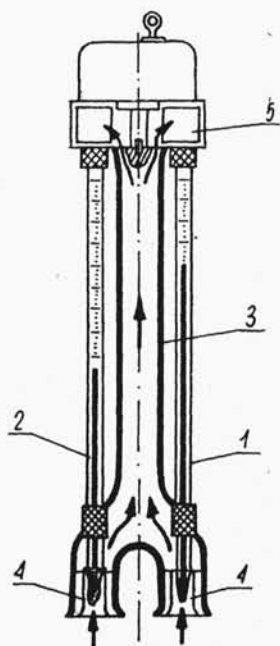


Rys.7.5. Psychrometr Augusta

Psychrometr Assmanna

Z charakterystyki stałej psychrometrycznej (rys.7.4) wynika, że dla prędkości gazu $2 \div 10$ m/s wartość A jest prawie stała. Ta własność została wykorzystana w psychrometrach aspiracyjnych Assmanna. Schemat tego przyrządu pokazano na rys.7.6. Składa się on z dwóch atestowanych, dokładnych termometrów; termometr suchy 1 wskazuje temperaturę badanego powietrza, natomiast mokry 2 temperaturę niższą wskutek odparowania wilgoci z jego powierzchni. Czujniki termometrów 1 i 2 mają kształt cylindryczny o średnicy $4 \div 4,5$ mm i długości $8 \div 12$ mm. Termometry osadzone są w obudowie psychrometru 3 w ten sposób, że

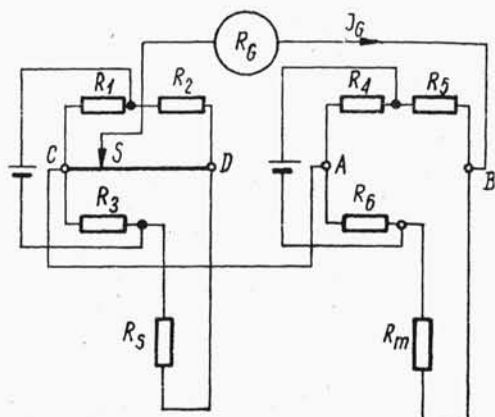
czujniki umieszczone są w podwójnych osłonach metalowych obustronnie niklowanych 4. Powietrze przepływające wokół czujni-



Rys. 7.6. Schemat psychrometru Assmana

powietrze jest suche czynność tę powtarza się kilkakrotnie w czasie pomiaru).

Za pomocą psychrometrów można mierzyć wilgotność względną powietrza w zakresie $5 \div 100\%$ przy zmianach temperatury powietrza $0 \div 50^{\circ}\text{C}$. Dokładność pomiaru wilgotności względnej powietrza wynosi $\pm 3\%$. W przypadku pomiarów wilgotności powietrza w temperaturach niższych od 0°C (ale niezbyt niskich), koszulkę termometru mokrego można zwilżać 3% wodnym roztworem formaldehydu. Zamiast termometrów cieczowych rozszerzalnościowych w psychrometrach można zastosować termometry manometryczne, elektryczne oporowe lub termopary. Stosując odpowiednie układy elektryczne, można uzyskać bezpośrednie wskazania wilgotności względnej. Zmierzone wielkości można przekazywać na odległość lub wykorzystywać jako sygnały regulacyjne. Schemat układu elektrycznego z termometrem elektrycz-



Rys. 7.7. Schemat psychrometru elektrycznego

nym oporowym pokazano na rys.7.7. Zasada działania układów z termometrem elektrycznym oporowym opisana była w rozdziale 2. Wartość napięcia U_{AB} dla mostka "mokrego" jest zależna od t_m , a dla mostka "suchego" I_{CD} od t_s , przy czym I_{CD} określa prąd przepływający przez przekątną mostka suchego w chwili powstania napięcia niezrównoważenia układu. Układ zostanie zrównoważony wówczas; gdy $I_G = 0$; zachodzi to przy odpowiednim ustawieniu suwaka s .

Spełniony będzie wtedy warunek

$$U_{AB} = U_{CS} = I_{CD} R_{CS}, \quad (7.10)$$

stąd

$$R_{CS} = \frac{U_{AB}}{I_{CD}} = K \varphi, \quad (7.11)$$

gdzie:

K - stała przyrządu,

φ - wilgotność względna powietrza, %.

Z zależności (7.11) wynika, że w momencie pomiaru wartość prądu na oporniku suwakowym R_{CS} jest wprost proporcjonalna do wilgotności względnej badanego powietrza.

