

9 WILGOTNE POWIETRZE

9.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

Wilgotne powietrze (szczególny przypadek wilgotnego gazu) jest mieszaniną pary wodnej i suchego powietrza. Przy niezbyt wysokich ciśnieniach wilgotny gaz można traktować jak gaz doskonały, podlegający prawom gazowym i spełniającym prawo Daltona, z którego wynika że:

$$p = p_g + p_p, \quad (9.1)$$

gdzie:

- p - ciśnienie wilgotnego powietrza (całkowite ciśnienie),
- p_g - ciśnienie cząstkowe suchego powietrza,
- p_p - ciśnienie cząstkowe pary wodnej.

9.1.1. Parametry wilgotnego powietrza

Wilgotność bezwzględna powietrza φ_p określa masę pary wodnej zawartej w 1 m³ wilgotnego powietrza; jest to równoznaczne z gęstością (masą właściwą) pary wodnej przy ciśnieniu cząstkowym p_p i temperaturze wilgotnego powietrza.

Wilgotność względna powietrza

$$\varphi = \frac{\varphi_p}{\varphi_{p_{\max}}}, \quad (9.2)$$

gdzie: $\varphi_{p_{\max}}$ jest maksymalną wilgotnością bezwzględną powietrza tej samej temperatury co wilgotność φ_p i maksymalnym ciśnieniu cząstkowym $p_{p_{\max}}$, równym ciśnieniu pary nasyconej,

$$p_{p_{\max}} = p_s \quad \text{a} \quad \varphi_{p_{\max}} = \varphi''. \quad (9.3)$$

Korzystając z prawa Boyle'a - Mariotte'a (licząc się z pewnym błędem, ponieważ para wodna nie jest gazem doskonałym) można napisać:

$$\frac{p_p}{p} = \frac{p_s}{p}, \quad \text{a zatem} \quad \frac{\rho_p}{\rho} = \frac{p_p}{p_s}$$

$$\rho_p = \frac{p_p}{p_s} \rho \quad (9.4)$$

przy czym: p_s - ciśnienie pary nasyconej.

W zależności od ilości wilgoci (w postaci pary, mgły wodnej, mgły śnieżnej) zawartej w wilgotnym powietrzu rozróżnia się:

a) powietrze niedosycone - charakteryzujące się tym, że

$$\rho_p < \rho''; \quad p_p < p_s; \quad t > t_s; \quad \varphi < 1;$$

przy czym: t - temperatura wilgotnego powietrza,

t_s - temperatura pary nasyconej;

a zatem występująca wilgoć w wilgotnym powietrzu jest parą przegrzaną;

b) powietrze nasycone - charakteryzujące się tym, że

$$\rho_p = \rho''; \quad p_p = p_s; \quad t = t_s; \quad \varphi = 1,$$

a zatem występująca wilgoć w wilgotnym powietrzu jest parą suchą nasyconą;

c) powietrze zamglone (przesycone) - charakteryzuje się tym, że w wilgotnym powietrzu poza wilgocią w postaci pary nasyconej suchej występuje wilgoć w postaci cieczy (mgła wodna), ciała stałego (mgła śnieżna) lub obu jednocześnie.

Zawartość wilgoci w powietrzu

Zawartość wilgoci w dowolnym gazie suchym określa wzór:

$$x = \frac{R_g}{R_p} \frac{p_p}{p_g} \quad (9.5)$$

lub

$$x = \frac{\rho_p}{\rho_g}, \quad (9.5a)$$

gdzie: $p_g = p - p_p$. a $p_p = \varphi p_s$.

Dla wilgotnego powietrza

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (9.5b)$$

Maksymalną zawartość wilgoci określa się wg wzoru:

przy $\varphi = 1$
$$x_{\max} = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (9.5c)$$

Stopień nasycenia powietrza wyraża się stosunkiem:

$$\psi = \frac{x}{x_{\max}} \quad (9.6)$$

$$\psi = \varphi \frac{p - p_s}{p - p_d} \quad (9.6a)$$

Objętość właściwa wilgotnego powietrza

Powietrze niedosycone

$$v_w = \frac{462(0,622 + x)T}{(1 + x)p} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (9.7)$$

Powietrze nasycone

$$v_w = \frac{462(0,622 + x_{\max})T}{(1 + x_{\max}) \cdot p} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (9.7a)$$

Entalpia wilgotnego powietrza

Wartość entalpii odniesiono w podanych wzorach do 1 kg suchego powietrza.

Powietrze niedosycone

$$I = i_g + x i_p \quad (9.8)$$

$$i_g = 1,0049 \cdot t \approx 1 \cdot t \text{ kJ/kg} \quad (\text{dla } -30^\circ\text{C} < t < 120^\circ\text{C})$$

$$i_p = 2486,5 + 1,905 t - 0,0016 \cdot t^2 \text{ kJ/kg}.$$

Składnik $0,0016 t^2$ można pominąć

$$I = t + (2486,5 + 1,905 t - 0,0016 t^2)x \quad (9.8a)$$

Powietrze nasycone

$$I = t + (2486,5 + 1,905 t - 0,0016 t^2)x_{\max} \quad (9.8b)$$

Powietrze "przesycone" (mgła wodna)

$$I = t + (2486,5 + 1,905 t - 0,0016 t^2)x_{\max} + \\ + 4,187 \cdot t \cdot (x - x_{\max})_w \quad \text{kJ/kg}, \quad (9.8c)$$

przy czym: $(x - x_{\max})_w$ - zawartość wilgoci w powietrzu w postaci kropelek cieczy tworzących mgłę,
 x - całkowita zawartość wilgoci w powietrzu.

Powietrze przesyczone (mgła śnieżna)

$$I = t + (2486,5 + 1,905 t - 0,0016 t^2)x_{\max} - (335 - 2,1 t)(x - x_{\max})_l, \quad (9.8d)$$

przy czym: $(x - x_{\max})_l$ - zawartość wilgoci w powietrzu w postaci igiełek lodu,
 335 - utajone ciepło topienia (zamarzania) lodu kJ/kg,
 2,1 - ciepło właściwe lodu kJ/(kg·deg).

9.1.2. Wykres $I-x$ dla wilgotnego powietrza

Dla ułatwienia rozwiązywania zagadnień z zakresu wilgotnego powietrza zbudowano wykres $I-x$ będący ilustracją wzorów do obliczania następujących wartości dla wilgotnego powietrza:

- entalpii (I),
- zawartości wilgoci (x)

na tle wykresu ilustrującego wzory do obliczenia powyższych wartości naniesiono linie ilustrujące:

- objętość właściwą wilgotnego powietrza (v_w),
- skalę kierunkową procesów nawilżania $\left(\frac{\Delta J}{\Delta x}\right)$.

Wykres $I-x$ zbudowany jest dla określonego ciśnienia wilgotnego powietrza, dlatego rozwiązując zadanie za pomocą wykresu $I-x$ należy o tym pamiętać i posługiwać się wykresem zbudowanym dla ciśnienia odpowiadającego warunkom zadania.

Izobaryczne przemiany wilgotnego powietrza

Zmieszanie dwóch strumieni wilgotnego powietrza:

a) wyznaczanie analityczne parametrów powietrza po zmieszaniu za pomocą wzorów stanowiących bilans masy wilgoci i ciepła:

$$x_M(m_{g_1} + m_{g_2}) = x_1 m_{g_1} + x_2 m_{g_2}, \quad (9.9)$$

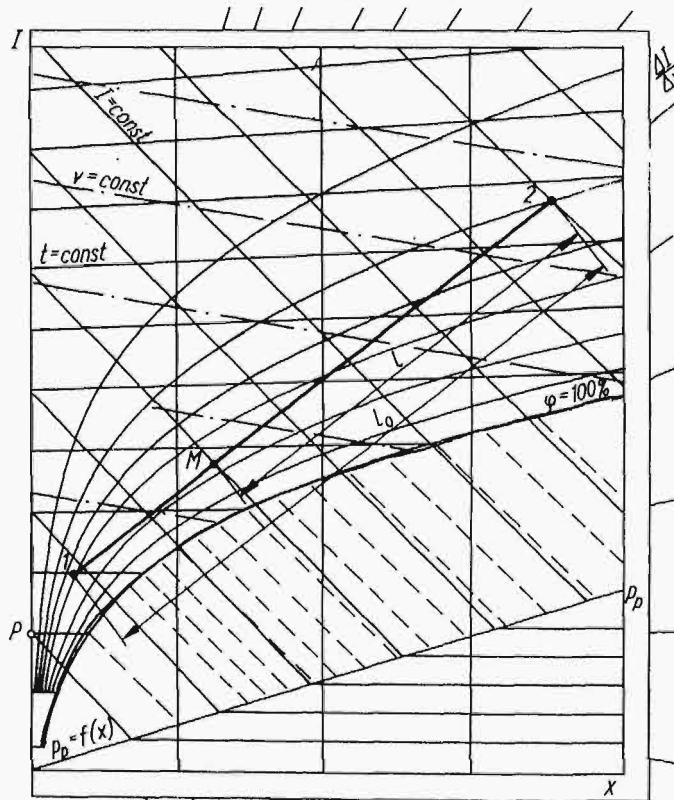
$$I_M(m_{g_1} + m_{g_2}) = I_1 m_{g_1} + I_2 m_{g_2}, \quad (9.10)$$

m_{g_1}, m_{g_2} - masa suchego powietrza w poszczególnych strumieniach wilgotnego powietrza;

b) wyznaczanie parametrów powietrza po zmieszaniu za pomocą wykresu I - x .

Na rys.9.1 zilustrowano zasadę wyznaczania punktu M określającego stan wilgotnego powietrza po zmieszaniu. Długość odcinka 1 określającą odległość punktu M , leżącego na prostej łączącej punkty 1 i 2 (określające parametry stanu mieszających się ze sobą strumieni), od punktu 2 oblicza się ze wzoru:

$$l = l_0 \frac{m_{g_1}}{m_{g_1} + m_{g_2}}. \quad (9.11)$$



Rys.9.1

Nawilżanie powietrza

Przez nawilżanie powietrza rozumie się zmieszanie powietrza wilgotnego z określoną ilością rozpylonej wody lub pary, która zostaje przez powietrze wchłonięta.