Wyznaczanie wilgotności względnej powietrza na podstawie wskazań psychrometrów

Po odczytaniu wskazań termometru mokrego oraz suchego, wilgotność względna powietrza można określić według jednej z trzech wymienionych niżej metod.

1. Obliczyć wilgotność względna powietrza wg wzoru (7.9) przy czym uprzednio należy zmierzyć ciśnienie atmosferyczne oraz odczytać z tablic lub z wykresu 1-x ciśnienie nasycenia pary wodnej dla temperatury termometru suchego i mokrego. Wartość stałej psychrometrycznej A dla psychromatu Augusta przyjmuje się $A = 80 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$.

W przypadku psychrometru Assmanna stałą psychrometryczną można określić na podstawie stałej Sprunga "a" określonej w sposób teoretyczny, a następnie sprawdzonej doświadczalnie

$$a = A \cdot p_b = \frac{c_p \cdot p_b}{k \cdot T}, \quad (7.12)$$

gdzie:

A - stała psychrometryczna, $1/K$,

p_b - ciśnienie barometryczne, Pa,

c_p - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu, $J/kg\ K$,

$$k = \frac{\mu_w}{\mu_p} = 0,622,$$

μ_w - masa cząsteczkowa wody,

μ_p - masa cząsteczkowa powietrza,

r - ciepło parowania wody, $r = r_w$, J/kg ,

r - ciepło sublimacji wody, $r = r_c$, J/kg .

Przy ciśnieniu umownym $p = 101\ 000$ Pa stała Sprunga wynosi:

$a = 66,65$ Pa/K dla pary wodnej nad wodą,

$a = 57,3$ Pa/K dla pary wodnej nad lodem.

Wzór (7.9) dla psychrometru Assmanna przyjmie więc postać

$$\varphi = \frac{p_{pm} - \frac{p_b}{101000} 66,65 (t_s - t_m)}{p_{ps}}. \quad (7.13)$$

Obecnie Światowa Organizacja Meteorologiczna zaleca przyjmowanie następujących wartości stałych psychrometrycznych

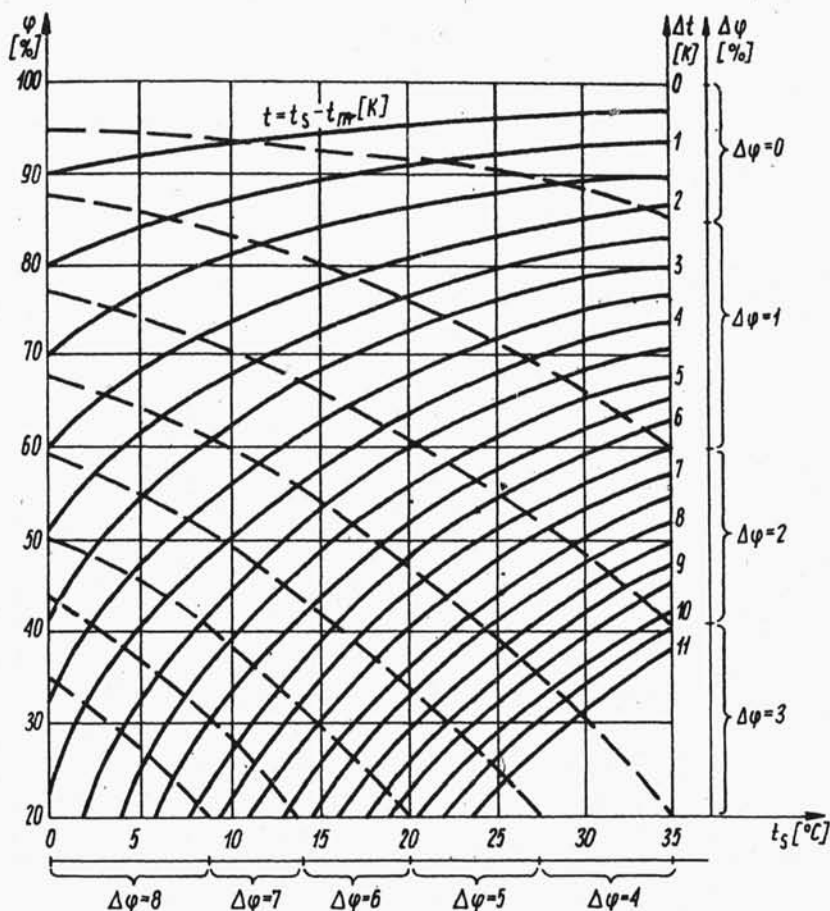
$$A_w = 0,00066 \ 1/K,$$

$$A_l = 0,00058 \ 1/K.$$

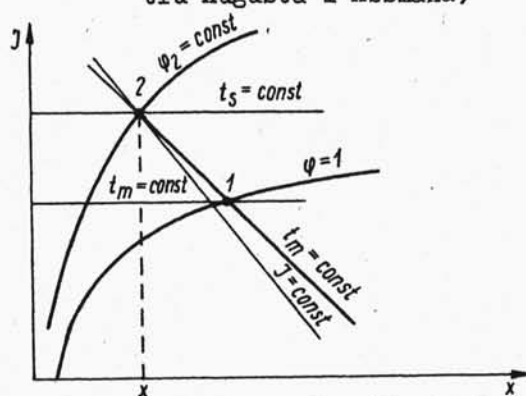
2. Odczytać wilgotność względną powietrza z tablic lub wykresów psychrometrycznych. Na rysunku 7.8 pokazano uniwersalny wykres psychrometryczny, z którego można określić wilgotność względną powietrza dla psychrometru Augusta i Assmanna.

3. Odczytać z wykresu i-x.

Określenie wilgotności względnej powietrza φ za pomocą wykresu i-x (stosowane tylko dla psychrometru Augusta) przedstawiono na rys. 7.9.



Rys.7.8. Uniwersalny wykres psychrometryczny (dla psychrometru Augusta i Assmana)

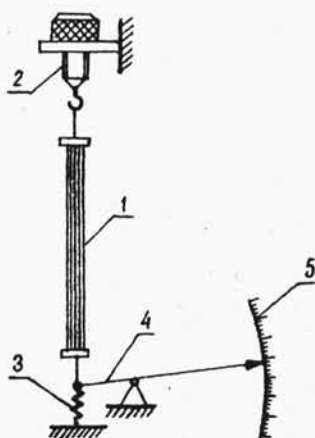


Rys.7.9. Wyznaczanie wilgotności względnej φ powietrza wg wskazań psychrometru na wykresie $J - x$

7.2.2. HIGROMETRY

Higrometr włosowy

Czujnikami pomiarowymi w tych przyrządach są odtłuszczone włosy ludzkie lub włókna syntetyczne, które pęcznieją pod wpływem nawilżania. Wiązka włosów lub włókien syntetycznych znajdująca się w atmosferze wilgotnego powietrza pochłania wilgoć, aż do uzyskania stanu równowagi z badanym powietrzem. Schemat higrometru włosowego pokazano na rys.7.10. Wiązka wło-



Rys.7.10. Schemat higrometru włosowego

sów lub włókien 1 jednym końcem zamocowana jest w uchwycie, a drugi koniec połączony jest ze sprężyną naciagową 3 oraz wskazówką 4. Śruba regulacyjna 2 służy do regulacji naciągu wiązki. Pod wpływem zmiany wilgotności względnej powietrza następuje zmiana długości wiązki, która poprzez układ dźwigniowy powoduje obrót wskazówki 4 wzdłuż skali 5. Przyrząd wyskalowany jest w jednostkach wilgotności względnej φ . Dokładność pomiaru wilgotności względnej powietrza za pomocą higrometrów włosowych wynosi $\pm 5\%$. Są one tanie, niewrażliwe

na zanieczyszczenia atmosfery, ale wymagają okresowego sprawdzania i regulacji. Higrometry z czujnikami wykonanymi z włosów ludzkich należy sprawdzać co dwa tygodnie. W tym celu na czujnik nakłada się osłonę metalową wyłożoną flanelą, która powinna być nasycona wodą destylowaną. W otoczeniu wiązki włosów uzyskuje się wówczas wilgotność względną wynoszącą około 96% i na tę wartość należy nastawić wskazania wskazówki.

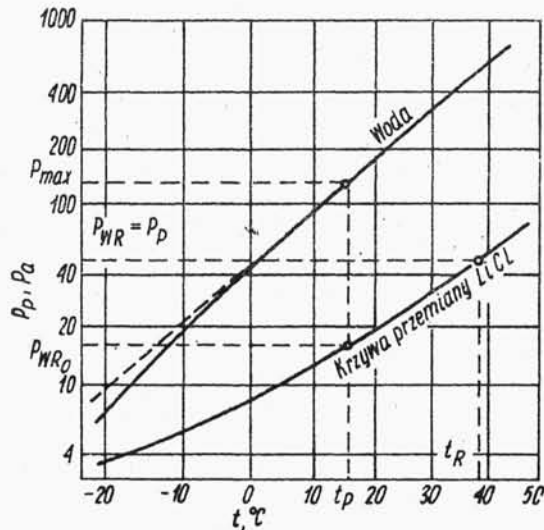
Higrometry włosowe charakteryzuje zjawisko histerezy, przy czym błąd wskazań może wynosić do 8% wilgotności względnej przy zmianie wilgotności obejmującej całą skalę pomiarową ($Q \div 100 \div 0\%$). Wydłużenie włosów w zakresie wilgotności $0 \div 100\%$ wynosi $1,5 \div 2,5\%$ ich początkowej długości. Poza tym tracą one zdolność higroskopową przy pomiarze wilgotności powietrza o temperaturze wyższej od 50°C .