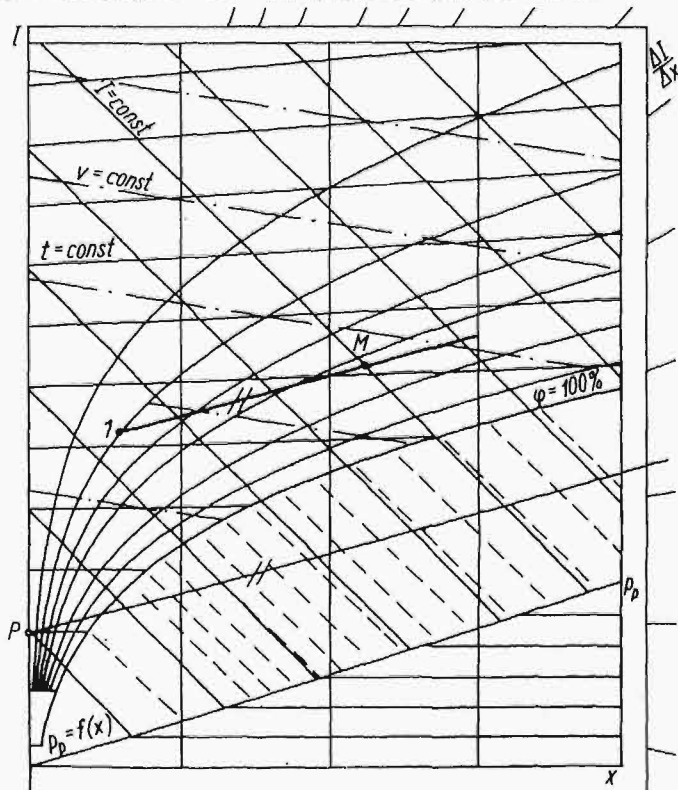
a) wyznaczenie analityczne parametrów powietrza po nawilżeniu za pomocą wzorów:

$$x_M = \frac{m_{wp}}{m_{g1}} + x_1, \quad (9.12)$$

$$I_M = \frac{m_{wp}}{m_{g1}} i + I_1, \quad (9.13)$$

gdzie: m_{wp} - masa pary lub wody wchłoniętej przez powietrze,
 i - entalpia pary lub wody, którą nawilżono powietrze.

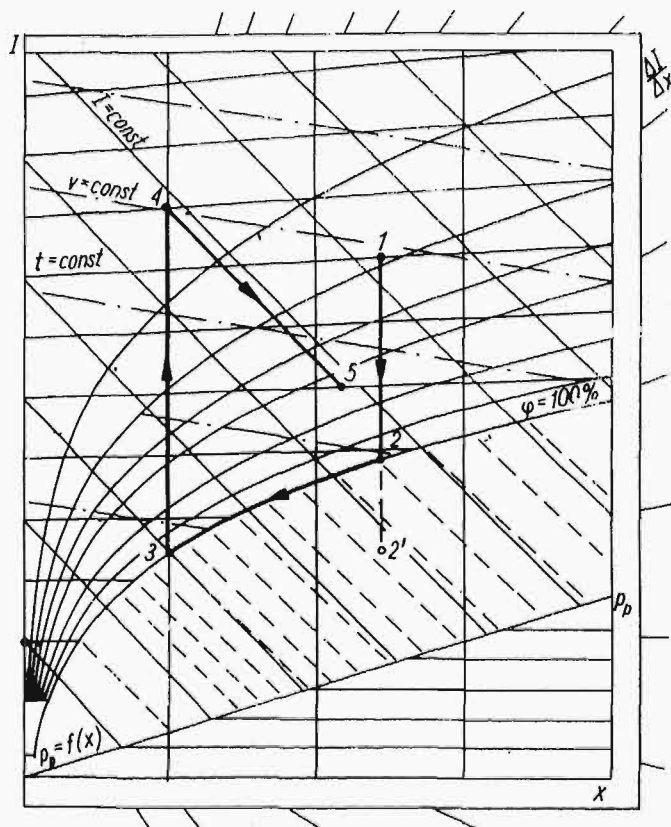
b) wyznaczenie parametrów powietrza po nawilżeniu (wodą lub parą o entalpii i) za pomocą wykresu I - x .



Rys.9.2

Na rys.9.2 zilustrowano przebieg procesu nawilżania. Przez punkt P oraz punkt o określonej entalpii wody lub pary odczytany na skali $\frac{\Delta I}{\Delta x}$ prowadzi się linię prostą, która określa kierunek nawilżania. Prowadząc przez punkt 1 (określający stan wilgotnego powietrza) prostą równoległą do powyższej linii ustala się linię na której leży punkt M charakteryzujący stan powietrza po jego nawilżeniu.

Przebieg izobarycznych procesów wilgotnego powietrza na wykresie I-x.



Rys.9.3

Na rys.9.3 zilustrowano następujące procesy:

- a) proces izobarycznego ogrzewania pośredniego w wymienniku powierzchniowym linia 3-4;

b) proces izobarycznego oziębiania przebiega do punktu 2 (punktu rosy) podobnie jak proces ogrzewania. Dalszemu oziębianiu towarzyszy skraplanie się pary które może objawiać się:

- powstawaniem mgły i wtedy proces przebiega wg linii 1-2'
- wykraplaniem się pary na ściankach i wtedy proces przebiega wg linii 1 - 2 - 3. Ten przypadek chłodzenia prowadzi do zmniejszania zawartości wilgoci w powietrzu a zatem do osuszania powietrza.

c) Proces izoentalpowego suszenia w suszarniach ilustruje linia 4-5.

9.2. ZADANIA

9.2.1.¹⁾ W objętości $V_w = 300 \text{ m}^3$ wilgotnego powietrza o temperaturze $t = 25^\circ\text{C}$ i ciśnieniu $p = 750 \text{ Tr}$ znajduje się $m_p = 3 \text{ kg}$ pary wodnej. Określić:

- wilgotność bezwzględną wilgotnego powietrza ρ_p ,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_p i suchego powietrza p_g ,
- wilgotność względną φ ,
- maksymalne ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_p przy $t = 25^\circ\text{C}$.

Rozwiązanie

Z definicji wilgotności bezwzględnej określa się wartość ρ_p

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_w},$$

$$\rho_p = \frac{3}{300},$$

$$\rho_p = 0,01 \text{ kg/m}^3.$$

Wilgotne powietrze traktuje się jak mieszaninę gazów doskonałych, wobec tego każdy ze składników spełnia równanie Clapeyrona. Dla pary wodnej przyjmuje ono postać:

¹⁾ Zadania od 9.2.1 do 9.2.18 należy rozwiązywać analitycznie bez posługiwania się wykresem I-x.

$$p_p v_p = R_p T,$$

$$p_p = \rho_p R_p T,$$

$$p_p = 0,01 \cdot \frac{8315}{18} \cdot (273 + 25) \cdot 10^{-5},$$

$$p_p = 0,13760 \text{ bar}, \quad p_p = 137,6 \text{ mbar}.$$

Ciśnienie cząstkowe suchego powietrza p_g określa się z prawa Daltona dotyczącego mieszaniny gazów doskonałych:

$$p = \sum p_i,$$

$$p = p_p + p_g,$$

$$p_g = 750 \cdot 133,322 \cdot 10^{-5} - 0,1376,$$

$$p_g = 0,8624 \text{ bar}.$$

Wilgotność względną φ określa się ze wzoru (9.2).

Występujące we wzorze (9.2) wartości $\rho_{p_{\max}} = \rho''$ jak również

p_s odczytuje się z tablic dla pary suchej nasyconej.

Z tabl.10 dla pary wodnej o temperaturze $t = 25^\circ\text{C}$
 $\rho'' = 0,02304 \text{ kg/m}^3$

$$\varphi = \frac{0,01}{0,02304} \cdot 100\%,$$

$$\varphi = 43,4\%.$$

Podobnie jak ρ'' odczytano z tablic ciśnienie nasycenia

$$p_s = 0,03166 \text{ bar},$$

$$p_s = 31,66 \text{ mbar}.$$

Wilgotność względną można określić również na podstawie równania Clapeyrona dla pary wodnej o temperaturze t i ciśnieniu cząstkowym p_p oraz dla pary wodnej nasyconej o temperaturze $t_s = t$ i ciśnieniu p_s (zakładając, że para nasycona wykazuje cechy gazu doskonałego):

$$p_p = \rho_p R_p T,$$

dzieląc stronami otrzymuje się

$$p_s = \rho'' R_p T,$$

$$\frac{\rho_p}{\rho_g} = \frac{p_p}{p_s} = \varphi,$$

$$\varphi = \frac{p_p}{p_s} \cdot 100\%,$$

$$\varphi = \frac{10,35}{23,8},$$

$$\varphi = 43,4\%.$$

9.2.2. Zbiornik o pojemności $V = 1000 \text{ m}^3$ napełniono wilgotnym powietrzem o temperaturze $t = 40^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 70\%$, przy ciśnieniu wilgotnego powietrza $p = 750 \text{ Tr}$. Określić:

- masę pary wodnej (m_p) i suchego gazu (m_g) wypełniających zbiornik,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej (p_p) i suchego powietrza (p_g).

$$\text{Odp. } m_p = 35,8 \text{ kg}; \quad m_g = 1 \text{ 056 kg};$$

$$p_p = 38 \text{ Tr}; \quad p_g = 712 \text{ Tr}.$$

9.2.3. Zbiornik o pojemności V napełniono powietrzem o temperaturze $t_1 = 80^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 45\%$ przy ciśnieniu wilgotnego powietrza $p_1 = 1 \text{ bar}$. Określić:

- rodzaj pary wchodzącej w skład wilgotnego powietrza,
- temperaturę t_2 , do której należy oziębć wilgotne powietrze zamknięte w zbiorniku, aby osiągnęło wilgotność względną $\varphi = 100\%$,

- ciśnienie cząstkowe suchego powietrza p_{g2} po oziębieniu wilgotnego powietrza do temperatury t_2 .

Rozwiązanie

Składnikiem wilgotnego powietrza może być para sucha nasycona lub przegrzana, co ustala się w zależności od ciśnienia p_p i p_s przy tej samej temperaturze t . A mianowicie jeśli:

$p_p < p_s$ para przegrzana (powietrze wilgotne niedosycone),

$p_p = p_s$ para sucha nasycona (powietrze wilgotne nasycone);

ponieważ

$$\varphi = \frac{p_p}{p_s}, \quad \text{a zatem} \quad p_p = \varphi p_s.$$

Z powyższego wynika, że tylko dla powietrza nasyconego ($\varphi = 100\%$) występuje para sucha nasycona.

Natomiast gdy $\varphi < 100\%$ występuje para przegrzana.

Z treści zadania wynika, że $\varphi < 100\%$ a zatem w skład wilgotnego powietrza wchodzi para przegrzana.

Należy ustalić temperaturę $t_2 = t_{s_2}$, przy której

$$\rho_{p1} = \rho_2''.$$

W tym celu oznacza się wartość ρ_{p1}

$$\rho_{p1} = \varphi_1 \rho_1'',$$

z tabl.10 dla $t_1 = 80^\circ\text{C}$ odczytuje się wartość

$$\rho_1'' = 0,2934 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_{p1} = 0,45 \cdot 0,2934,$$

$$\rho_{p1} = 0,132 \text{ kg/m}^3.$$

Z tabl.10 dla $\rho'' = 0,132 \text{ kg/m}^3$ odczytuje się temperaturę nasycenia $t_{s_2} \approx 60,3^\circ\text{C}$ i ciśnienie nasycenia $p_{s_2} \approx 0,200 \text{ bar}$.

Ciśnienie cząstkowe p_{s_2} określa się na podstawie równania (9.1)

$$p_{s_2} = p_2 - p_{s_2}.$$

Ciśnienie wilgotnego powietrza p_2 określa się na podstawie prawa Charlesa ($V = \text{const}$)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1},$$

$$p_2 = 1 \cdot \frac{273 + 60,3}{273 + 80}, \quad p_2 = 0,943 \text{ bar},$$

$$p_{g2} = 0,943 - 0,2, \quad p_{g2} = 0,743 \text{ bar}.$$

9.2.4. Zbiornik o objętości V napełniono przy ciśnieniu $p_1 = 1$ bar wilgotnym powietrzem o temperaturze $t_1 = 20^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 80\%$. Określić:

- do jakiej temperatury t_2 przy $p = \text{const}$ należy podgrzać wilgotne powietrze w zbiorniku, aby wilgotność względna obniżyła się do $\varphi_2 = 24\%$.

- ciśnienie cząstkowe suchego powietrza przed (p_{g1}) i po (p_{g2}) podgrzaniu do t_2 .

$$\text{Odp. } t_2 \approx 42,5^\circ\text{C}; \quad p_{g1} = 0,9798 \text{ bar}; \quad p_{g2} = 0,9813 \text{ bar}.$$

9.2.5. Dla wilgotnego powietrza o temperaturze $t = 80^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 55\%$ przy ciśnieniu wilgotnego powietrza $p = 760 \text{ Tr}$ określić:

- zawartość wilgoci w powietrzu x posługując się wzorem (9.5a)

- stopień nasycenia powietrza ψ .

Rozwiązanie

Zgodnie ze wzorem (9.5a)

$$x = \frac{\rho_p}{\rho_g}.$$

Wartość ρ_p określa się z zależności:

$$\rho_p = \varphi \cdot \rho''.$$

Z tabl.10 dla pary odczytuje się dla $t = 80^\circ\text{C}$ wartość $\rho'' = 0,2934 \text{ kg/m}^3$ i $p_g = 0,4736 \text{ bar}$

$$\rho_p = 0,55 \cdot 0,2934,$$

$$\rho_p = 0,1613 \text{ kg/m}^3.$$

Wartość ρ_g określa się z równania Clapeyrona:

$$p_g = \rho_g R_g T,$$

$$\rho_g = \frac{p_g}{R_g \cdot T};$$

występującą w równaniu wartość p_g określa się wg równania (9.1)

$$p_g = p - p_p,$$

gdzie:

$$p_p = \varphi \cdot p_s,$$

$$p_p = 0,55 \cdot 0,4736,$$

$$p_p = 0,2605 \text{ bar},$$

$$p_g = 1,013 - 0,2605,$$

$$p_g = 0,7525 \text{ bar};$$

$$\rho_g = \frac{0,7525 \cdot 10^5}{287 \cdot (273 + 80)}, \quad R_g = \frac{8315}{29}$$

$$\rho_g = 0,748 \text{ kg/m}^3; \quad R_g = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{deg)}$$

$$x = \frac{0,1613}{0,748},$$

$$x = 0,2155 \text{ kg/kg},$$

$$x = 215,5 \text{ g/kg}, \quad (\text{w praktyce } x \text{ podaje się w g/kg}).$$

Stopień nasycenia powietrza ψ , określa się z zależności (9.6).

Wartość x_{\max} określa się z zależności (9.5a).

$$x_{\max} = \frac{q''}{\rho_g}$$

a zatem po podstawieniu

$$x_{\max} = \frac{0,2934}{0,748},$$

$$x_{\max} = 0,392 \text{ kg/kg},$$

$$x_{\max} = 392 \text{ g/kg};$$

$$\psi = \frac{215,5}{392}, \quad \psi = 0,548.$$

9.2.6. Dla powietrza wilgotnego o temperaturze $t = 50^{\circ}\text{C}$ i wilgotności bezwzględnej $\rho_p = 0,063 \text{ kg/m}^3$ przy ciśnieniu wilgotnego powietrza $p = 760 \text{ Tr}$ określić:

- zawartość wilgoci x ,
- stopień nasycenia powietrza ψ .

Odp. $x = 0,06325 \text{ kg/kg}$; $\psi = 0,736$.

9.2.7. Masę wilgotnego powietrza $m_w = 3000 \text{ kg}$ przy ciśnieniu $p = 989 \text{ kN/m}^2$ o temperaturze $t_1 = 25^{\circ}\text{C}$ i zawartości wilgoci $x_1 = 7,5 \text{ g/kg}$ podgrzano w nagrzewnicy do temperatury $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$. Określić:

- masę pary wodnej (wilgoci) m_p wchodzącej w skład wilgotnego powietrza,
- wilgotność względną powietrza przed (φ_1) i po (φ_2) podgrzaniu.

Rozwiązanie

Masę pary wodnej m_p określa się z układu równań:

$$m_w = m_g + m_p, \quad (a)$$

$$x = \frac{m_p}{m_g}, \quad (b)$$

a zatem

$$m_p = m_w \frac{x}{1 + x},$$

$$m_p = 3000 \frac{0,0075}{1 + 0,0075}$$

$$m_p = 22,35 \text{ kg}.$$

Wilgotność względną φ_1 i φ_2 określa się z zależności (9.5b).

Z tabl.10 dla pary wodnej określa się dla temperatury $t_1 = 25^\circ\text{C}$ wartość ciśnienia $p_{s1} = 0,03166$ bar.

$$\varphi_1 = \frac{7,5 \cdot 0,989}{0,03166(622 + 7,5)},$$

$$\varphi_1 = 0,372, \quad \varphi_1 = 37,2\%.$$

Wartość φ_2 określa się w analogiczny sposób. Ponieważ ogrzewanie w nagrzewnicy odbywa się bez zmiany zawartości wilgoci to $x_2 = x_1 = 7,5$ g/kg.

Z tablic pary wodnej określa się dla temperatury $t_2 = 60^\circ\text{C}$ wartość ciśnienia $p_{s2} = 0,19917$ bar

$$\varphi_2 = \frac{7,5 \cdot 0,989}{0,19917(622 + 7,5)},$$

$$\varphi_2 = 0,0592, \quad \varphi_2 = 5,92\%.$$

9.2.8. Masa $\dot{m}_w = 20\ 000$ kg/h wilgotnego powietrza przy ciśnieniu $p = 1$ bar i temperaturze $t_1 = 80^\circ\text{C}$ oraz ciśnieniu cząstkowym pary wodnej $p_{p1} = 20$ Tr przepływa przez suszarnię. Po opuszczeniu suszarni parametry powietrza wynosily: $p_2 = p_1$, $t_2 = t_1$ oraz wilgotność względną $\varphi_2 = 80\%$. Określić ilość wilgoci Δm_p , którą uniosło ze sobą powietrze przepływające przez suszarnię.

Odp. $\Delta m_p = 7150$ kg/h.

9.2.9. Przez kanał wentylacyjny o przekroju poprzecznym $S = 0,675$ m² przepływa wilgotne powietrze $\dot{m}_w = 40\ 000$ kg/h przy ciśnieniu $p_1 = 1$ bar i temperaturze $t_1 = 50^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej $\varphi_1 = 60\%$. Określić:

- prędkość przepływu wilgotnego powietrza w kanale w
- ilość ciepła potrzebną na podgrzanie powietrza do temperatury $t_2 = 75^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu $p_2 = p_1$.

Rozwiązanie

Prędkość przepływu w określa się z ogólnego wzoru:

$$w = \frac{V}{3600 \cdot S} \text{ m/s.}$$

W interesującym przypadku w miejsce V podstawia się wydatek objętościowy wilgotnego powietrza V_w

$$w = \frac{V_w}{3600 \cdot S}.$$

Wartość V_w określa się w następujący sposób:

$$V_w = \dot{m}_w v_w.$$

Objętość właściwą wilgotnego powietrza v_w oblicza się ze wzoru (9.7) a wartość x ze wzoru (9.5b).

Z tabl. 10 określa się dla $t_1 = 50^\circ\text{C}$ ciśnienie nasycenia $p_{s1} = 0,12335 \text{ bar}$

$$x_1 = 0,622 \frac{0,6 \cdot 0,12335}{1 - 0,6 \cdot 0,12335},$$

$$x_1 = 0,0496 \text{ kg/kg},$$

$$v_w = \frac{462(0,622 + 0,0496)(273 + 50)}{(1 + 0,0496) \cdot 1 \cdot 10^5},$$

$$v_w = 0,954 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$V_w = 40\,000 \cdot 0,954,$$

$$V_w = 38\,150 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$w = \frac{38150}{3600 \cdot 0,675},$$

$$w = 15,72 \text{ m/s.}$$

Ilość ciepła oblicza się wg wzoru:

$$Q = \dot{m}_g(I_2 - I_1),$$

gdzie:

I_2, I_1 - entalpia wilgotnego powietrza przed (I_1) i po (I_2) podgrzaniu, i oblicza się wg wzoru (9.8a).

$$I_1 = 50 + (2486,5 + 1,905 \cdot 50 - 0,0016 \cdot 50^2) 0,0496$$

$$I_1 = 178 \text{ kJ/kg}$$

Do obliczenia I_2 należy określić wartość x_2 , która w tym przypadku równa jest $x_2 = x_1$.

$$I_2 = 75 + (2486,5 + 1,905 \cdot 75 - 0,0016 \cdot 75^2) 0,0496,$$

$$I_2 = 205 \text{ kJ/kg},$$

$$\dot{m}_g = \frac{40\,000}{1 + 0,0496},$$

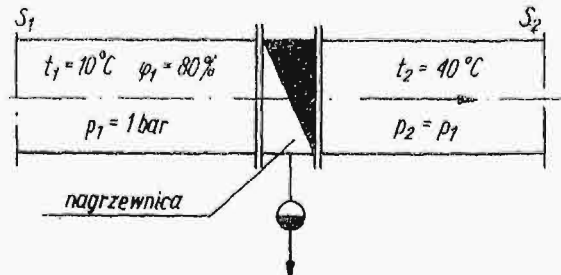
$$\dot{m}_g = 38100 \text{ kg/h},$$

$$Q = 38100(205 - 178),$$

$$Q = 1,103 \text{ GJ/h}.$$

9.2.10. W kanał wentylacyjny o wydatku $\dot{m}_{w1} = 25\,000 \text{ kg/h}$ wilgotnego powietrza wbudowano nagrzewnicę rys.9.4 podgrzewającą powietrze od temperatury t_1 do t_2 . Obliczyć:

- przekrój kanału przed i za nagrzewnicą S_1 i S_2 zakładając prędkość powietrza w kanale $w = 20 \text{ m/s}$,
- wydajność cieplną nagrzewnicy Q ,
- średnicę przewodu parowego (d) zasilającego nagrzewnicę parą o ciśnieniu $p_n = 3 \text{ bar}$ i stopniu suchości $x = 0,98$, przy prędkości przepływu pary w przewodzie $w = 40 \text{ m/s}$.