Więcej zalet w porównaniu z włosami ludzkimi mają włókna syntetyczne, które obecnie częściej stosuje się w higrometrach włosowych. Wydłużenie ich jest 2 ÷ 4 razy większe niż włosów ludzkich, a zakres zmian temperatury badanego powietrza może wynosić 120°C. Higrometrów z włosami syntetycznymi nie trzeba również tak często sprawdzać i odtłuszczać przed zamontowaniem. Sprawdzanie przeprowadza się raz na trzy miesiące.

Wiązka włosów stosowana jest także do pomiaru i rejestracji wilgotności względnej powietrza w funkcji czasu w higrografach. Zmiana długości pęczka złożonego z 80 do 100 włosów, w wyniku zmiany wilgotności względnej badanego powietrza, przenoszona jest za pomocą czułego mechanizmu dźwigniowego na pióro napełnione tuszem. W wyniku obrotu taśmy nawiniętej na bęben poruszający się ze stałą prędkością otrzymuje się ciągłą linię zmiany wilgotności względnej powietrza w czasie. Bęben poruszany jest przez mechanizm zegarowy. Zastosowanie w mechanizmie dźwigniowym zmiennego przełożenia krzywkowego pozwala na uzyskanie równomiernej podziałki wilgotności względnej powietrza.

Higrometr elektrochemiczny

W przyrządach tych miarą wilgotności bezwzględnej powietrza jest temperatura przemiany wodnego roztworu chlorku litu na sól w czujniku pomiarowym. Na rysunku 7.11 pokazano zależność między ciśnieniem pary wodnej nad zwierciadłem nasyconego roztworu chlorku litu oraz wody. Z wykresu wynika, że nad powierzchnią nasyconego roztworu chlorku litu ciśnienie pary wodnej w nasyconym powietrzu w danej temperaturze jest znacznie niższe niż nad zwierciadłem wody. Krzywa przemiany chlorku litu przebiega w pobliżu krzywej wilgotności względnej powietrza $\varphi = 10 \div 12\%$. Aby zrównać ciśnienie pary wodnej nad roztworem LiCl z ciśnieniem cząstkowym pary wodnej w badanym powietrzu o wilgotności względnej wyższej od 10%, należy roztwór ogrzać do temperatury równowagi. W tej temperaturze roztwór pozostaje w stanie równowagi termodynamicznej z otaczającym powietrzem, tzn. nie ma ani absorpcji, ani odparowania wody z roztworu. Znajac krzywą przemiany roztworu można na podstawie pomiaru temperatury czujnika z wodnym roztworem



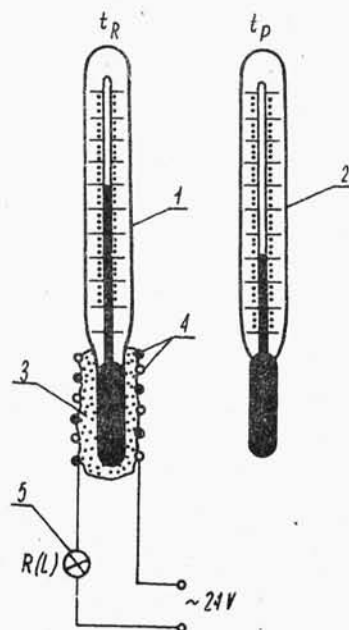
Rys.7.11. Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nad zwierciadłem wody i wodnego nasyconego roztworu chlorku litu

LiCl wyznaczyć ciśnienie pary wodnej nad powierzchnią roztworu, a tym samym ciśnienie cząstkowe pary wodnej w badanym powietrzu.