Rys.9.4

$$\text{Odp. } S_1 = 0,285 \text{ m}^2,$$

$$S_2 = 0,315 \text{ m}^2,$$

$$Q = 758 \text{ mJ/h},$$

$$d = 38,5 \text{ mm}.$$

9.2.11. Dla powietrza wilgotnego przy ciśnieniu $p = 750 \text{ Tr}$ o temperaturze $t = 40^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 57,5\%$ określić temperaturę punktu rosy t_r .

Rozwiązanie

Przez temperaturę punktu rosy t_r rozumie się temperaturę, przy której ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_p w określonym powietrzu przyjmie wartość ciśnienia nasycenia p_s . Po osiągnięciu temperatury punktu rosy wilgotność względna powietrza $\varphi = 100\%$ i zaczyna się wykraplanie cieczy.

Na podstawie tabl.10 dla pary wodnej oraz wzoru (9.4) określa się wartość p_p .

$$p_p = \varphi p_s,$$

$$p_p = 0,575 \cdot 0,07375,$$

$$p_p = 0,0424 \text{ bar}.$$

Kierując się ciśnieniem cząstkowym $p_p = 0,0424 \text{ bar}$ odczytuje się z tabl.10 lub 9 dla pary wodnej temperaturę nasycenia t_s , która jest szukaną temperaturą punktu rosy t_r

$$t_r = t_s \approx 30^\circ\text{C}.$$

9.2.12. Przez kanał wentylacyjny przepływa powietrze przy ciśnieniu $p = 750 \text{ Tr}$, temperaturze $t = 60^\circ\text{C}$ i zawartości wilgoci $x = 50 \text{ g/kg}$. Określić temperaturę ścianek kanału $t_{\text{śc}}$, przy której nie będzie zachodziło wykraplanie się pary wodnej:

$$\text{Odp. } t_{\text{śc}} > t_r \approx 40^\circ\text{C}.$$

9.2.13. Dla powietrza wilgotnego przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$, temperaturze $t = 55^\circ\text{C}$ i temperaturze punktu rosy $t_r = 45^\circ\text{C}$. Określić:

- wilgotność względną powietrza φ ,

- zawartość wilgoci x .

$$\text{Odp. } \varphi = 60,8\%, \quad x = 0,066 \text{ kg/kg}.$$

9.2.14. Zbiornik o objętości $V = 10 \text{ m}^3$ wypełnia powietrze wilgotne przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$, temperaturze $t_1 = 50^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 100\%$ oraz ciecz (woda) w ilości $\Delta m_w = 1,15 \text{ kg}$. W wyniku podgrzania znajdująca się w zbiorniku ciecz odparowała. Obliczyć:

- temperaturę końcową t_2 po podgrzaniu zawartości zbiornika,
- ciśnienie w zbiorniku po podgrzaniu p_2 .

Rozwiązanie

Po podgrzaniu zbiornik będzie zawierał powietrze nasycone o wilgotności bezwzględnej $\rho_{p_2} = \rho_2''$ a występująca w powietrzu para będzie parą nasyconą suchą.

$$\rho_{p_2} = \rho_2'' = \frac{p_{p_2}}{V},$$

gdzie:

$$m_{p_2} = m_{p_1} + \Delta m_p.$$

Pomijając objętość zajmowaną przez ciecz w zbiorniku przed podgrzaniem, wartości m_{p_1} oblicza się ze wzoru:

$$m_{p_1} = V \cdot \rho_{p_1}, \quad \text{gdzie} \quad \rho_{p_1} = \rho_1''.$$

Po podstawieniu

$$\rho_{p_2} = \rho_{p_1} + \frac{\Delta m_w}{V}.$$

Z tabl.10 dla pary wodnej odczytuje się wartość $\rho_{p_1} = \rho_1''$ przy $t = 50^\circ\text{C}$ oraz p_{s_1}

$$\rho_{p_1} = 0,08306 \text{ kg/m}^3,$$

$$p_{s_1} = 0,12335 \text{ bar},$$

$$\rho_{p_2} = 0,08306 + \frac{1,15}{10},$$

$$\rho_{p_2} = 0,198 \text{ kg/m}^3.$$

Dla obliczonej wartości p_{p_2} odczytuje się z tabl.10 temperaturę nasycenia $t_{s_2} = t_2 = 70^\circ\text{C}$ oraz ciśnienie nasycenia $p_{s_2} = 0,3117$ bar.

Końcowe ciśnienie w zbiorniku określa się na podstawie prawa Daltona

$$p_2 = p_{g_2} + p_{p_2}, \quad (a)$$

ponieważ po podgrzaniu w zbiorniku uzyskano powietrze nasycone, a zatem $p_{p_2} = p_{s_2} = 0,3117$ bar.

Wartość p_{g_2} oblicza się z równania izochory

$$\frac{p_{g_2}}{p_{g_1}} = \frac{T_2}{T_1},$$

$$p_{g_2} = \frac{T_2}{T_1} \cdot p_{g_1} = \frac{T_2}{T_1} (p - p_{p_1}).$$

Z treści zadania wynika, że $p_{p_1} = p_{s_1}$, a zatem po podstawieniu wartości oblicza się:

$$p_{g_2} = \frac{273 + 70}{273 + 40} (1 - 0,12335),$$

$$p_{g_2} = 0,96 \text{ bar.}$$

Po podstawieniu do wzoru (a) otrzymuje się:

$$p_2 = 0,96 + 0,3117,$$

$$p_2 = 1,2717 \text{ bar.}$$

9.2.15. Słój o pojemności $V = 1$ l zamykany pokrywą o średnicy $d = 150$ mm napełniono przy ciśnieniu barometrycznym $p = 760$ Tr powietrzem wilgotnym o temperaturze $t_1 = 90^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 90\%$. Po szczelnym zamknięciu słoja i ochłodzeniu wraz z zawartością do temperatury $t_2 = 20^\circ\text{C}$ obliczyć:

- siłę F działającą na pokrywę słoja po ochłodzeniu
- ilość wykroplonej pary Δm_w .

$$\text{Odp. } F = 1218 \text{ N}; \quad \Delta m_w = 0,3637 \cdot 10^{-3} \text{ kg.}$$

9.2.16. Znając parametry wilgotnego powietrza; ciśnienie $p = 1 \text{ bar}$, temperatura $t = 40^\circ\text{C}$ i zawartość wilgoci $x = 60 \text{ g/kg}$ określić:

- rodzaj wilgotnego powietrza (niedosycone, nasycone, przesycone)
- entalpię powietrza I
- masę wilgoci w postaci mgły W jeśli powietrze zajmowało objętość $V_w = 400 \text{ m}^3$.

Rozwiązanie

Dla określenia rodzaju wilgotnego powietrza należy posługując się wzorem (9.5c) oraz tabl.10 określić x_{\max} dla $t = 40^\circ\text{C}$ i $p = 1 \text{ bar}$. Porównanie obliczonej wartości x_{\max} z wartością $x = 60 \text{ g/kg}$ pozwoli na ustalenie rodzaju wilgotnego powietrza.

Z tabl.10 dla $t = 40^\circ\text{C}$ określa się $p_s = 0,07375$

$$x_{\max} = 622 \frac{0,07375}{1 - 0,07375},$$

$$x_{\max} = 49,5 \text{ g/kg},$$

Wobec tego że $x > x_{\max}$ powietrze jest przesycone (zamglone).

Entalpię powietrza wilgotnego zamglonego (mgła wodna) określa się z ogólnego wzoru (9.8c);

$$I = 40 + (2486,5 + 1,905 \cdot 40 - 0,0016 \cdot 40^2) \cdot 0,0495 + \\ + 4,187 \cdot 40 \cdot (0,060 - 0,0495),$$

$$I = 40 + 127 + 1,93,$$

$$I = 168,9 \text{ kJ/kg.}$$

Masę wilgoci w postaci mgły oblicza się wg wzoru

$$\Delta m_w = m_g (x - x_{\max}).$$

Masę suchego powietrza m_g oblicza się wg równania Clapeyrona

$$m_g = \frac{p_g V}{R_g T}.$$

Ciśnienie p_g oblicza się wg wzoru (9.1) gdzie za p_p podstawia się $p_s = 0,07375$ bar

$$p_g = 1 - 0,07375, \quad p_g = 0,92625 \text{ bar},$$

$$m_g = \frac{0,92625 \cdot 10^{-5} \cdot 400}{287(273 + 40)}, \quad m_g = 412,5 \text{ kg},$$

$$\Delta m_w = 412,5(0,0600 - 0,495), \quad \Delta m_w = 4,325 \text{ kg}.$$

9.2.17. Przez nagrzewnicę zainstalowaną w kanale wentylacyjnym przepływa $V_w = 40\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ wilgotnego powietrza przy ciśnieniu $p = 750 \text{ Tr}$. Parametry powietrza przed nagrzewnicą: temperatura $t_1 = 35^\circ\text{C}$, zawartość wilgoci $x_1 = 50 \text{ g/kg}$. Po nagrzaniu powietrze osiągnęło temperaturę $t_2 = 80^\circ\text{C}$. Określić:

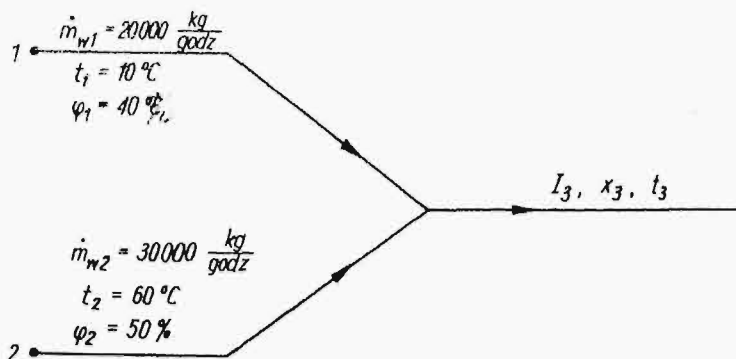
- rodzaj powietrza wilgotnego (niedosycone, nasycone, przesycone),

- ilość ciepła Q potrzebną dla podgrzania powietrza,

- wilgotność względną powietrza po podgrzaniu φ_2 .

Odp. Powietrze przesycone; $Q = 2,83 \text{ GJ/h}$; $\varphi_2 = 15,75\%$.

9.2.18. Dwa strumienie wilgotnego powietrza o parametrach podanych na schemacie rys.9.5 zmieszano ze sobą przy sta-



Rys.9.5

łym ciśnieniu $p = 1$ bar. Określić parametry powietrza po zmieszaniu:

- entalpię I_3 ,
- zawartość wilgoci x_3 ,
- temperaturę t_3 .

Rozwiązanie

Wartość entalpii I_3 określa się z układu równań stanowiących bilans ciepła i masy w odniesieniu do suchego powietrza:

$$\dot{m}_{g3} \cdot I_3 = \dot{m}_{g1} \cdot I_1 + \dot{m}_{g2} \cdot I_2$$

$$\dot{m}_{g3} = \dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2},$$

skąd

$$I_3 = \frac{\dot{m}_{g1} \cdot I_1 + \dot{m}_{g2} \cdot I_2}{\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2}}.$$

Do obliczenia I_1 i I_2 należy określić ze wzoru (9.5b) wartości x_1 i x_2 .

Z tabl.10 odczytuje się wartość p_s dla odpowiedniej temperatury t :

$$x_1 = 0,622 \frac{0,4 \cdot 0,012277}{1 - 0,4 \cdot 0,012277},$$

$$x_1 = 0,00307 \text{ kg/kg},$$

$$x_2 = 0,622 \frac{0,50 \cdot 0,19917}{1 - 0,5 \cdot 0,19917},$$

$$x_2 = 0,0688 \text{ kg/kg}.$$

Podstawiając do wzoru (9.8a) oblicza się wartość I :

$$I_1 = 10 + (2486,5 + 1,905 \cdot 10 - 0,0016 \cdot 10^2) 0,00307,$$

$$I_1 = 17,7 \text{ kJ/kg};$$

$$I_2 = 60 + (2486,5 + 1,905 \cdot 60 - 0,0016 \cdot 60^2) 0,0688,$$

$$I_2 = 239,2 \text{ kJ/kg};$$

$$\dot{m}_{g_1} = \frac{20\,000}{1 + 0,00307} = 19\,950 \text{ kg/h},$$

$$\dot{m}_{g_2} = \frac{30\,000}{1 + 0,0688} = 28\,050 \text{ kg/h};$$

$$I_3 = \frac{19\,950 \cdot 17,7 + 28\,050 \cdot 239,2}{19\,950 + 28\,050},$$

$$I_3 = 146,7 \text{ kJ/kg}.$$

Wartość x_3 określa się z układu równań stanowiących bilans wilgoci i masy suchego powietrza w odniesieniu do suchego powietrza:

$$\dot{m}_{g_3} \cdot x_3 = \dot{m}_{g_1} \cdot x_1 + \dot{m}_{g_2} \cdot x_2,$$

$$\dot{m}_{g_3} = \dot{m}_{g_1} + \dot{m}_{g_2};$$

skąd

$$x_3 = \frac{\dot{m}_{g_1} \cdot x_1 + \dot{m}_{g_2} \cdot x_2}{\dot{m}_{g_1} + \dot{m}_{g_2}},$$

$$x_3 = \frac{19\,950 \cdot 0,00307 + 28\,050 \cdot 0,0688}{19\,950 + 28\,050},$$

$$x_3 = 0,0416 \text{ kg/kg}.$$

Temperaturę po zmieszaniu t_3 określa się ze wzoru (9.8a) po jego przekształceniu.

Dla uproszczenia obliczeń pominięto we wzorze (9.8a) małą czący składnik $0,0016 \text{ t}^2$.

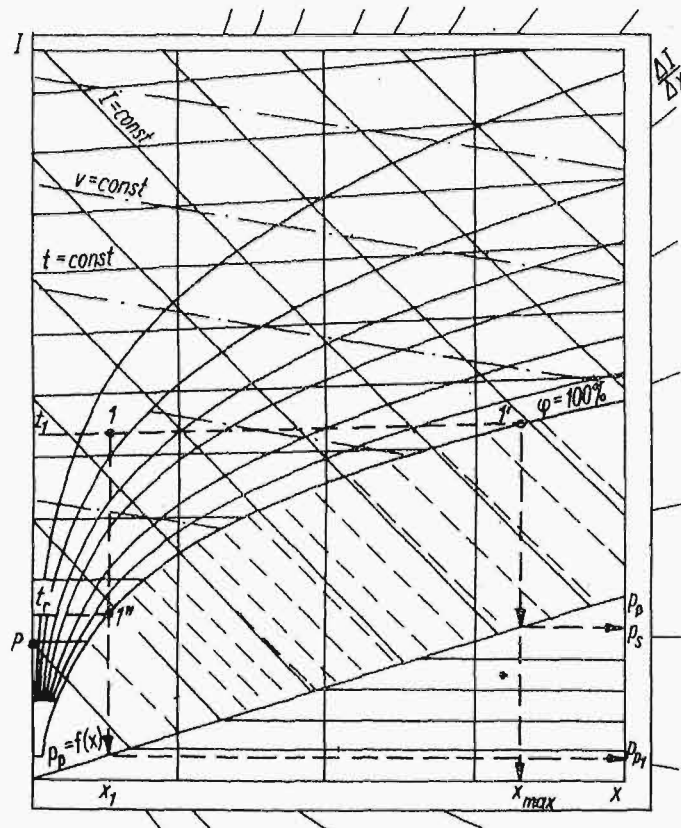
$$t_3 = \frac{146,7 - 2486,5 \cdot 0,0416}{1 + 1,905 \cdot 0,0416},$$

$$t_3 = 40^\circ\text{C}.$$

9.2.19. Dla powietrza wilgotnego o temperaturze $t = 40^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 60\%$, posługując się wykresem I-x określić:

- zawartość wilgoci x ,
- entalpię I ,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_p ,
- maksymalną zawartość wilgoci x_{\max} ,
- ciśnienie nasycenia p_s przy temperaturze t ,
- temperaturę punktu rosy t_r .

Punkt 1 na wykresie I-x rys.9.6 charakteryzujący stan wilgotnego powietrza znajduje się na przecięciu się ze sobą linii stałej temperatury $t = 40^{\circ}\text{C}$ i linii stałej wilgotności względnej $\varphi = 60\%$.



Rys.9.6

Rozwiązanie

Zawartość wilgoci x odczytuje się w miejscu rzutu punktu 1 na oś x

$$x_1 = 0,02867 \text{ kg/kg.}$$

Punkt 1 znajduje się między liniami określającymi stałe wartości entalpii $I = 110 \text{ kJ/kg}$ i $I = 120 \text{ kJ/kg}$. Drogą interpolacji określa się wartość I_1 :

$$I_1 = 115 \text{ kJ/kg.}$$

Ciśnienie cząstkowe p_p określa się przez rzutowanie punktu 1 na linię $x = f(p_p)$ przy $x_1 = \text{const}$ i odrzutowanie w prawo na skalę p_p

$$p_{p1} = 43,3 \text{ mbar.}$$

Maksymalną zawartość wilgoci x_{\max} osiąga powietrze przy pełnym nasyceniu, tj. przy $\varphi = 100\%$. Punkt 1' określa stan nasycenia i znajduje się na przecięciu linii stałej temperatury $t = 40^\circ\text{C}$ z linią powietrza wilgotnego nasyczonego $\varphi = 100\%$. Wartość x_{\max} odczytuje się na osi x

$$x_{\max} = 0,04935 \text{ kg/kg}$$

Ciśnienie nasycenia p_s dla temperatury $t = 40^\circ\text{C}$ określa się dla punktu 1' tak samo, jak p_p dla punktu 1

$$p_{s1} = 73,3 \text{ mbar.}$$

Punkt 1'' określający temperaturę punktu rosy t_r znajduje się w punkcie przecięcia linii stałej zawartości x z linią stałej wilgotności względnej $\varphi = 100\%$.

$$t_r = 30,4^\circ\text{C.}$$

9.2.20. Dla powietrza wilgotnego o temperaturze $t = 50^\circ\text{C}$ i $p_p = 35 \text{ mbar}$ określić: φ , x , I , v_w .

$$\text{Odp. } \varphi = 29\%; \quad x = 0,0229 \text{ kg/kg}; \quad I = 110 \text{ kJ/kg}, \\ v_w = 0,96 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

9.2.21. Dla powietrza wilgotnego o temperaturze $t = 40^{\circ}\text{C}$ i temperaturze punktu rosy $t_r = 25^{\circ}\text{C}$. Określić: x , I , p_p , φ .

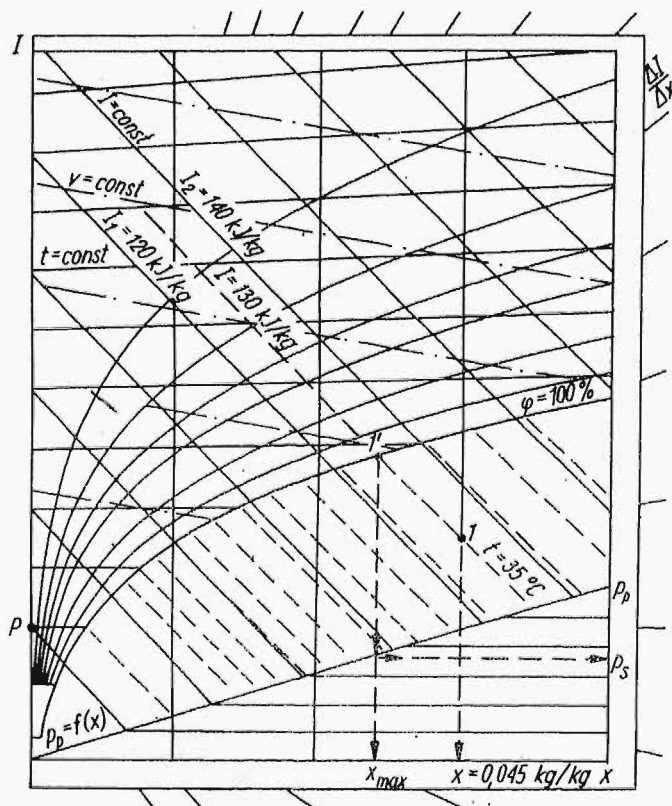
Odp. $x = 0,0203 \text{ kg/kg}$; $I = 92,5 \text{ kJ/kg}$; $p_p = 31,7 \text{ mbar}$; $\varphi = 43,3\%$.

9.2.22. Dla powietrza wilgotnego zamglonego o temperaturze $t = 35^{\circ}\text{C}$ i zawartości wilgoci $x = 45 \text{ g/kg}$, określić:

- entalpię powietrza zamglonego I ,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_p ,
- maksymalną zawartość wilgoci x_{max} ,
- masę wilgoci tworzącą mgłę (ciecz).