Schemat pomiarowy wyjaśniający zasadę działania wilgotnościomierza z podgrzewanym czujnikiem chlorolitowym przedstawiono na rys.7.12. Składa się on z termometru 1, którego czujnik owinięty jest tkaniną szklaną 3 nasyoną wodnym roztworem chlorku litu o odpowiednim stężeniu. Na tkaninę nawinięte są równoległe dwie elektrody 4 nie stykające się ze sobą, zasilane poprzez opornik 5 (lampka sygnalizacyjna) prądem zmiennym o napięciu 24 V. Elektrody wykonane są z niekorodującego drutu; najczęściej stosuje się drut srebrny lub platynowy. W chwili rozruchu przy temperaturze badanego powietrza t_p (wskazuje termometr 2) ciśnienie pary nad roztworem p_{WR0} jest znacznie niższe od ciśnienia cząstkowego pary wodnej w badanym powietrzu (rys.7.11). W wyniku oporności elektrolitu podczas przepływu prądu wydziela się ciepło Joule'a, co wywołuje odparowanie wody z elektrolitu do otaczającego powietrza z równoczesnym wydzielaniem się kryształków soli LiCl. Proces ten przebiega bardzo szybko od chwili

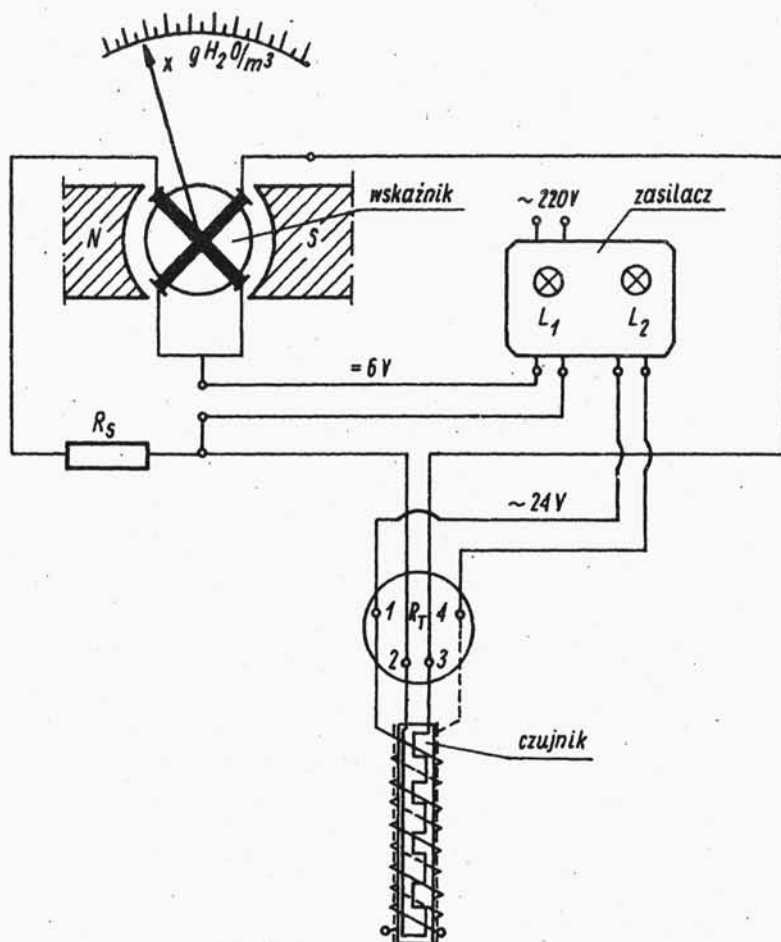
nieznacznego przekroczenia stanu równowagi, a więc gdy ciśnienie pary wodnej nad roztworem p_{WR} przekroczy wartość równą ciśnieniu cząstkowemu pary wodnej w badanym powietrzu ($p_{WR} = p_p$). Wykryształizowana sól powoduje szybko zmniejszenie przewodności elektrycznej (przewodnictwo elektryczne jest o trzy rzędy wielkości mniejsze od przewodności elektrycznej ciekłego nasyconego roztworu), a tym samym zmniejszenie ilości wydzielonej energii cieplnej. Na skutek wymiany ciepła z otoczeniem temperatura roztworu maleje i p_{WR} obniża się poniżej stanu równowagi $p_{WR} = p_p$. Obniżenie ciśnienia pary wodnej poniżej stanu równowagi jest przyczyną jej absorpcji przez higroskopijny roztwór z otaczającego powietrza, a zatem rozcieńczenie roztworu i równoczesny wzrost ilości wydzielanego ciepła Joule'a. Po kilku opisanych wyżej cyklach o malejącej amplitudzie wahań, ustali się samoczynnie równowaga termodynamiczna układu uwarunkowana wzajemnym zahamowaniem procesów wymiany ciepła i masy między czujnikiem oraz badanym powietrzem. Ustalona temperatura t_R jest miarą wilgotności bezwzględnej badanego gazu.