Rozwiązanie

Na wykresie I - x (rys.9.7) punkt 1 określający powyższy stan leży na przecięciu linii stałej temperatury $t = 35^{\circ}\text{C}$



Rys.9.7

w obszarze mgły (tj. pod linią $\phi = 100\%$) z linią stałej zawartości wilgoci $x = 45 \text{ g/kg}$.

Punkt 1 leży na linii stałej entalpii $I = 130 \text{ kJ/kg}$ a zatem

$$I = 130 \text{ kJ/kg}.$$

Ponieważ w powietrzu zamglonym występująca para jest parą suchą nasyconą, a zatem ciśnienie cząstkowe równe jest ciśnieniu nasycenia przy temperaturze powietrza zamglonego tj. w punkcie 1'.

Punkt 1' leży na przecięciu linii stałej temperatury wilgotnego powietrza z linią $\phi = 100\%$. Odczytane dla punktu 1' ciśnienie cząstkowe wynosi

$$p_p = p_g = 63,5 \text{ mbar}.$$

Maksymalną zawartością wilgoci w postaci pary x_{\max} będzie zawartość wilgoci odczytana dla punktu 1'

$$x_{\max} = 0,0366 \text{ kg/kg}.$$

Wilgoć w postaci cieczy tworzącej mgłę określa się jako różnicę:

$$(x - x_{\max}) = 0,045 - 0,0366,$$

$$(x - x_{\max}) = 0,0084 \text{ kg/kg}.$$

9.2.23. Dla powietrza wilgotnego którego entalpia wynosi $I = 135 \text{ kJ/kg}$ a ciśnienie cząstkowe pary wodnej $p_p = 65 \text{ mbar}$ określić:

- rodzaj wilgotnego powietrza,
- temperaturę t ,
- zawartość wilgoci w postaci pary,
- zawartość wilgoci w postaci cieczy.

Odp. powietrze przesycone, $t = 35,53^\circ\text{C}$; $x_{\max} = 0,0368 \text{ kg/kg}$

$$(x - x_{\max}) = 0,0064 \text{ kg/kg}.$$

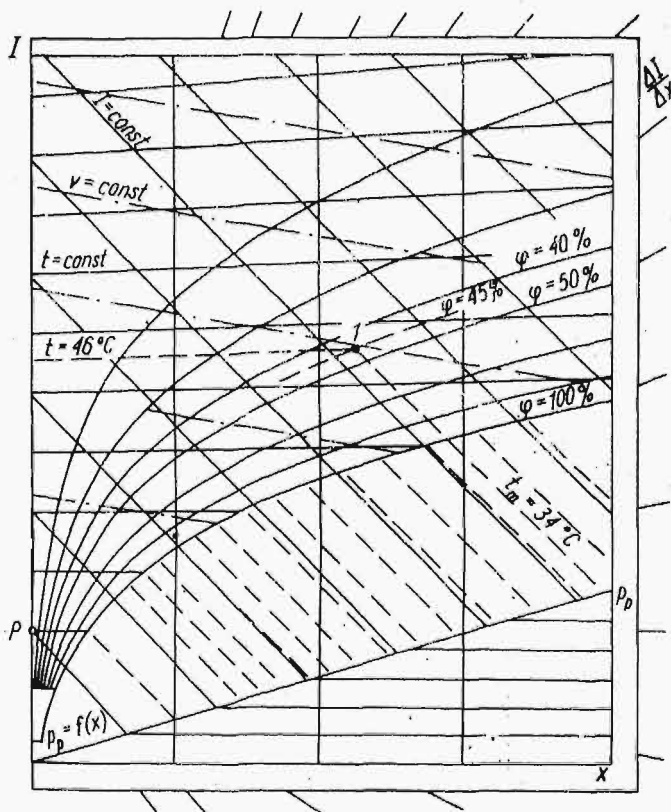
9.2.24. Rozwiązać zadanie nr 9.2.7 posługując się wykresem I-x.

9.2.25. Rozwiązać zadanie nr 9.2.9 posługując się wykresem I-x i określić błąd wynikający ze stosowania wykresu.

9.2.26. Dla określenia stanu wilgotnego powietrza zastosowano psychrometr Augusta. W wyniku pomiarów stwierdzono temperaturę wg termometru suchego $t = 46^{\circ}\text{C}$ a wg termometru mokrego (zwilżonego) $t_m = 34^{\circ}\text{C}$. Posługując się wykresem I-x określić wilgotność względną powietrza.

Rozwiązanie

Punkt 1 na wykresie I-x (rys.9.8) charakteryzujący stan wilgotnego powietrza określonego temperaturą t i t_m stanowi punkt przecięcia się linii stałej temperatury t i t_m .



Rys.9.8

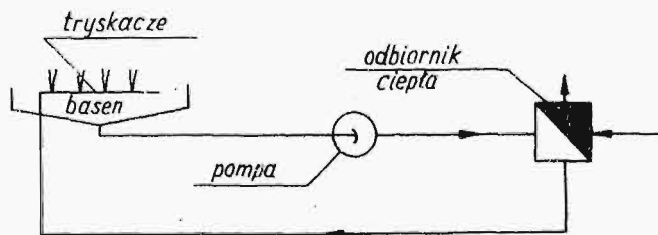
9.2.27. Dla powietrza wilgotnego o zawartości wilgoci $x = 40 \text{ g/kg}$ i ciśnieniu nasycenia $p_g = 75 \text{ mbar}$ określić:

- temperaturę wg termometru suchego t ,
 - temperaturę wg termometru mokrego t_m ,
 - temperaturę punktu rosy t_r .
- Odp. $t = 40,2^{\circ}\text{C}$; $t_m = 37^{\circ}\text{C}$; $t_r = 36,5^{\circ}\text{C}$.

9.2.28. Do jakiej temperatury można ochłodzić płyn wypełniający naczynie owinięte zwilżoną tkaniną, jeśli znajduje się ono w pomieszczeniu o temperaturze $t = 20^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi = 70\%$.

Odp. $t = 16,8^{\circ}\text{C}$.

9.2.29. Do oziębiania wody chłodzącej urządzenia technologiczne stosuje się często układ zamknięty, podany na schemacie rys.9.9, polegający na rozbryzgiwaniu wody w otwartej przestrzeni. Krople wody stykając się z otaczającym powietrzem częściowo odparowują a zatem oziębiają się.



Rys.9.9

Powyższy układ zastosowano do chłodzenia wody w ilości $V_w = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ i temperaturze początkowej $t_{w_1} = 30^{\circ}\text{C}$. Zakładając parametry otaczającego powietrza temperatura $t = 20^{\circ}\text{C}$ i wilgotność względna $\varphi = 60\%$ przy $p = 1 \text{ bar}$, określić:

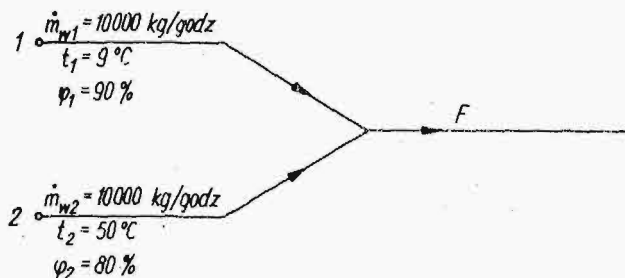
- najniższą temperaturę, do której można ochłodzić wodę t_{w_2} ,

- stratę wody obiegowej wskutek odparowania ΔW , jeśli po ochłodzeniu temperatura wody była równa t_{w_2} zakładając że ochłodzenie nastąpiło wyłącznie przez odparowanie wody.

Odp. $t_{w_2} = 15,5^{\circ}\text{C}$; $\Delta W = 1215 \text{ kg/h}$.

9.2.30. Dwa strumienie wilgotnego powietrza o parametrach podanych na schemacie rys.9.10 zmieszano ze sobą przy stałym ciśnieniu $p = 1$ bar. Określić:

- rodzaj wilgotnego powietrza po zmieszaniu,
- temperaturę powietrza po zmieszaniu t_M ,
- przekrój kanału S po zmieszaniu zakładając prędkość powietrza $w = 15$ m/s.



Rys.9.10

Rozwiązanie

Punkt zmieszania obu strumieni łatwo określa się metodą graficzną, na wykresie $I-x$ (rys.9.11), ustalono położenie punktów określających parametry obu strumieni powietrza.

Punkty 1 i 2 należy połączyć prostą, ponieważ na niej leżeć będzie punkt zmieszania M . Punkt M dzieli odcinek 1-2 w ten sposób, że spełnione jest prawo dźwigni, a mianowicie iloczyn poszczególnych mas suchego powietrza przez odpowiednie odcinki jest sobie równy:

$$\dot{m}_{g1} (1 - M) = \dot{m}_{g2} (M - 2),$$

ponieważ odcinek

$$(1 - 2) = (1 - M) + (M - 2).$$

Znając wartości \dot{m}_{g1} , \dot{m}_{g2} oraz odcinek (1-2) można określić odcinki (1-M) lub (M-2):

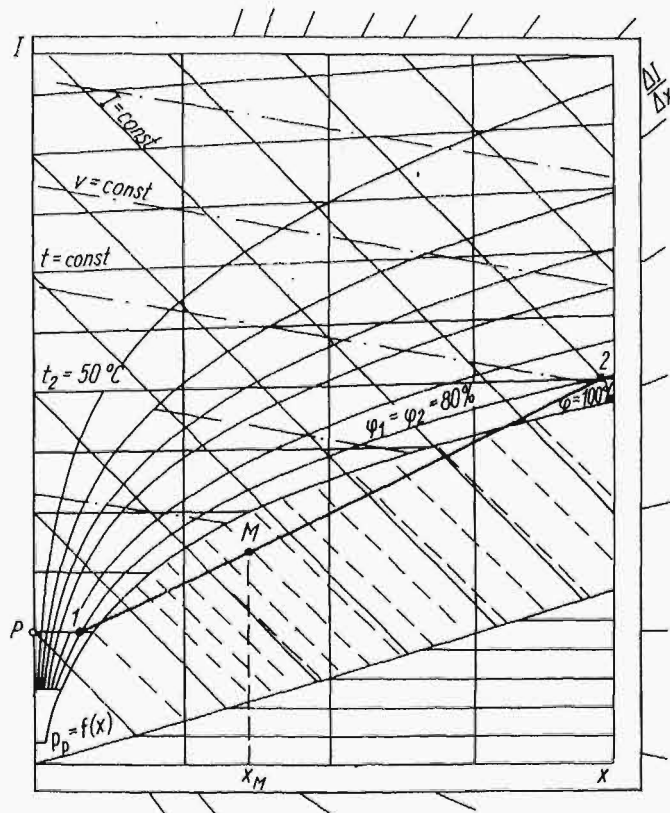
$$(1 - M) = \frac{\dot{m}_{g2}}{\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2}} (1 - 2),$$

$$\dot{m}_{g1} = \frac{10\,000}{1 + 0,00593} = 9925 \text{ kg/h},$$

$$\dot{m}_{g2} = \frac{10\,000}{1 + 0,0656} = 9360 \text{ kg/h}.$$

Posługując się wykresem I-x załączonym do skryptu odcinek (1-2) = 192,5 mm

$$(1 - M) = \frac{9360}{9925 + 9360} \cdot 192,5 = 93,6 \text{ m}.$$



Rys. 9.11

Odmierzając od punktu 1 odcinek długości 93,6 mm wyznacza się punkt M określający parametry wilgotnego powietrza po zmieszaniu.

Punkt M znajduje się pod linią $\varphi = 100\%$, tj. w obszarze powietrza zamglonego mgłą wodną. Zatem po zmieszaniu uzyskano powietrze wilgotne przesycone.

Punkt mieszania M leży na linii stałej temperatury $t = 34^{\circ}\text{C}$, a zatem temperatura po zmieszaniu jest równa $t_M = 34^{\circ}\text{C}$.

Przekrój określa się ze wzoru

$$F = \frac{V_w}{3600 \cdot w}, \quad \text{gdzie } V_w = m_{wm} \cdot v_w;$$

$$\dot{m}_{wM} = \dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w2} - (\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2})(x_M - x_{\max}),$$

$$\dot{m}_{wM} = 10\,000 + 10\,000 - 19\,285(0,0362 - 0,0344),$$

$$\dot{m}_{wM} = 19\,965 \text{ kg/h.}$$

Ponieważ wzór (9.7a) dotyczy gazu, zatem za x należy podstawić maksymalną zawartość wilgoci w postaci pary tj. x_{\max} .

Dla punktu M $x_{\max} = 0,0344 \text{ kg/kg}$

$$v_w = \frac{462(0,622 + 0,0344)(273 + 34)}{(1 + 0,0344) \cdot 1 \cdot 10^5} = 0,9 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$F = \frac{19\,965 \cdot 0,9}{3600 \cdot 15},$$

$$F = 0,3335 \text{ m}^2.$$

9.2.31. Celem uzyskania $\dot{m}_{wM} = 30\,000 \text{ kg/h}$ wilgotnego powietrza o temperaturze $t_M = 40^{\circ}\text{C}$ i $\varphi_M = 80\%$ przy $p = 1 \text{ bar}$ mieszano ze sobą dwa strumienie wilgotnego powietrza o parametrach: pierwszy - $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ i $\varphi_1 = 60\%$, drugi - $\varphi_2 = 50\%$. Określić:

- temperaturę powietrza strumienia drugiego t_2 ,
 - wydatki objętościowe poszczególnych strumieni V_{w1} i V_{w2} przed zmieszaniem się ze sobą,
 - do jakiej temperatury należy podgrzać powietrze po zmieszaniu, aby jego wilgotność względna obniżyła się do $\varphi = 40\%$.
- Odp. $t_2 = 61,5^\circ\text{C}$; $V_{w1} = 13\,400\text{ m}^3/\text{h}$; $V_{w2} = 14\,240\text{ m}^3/\text{h}$;
 $t = 54^\circ\text{C}$.

9.2.32. W wymienniku powierzchniowym z ciągłym odprowadzeniem skroplin oziębiono $m_w = 20\,000\text{ kg/h}$ wilgotnego powietrza o temperaturze $t_1 = 50^\circ\text{C}$ i $\varphi = 50\%$ do temperatury $t_2 = 26^\circ\text{C}$. Obliczyć:

- ilość czynnika chłodzącego W przepływającego przez wymiennik, jeśli przyrost temperatury wynosił $\Delta t = 15\text{ deg}$ przy cieple właściwym $c = 4,187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{deg})$ i sprawności wymiennika $\eta_w = 1$,
- ilość skroplin ΔW odprowadzonych z wymiennika podczas oziębiania powietrza.

Zilustrować przebieg procesów na wykresie I-x.

Rozwiązanie

Na wykresie I-x (rys.9.12) zilustrowano przebieg procesu chłodzenia wilgotnego powietrza w wymienniku powierzchniowym.

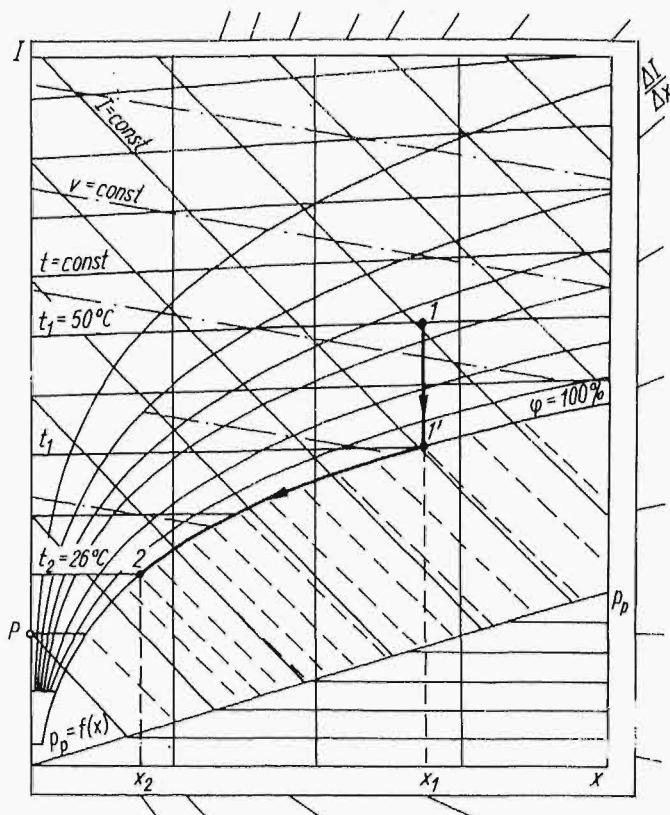
Do obliczenia ilości czynnika chłodzącego niezbędne jest określenie ilości ciepła odebranego podczas oziębiania

$$Q = \dot{m}_g (I_1 - I_2) .$$

Ilość czynnika chłodzącego określa się z zależności:

$$Q = W c \Delta t \eta_w ,$$

$$W = \frac{\dot{m}_g (I_1 - I_2)}{\eta_w c \Delta t} .$$



Rys.9.12

Z wykresu I-x odczytuje się występujące we wzorach parametry

$$\dot{m}_g = \frac{20\,000}{1 + 0,0404} = 19\,250 \text{ kg/h},$$

$$W = \frac{19\,250(155 - 81,25)}{4 \cdot 187 \cdot 15},$$

$$W = 22\,600 \text{ kg/h}.$$

Ilość skroplin określa się ze wzoru:

$$\Delta \dot{m}_w = \dot{m}_g (x_1 - x_2),$$

$$\Delta \dot{m}_w = 19\,250(0,0404 - 0,0222),$$

$$\Delta \dot{m}_w = 350 \text{ kg}.$$

9.2.33. 25 000 m³/h wilgotnego powietrza o ciśnieniu $p = 1$ bar temperaturze $t_1 = 50^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_2 = 30\%$ poddano procesom chłodzenia do temperatury $t_2 = 30^\circ\text{C}$ a następnie podgrzania do temperatury $t_3 = 60^\circ\text{C}$ (rys.9.13). Obliczyć:

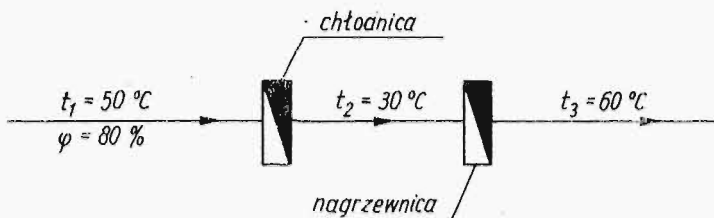
- parametry powietrza po podgrzaniu φ_3 , p_{p3} ,
- ilość wykroplonej wody w chłodnicy $\Delta \dot{m}_w$,
- ilość ciepła odebranego powietrzu w chłodnicy Q_{1-2} ,
- ilość ciepła doprowadzonego do powietrza w nagrzewnicy

Q_{2-3} .

Przebieg obróbki zilustrować na wykresie I-x.

Odp. $\varphi_3 = 21,5\%$; $p_{p3} = 42,5$ mbar; $\Delta \dot{m}_w = 985$ kg

$Q_{1-2} = 3,06$ GJ/h; $Q_{2-3} = 0,763$ GJ/h.



Rys.9.13

9.2.34. Powietrze wilgotne przy ciśnieniu $p = 1$ bar o temperaturze $t = 50^\circ\text{C}$ i stopniu nasycenia $\psi = 80\%$ ochłodzono w wymienniku ciepła przy jednoczesnym odprowadzeniu skroplin do temperatury $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Określić:

- temperaturę punktu rosy t_r ,
- ilość ciepła, które powinno być odebrane od 1 kg powietrza wilgotnego Q_{1-2} .

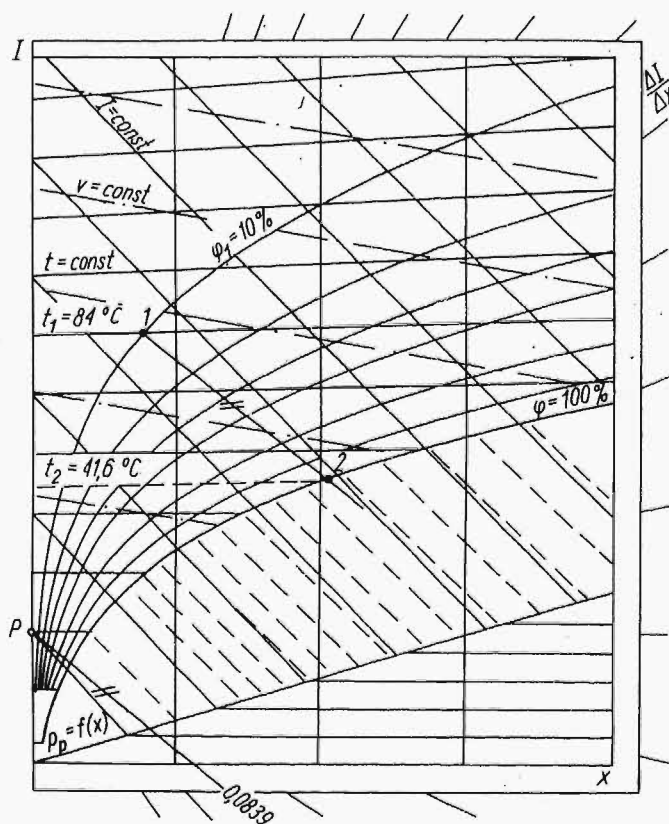
Odp. $t_r = 45,25^\circ\text{C}$; $Q_{1-2} = 156$ kJ.