Na rysunku 7.13 pokazano schemat elektryczny higrometru chlorolitowego typu WEB-1, który jest najczęściej stosowany do pomiaru wilgotności bezwzględnej powietrza. W wilgotnościomierzu tym zastosowano platynowy czujnik termometru elektrycznego oporowego współpracujący z ilorazowym miernikiem wskazująco-rejestrującym (logometrem) wyskalowanym w jednostkach wilgotności bezwzględnej ($g H_2O/N m^3$), temperatury



Rys. 7.12. Schemat układu pomiarowego z podgrzewanym czujnikiem chlorolitowym: 1-termometr, 2-termometr wskazujący temperaturę badanego powietrza, 3-tkanina szklana, 4-elektrody, 5-opornik rozruchowy (lampka sygnalizacyjna)

punktu rosy lub ciśnienia cząstkowego pary wodnej w badanym gazie. Wskazania wilgotności bezwzględnej są słuszne tylko przy umownym ciśnieniu gazu (101 325 Pa).



Rys.7.13. Schemat higrometru chlorolitowego typu WEB-1

Przy ciśnieniu różnym od umownego należy odczytaną wartość wyrażoną w $\text{g H}_2\text{O}/\text{um}^3$ gazu suchego pomnożyć przez współczynnik

$$k = \frac{101\,325 - p_p}{p_a - p_p}, \quad (7.14)$$

gdzie:

p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w badanym gazie odczytane z wykresu na tabliczce dla wskazanej przez miernik wilgotności w $\text{g H}_2\text{O}/\text{um}^3$, Pa,

p_a - ciśnienie bezwzględne badanego gazu, Pa.

Przykład

Wilgotność wskazana wynosi $5 \text{ g H}_2\text{O}/\text{um}^3$, odczytane z wykresu.

$p_p = 640 \text{ Pa}$, ciśnienie bezwzględne mierzonego gazu wynosi

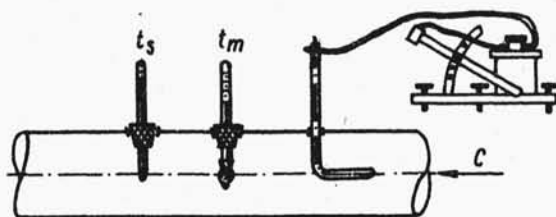
$p_a = 130\,000 \text{ Pa}$.

Wilgotność rzeczywista wynosi

$$\rho_n = 5 \frac{101\,325 - 640}{130\,000 - 640} = 3,87 \text{ g H}_2\text{O}/\text{um}^3.$$

7.2.3. POMIAR WILGOTNOŚCI POWIETRZA W KANALE

W procesach wentylacyjnych, klimatyzacyjnych oraz suszarniczych zachodzi często potrzeba pomiaru wilgotności powietrza płynącego z pewną stałą prędkością. Gdy przepływ powietrza jest ustalony, wówczas bardzo łatwo można zmierzyć wilgotność w sposób pokazany na rys.7.14. Należy wykonać dwa



Rys.7.14. Schemat pomiaru wilgotności powietrza w kanale

otwory w kanale (obok siebie) i w nich umocować za pomocą korków gumowych dwa jednakowe termometry: suchy oraz mokry. Termometry powinny być umieszczone na jednakowej głębokości (zasady instalowania termometrów podane są w rozdziale 2). Koszulka termometru mokrego musi być w czasie pomiarów systematycznie zwilżana wodą destylowaną.

Poza temperaturą termometru mokrego i suchego należy zmierzyć prędkość przepływu powietrza w kanale (rozdział 8) w miej-

scu zainstalowania termometrów oraz ciśnienie bezwzględne powietrza. Wielkości te można zmierzyć jednocześnie za pomocą rurki Prandtla. Znając temperatury t_s i t_m , prędkość powietrza c oraz ciśnienie bezwzględne p_b , to wilgotność względną powietrza można określić za pomocą jednej z trzech metod podanych dla psychrometrów.

Czujnik chlorolitowy nie nadaje się do bezpośredniego pomiaru wilgotności powietrza w kanałach, ponieważ może on być stosowany tylko przy prędkościach przepływu powietrza nie przekraczających 0,5 m/s. W przypadku zastosowania odpowiednich osłon na czujniku, które redukują prędkość powietrza do wartości poniżej 0,5 m/s, można także używać tego typu czujnika do pomiaru wilgotności gazu przepływającego w kanałach.

7.3. METODYKA POMIARU WILGOTNOŚCI POWIETRZA

Dokładność pomiaru wilgotności powietrza zależy nie tylko od wyboru odpowiedniego w danych warunkach rodzaju przyrządu, jego klasy, ale również od sposobu wykonania pomiaru. Wiele metod pomiaru wilgotności gazu opartych jest na pomiarze jego temperatury, np. temperatury punktu rosy, temperatury równowagi między wodą w ciele higroskopijnym a parą wodną w otaczającym powietrzu itd.

Zagadnienie pomiaru temperatury w różnych okolicznościach zostało omówione w rozdziale 2. Trzeba pamiętać o tym, aby stworzyć jak najlepszą wymianę ciepła między czujnikiem, a ciałem mierzonym oraz jednocześnie uniknąć odprowadzenia ciepła przez termometr. W psychrometrach temperatura rzeczywista termometru mokrego będzie mierzona tylko wówczas, gdy ciepło potrzebne do odparowania wody z koszulki czujnika pobierane będzie wyłącznie od otaczającego powietrza. Należy więc wykluczyć wymianę ciepła przez przewodzenie i promieniowanie między czujnikiem, a otaczającymi przedmiotami.

W przypadku przyrządów przepływowych pobierane próbki do pomiaru wilgotności powinny być reprezentatywne. Należy doprowadzić próbkę do przyrządu w warunkach nie wpływających na zmianę wilgotności bezwzględnej.

Istotnym warunkiem prawidłowości wskazań higrometru włosowego i higrografu w pomieszczeniu jest umieszczenie przy-

rzędu w takiej odległości od ściany, aby temperatura powietrza otaczającego czujnik była równa rzeczywistej temperaturze badanego gazu. Jeżeli ten warunek nie jest spełniony, to higrometr zawieszony np. na chłodnej ścianie wskazuje zbyt duże wartości wilgotności względnej.

Przy pomiarach wilgotności gazu czujnikiem cilorolitowym należy stosować poniższe wskazówki:

- nie mierzyć wilgotności gazu o temperaturze niższej niż $(-6)^{\circ}\text{C}$,

- można mierzyć wilgotność gazu w zakresie wilgotności względnej $12 \div 98\%$ w przedziale temperatur $25 \div 55^{\circ}\text{C}$,

- bezwzględnie niedopuszczalny jest pomiar wilgotności gazów o temperaturze powyżej 100°C (może wówczas nastąpić uszkodzenie czujnika),

- należy przestrzegać zasady nie stosowania czujnika przy wilgotnościach względnych przekraczających 95% , gdyż grozi to zmyciem czynnej warstwy elektrolitu.

Przy pomiarach psychrometrycznych koszulki termometrów mokrych można nawilżać tylko wodą destylowaną. Zwykła woda jest zawsze roztworem różnych soli, a z prawa Raulta wynika, że wzrostowi stężenia wodnego roztworu soli odpowiada spadek ciśnienia pary wodnej nad jego powierzchnią.

Przyrządy stosowane do pomiarów wilgotności powinny mieć ważne świadectwo atestacji.

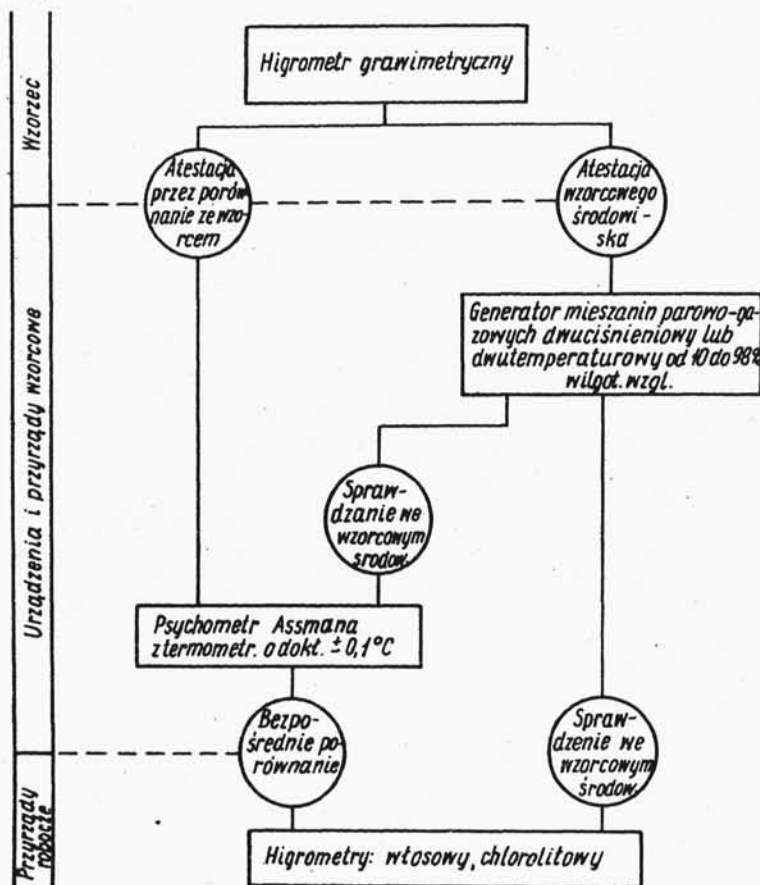
7.4. WZORCOWANIE I SPRAWDZANIE PRZYRZĄDÓW

W przyrządach pomiarowych na skutek starzenia zachodzą pewne zmiany w czujnikach, które zniekształcają wyniki pomiarowe. Błędy te można wyeliminować poprzez okresowe wzorcowanie oraz sprawdzanie zarówno przyrządów wzorcowych, jak i roboczych. Na rysunku 7.15 podano schemat sprawdzania przyrządów do pomiaru wilgotności. Jako wzorzec przyjęto higrometr grawimetryczny.

Wzorcowanie lub sprawdzanie przyrządów może być wykonane dwiema metodami:

- 1) przez jednoczesny pomiar wilgotności powietrza (gazu) przyrządem badanym oraz wzorcowym i porównanie wyników wskazań, przy czym wskazania przyrządu wzorcowego porównuje się z wzorcem (higrometrem grawimetrycznym),

2) przez sprawdzenie badanego przyrządu w środowisku wzorcowym, którym jest mieszanina parowo-gazowa o ściśle znanym i odtwarzalnym składzie wytwarzana przez generator wilgotności. Z kolei atestację wzorcowego środowiska przeprowadza się za pomocą wzorca.

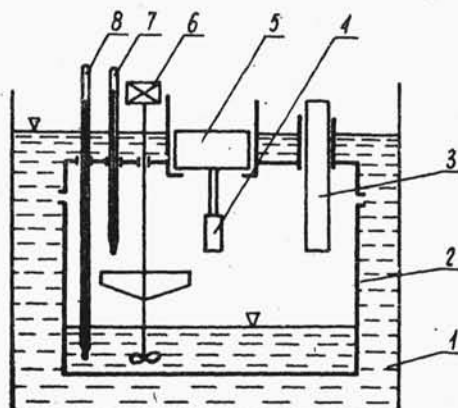


Rys.7.15. Schemat sprawdzania przyrządów do pomiaru wilgotności powietrza

Jako przyrząd wzorcowy dla przyrządów roboczych (technicznych), stosowany jest między innymi psychrometr Assmanna. Jest to uzasadnione tym, że termometry szklane stosowane w tych przyrządach charakteryzuje duża stabilność wskazań temperatury.

W praktyce do sprawdzania przyrządów stosuje się najczęściej roztwory higrostatyczne, tj. wodne roztwory soli.

Nad powierzchnią tych roztworów, zgodnie z prawem Raulta, utrzymuje się określone ciśnienie pary wodnej. Stosując różne



Rys. 7.16. Schemat higrostatu: 1-kąpiel termostatyczna, 2-właściwy higrostat, 3-higrometr punktu rosy (przyrząd wzorcowy), 4-badany czujnik, 5-pokrywa, 6-mieszadło mechaniczne powietrza i roztworu, 7, 8-termometry do pomiaru temperatury powietrza i roztworu

stężenia roztworów przy stałej temperaturze uzyskuje się w przestrzeni nad zwierciadłem roztworu wilgotne powietrze o dowolnym ciśnieniu cząstkowym pary wodnej, a tym samym różnej wilgotności względnej (rys. 7.16).

8. POMIARY IŁOŚCI, PRĘDKOŚCI I STRUMIENIA MASY PŁYNÓW

8.1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Ilość płynu może być określona za pomocą jego masy m lub objętości V . Pomiędzy tymi wielkościami zachodzą zależności, które można określić za pomocą wzorów

$$m = V \rho, \quad (8.1)$$

$$V = m \nu, \quad (8.2)$$