9.2.35. Powietrze wilgotne o początkowych parametrach $t_1 = 84^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 10\%$ oziębiono izobarycznie ($p = 1$ bar) przez natrysk wodą o temperaturze $t_w = 20^\circ\text{C}$ tak że po oziębieniu wilgotność względna powietrza wzrosła do $\varphi = 100\%$. Określić:

- temperaturę powietrza t_2 po jego oziębieniu,
- ilość odparowanej wody Δm w procesie oziębiania w odniesieniu do masy $m_{w1} = 1$ kg powietrza wilgotnego o początkowych parametrach.

Rozwiązanie

Proces bezpośredniego nagrzewania lub chłodzenia wilgotnego powietrza (z jednoczesną wymianą masy wilgoci) przy pomocy cieczy lub pary można traktować jako mieszanie się ze sobą wilgotnego powietrza z fikcyjnym wilgotnym powietrzem, w którym nie występuje suche powietrze. Kierunek linii zmieszania przechodzącej przez punkt określający parametry wilgotnego powietrza określa współczynnik kierunkowy $\frac{\Delta I}{\Delta x}$, który przy natrysku wodą lub parą równy jest ich entalpii.



Rys.9.14

Na wykresie I-x - rys.9.14 nanosi się punkt charakteryzujący stan powietrza oziębianego 1. Kierunek linii mieszania $\frac{\Delta I}{\Delta x}$ określa wartość entalpii wody odczytana z tabl.10.

Z tabl.10 dla $t_w = 20^\circ\text{C}$ odczytano $i = 83,9 \text{ kJ/kg}$,
a zatem $\frac{\Delta I}{\Delta x} = 0,0839 \text{ MJ/kg}$.

Aby wyznaczyć kierunek mieszania, należy na podziałce kierunkowej $\frac{\Delta I}{\Delta x}$ naniesionej na obwodzie wykresu znaleźć odpowiednie wartości $\frac{\Delta I}{\Delta x} = i = 0,0839 \text{ MJ/kg}$. Następnie kreskę tę należy połączyć linią prostą z punktem P określającym bieg podziałki. Kierunek tej prostej jest kierunkiem mieszania. Prowadząc linię równoległą do powyższej linii przechodzącą przez punkt 1 ustala się linię, na której leżeć będzie punkt mieszania M.

Z treści zadania wynika, że punkt mieszania M będzie leżał na przecięciu się linii mieszania z linią $\varphi = 100\%$.

Punktowi mieszania M na wykresie I-x odpowiada temperatura powietrza po oziębieniu równa:

$$t_2 = 43,75^\circ\text{C}.$$

Zawartość wilgoci x_2 po oziębieniu jest większa od x_1 przed oziębieniem, a zatem nastąpiło odparowanie wody. Ilość odparowanej wody oblicza się ze wzoru:

$$\Delta m = m_g(x_2 - x_1),$$

$$\Delta m = \frac{m_{w1}}{1 + x_1} (x_2 - x_1),$$

występujące we wzorze parametry x_1, x_2 odczytuje się z wykresu I-x dla punktu 1 i 2

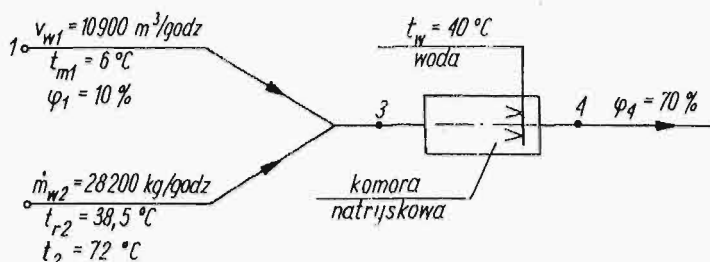
$$\Delta m = \frac{1}{1 + 0,0367} (0,061 - 0,0367),$$

$$\Delta m = 0,0234 \text{ kg}.$$

9.2.36. Dwa strumienie powietrza wilgotnego w ilości i parametrach jak podano na rys.9.15 mieszano ze sobą przy $p = 1 \text{ bar}$ a po mieszanii stosując natrysk wodą o temperaturze

$t_w = 40^\circ\text{C}$ doprowadzono do stanu, w którym wilgotność względna osiągnęła wartość $\varphi_4 = 70\%$. Określić:

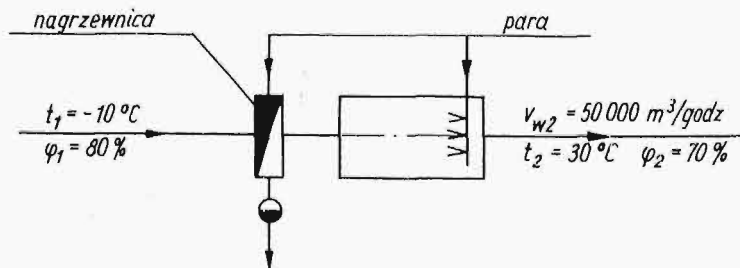
- parametry powietrza po zmieszaniu strumieni wilgotnego powietrza $t_3, \varphi_3, I_3, p_{p3}$;
- parametry powietrza po wyjściu z komory natryskowej t_4, I_4, p_{p4} ;
- przekrój kanału powietrza przed S_3 i za S_4 komorą zmieszania zakładając prędkość przepływu powietrza w kanale $w = 20 \text{ m/s}$,
- ilość wody, która odparowała w komorze natryskowej Δm .



Rys.9.15

Odp. $t_3 = 55^\circ\text{C}$; $\varphi_3 = 30\%$; $I_3 = 136 \text{ kJ/kg}$; $p_{p3} = 45 \text{ mbar}$;
 $t_4 = 41^\circ\text{C}$; $I_4 = 137 \text{ kJ/kg}$; $p_{p4} = 55 \text{ mbar}$,
 $S_3 = 0,571 \text{ m}^2$; $S_4 = 0,55 \text{ m}^2$; $\Delta m = 240 \text{ kg/h}$.

9.2.37. Zapotrzebowanie powietrza dla celów wentylacji wynosi $V_w = 50\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$, temperaturze



Rys.9.16

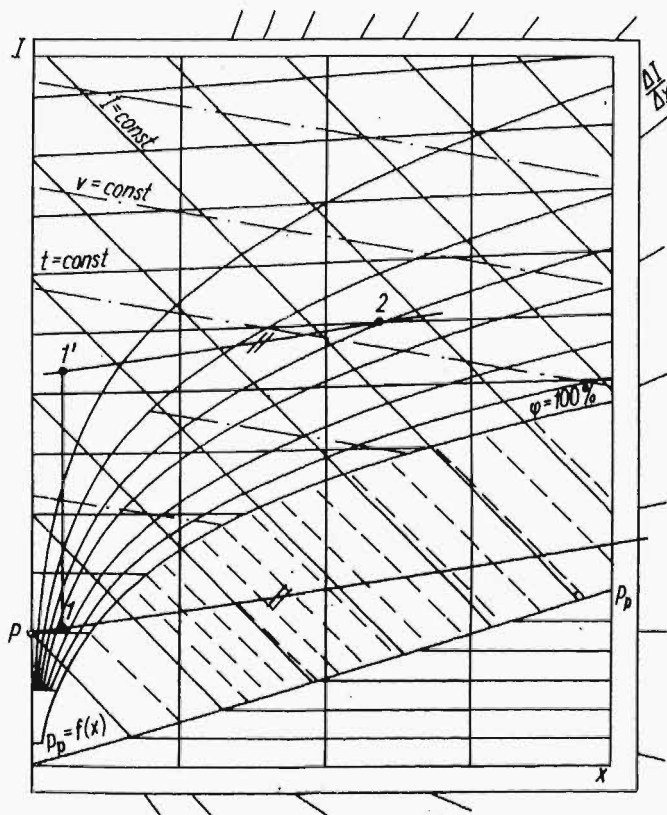
$t_2 = 30^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_2 = 70\%$. Powietrze o powyższych parametrach uzyskano przez ogrzewanie i nawilżanie powietrza zewnętrznego o temperaturze $t_1 = -10^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 80\%$ stosując układ podany na schemacie rys.9.16. Do nawilżania powietrza zastosowano parę suchą nasyconą o ciśnieniu $p = 1,1$ bar.

Obliczyć ilość pary m potrzebnej do przygotowania powietrza.

Zilustrować na wykresie I-x przebieg procesów przygotowania powietrza.

Rozwiązanie

Znając parametry stanu powietrza wilgotnego przed i po obróbce ustala się położenie punktów określające te stany na wykresie I-x rys.9.17. Zawartość wilgoci po obróbce (punkt 2)



Rys.9.17

jest większa niż przed obróbką (punkt 1), wobec tego nastąpiło nawilżenie powietrza, a zatem punkt 2 jest punktem zmieszania w tym przypadku z parą wodną. Punkt 2 powinien leżeć na linii zmieszania a więc przez ten punkt prowadzi się linię prostą o kierunku $\frac{\Delta I}{\Delta x}$ równym entalpii pary, którą nawilżono powietrze.

Linia zmieszania przechodząca przez punkt 2 przebiega wysoko ponad punktem 1 charakteryzującym stan początkowy powietrza. Aby można było uzyskać stan końcowy powietrza (punkt 2) przez nawilżenie parą powietrza określonego punktem 1, należy - stosując podgrzewanie pośrednie (w nagrzewnicy) przy $x = \text{const}$ - doprowadzić początkowe parametry 1 do stanu określonego punktem 1' znajdującego się na ustalonej wyżej linii zmieszania.

Ilość pary do obróbki składać się będzie z pary potrzebnej do podgrzewania pośredniego $\dot{m}_{1-1'}$ na drodze 1-1' oraz bezpośredniego z jednoczesnym nawilżaniem \dot{m}_{1-2} na drodze 1'-2.

Ilość pary $\dot{m}_{1-1'}$ określa się ze wzoru:

$$\dot{m}_{1-1'} = \frac{Q_{1-1'}}{i_1 - i_2},$$

$$Q_{1-1'} = \dot{m}_g (I_{1'} - I_1),$$

$$\dot{m}_g = \frac{V_{w1}}{v_{w1} (1 + x_1)}.$$

Podstawiając odczytane z wykresu I-x parametry dla punktu 1 i 1' oblicza się $\dot{m}_{1-1'}$.

Ze względu na to, że dla punktu 1 nie można z wykresu określić wartości objętości właściwej powietrza, wartość tę oblicza się ze wzoru:

$$v_w = \frac{462(0,622 + x_1)T}{(1 + x_1) \cdot p},$$

$$v_w = \frac{462(0,622 + 0,00135)273 - 10}{(1 + 0,00135) \cdot 1 \cdot 10^5},$$

$$v_w = 0,755 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$\dot{m}_g = \frac{50\,000}{0,755(1 + 0,00135)} = 66\,250 \text{ kg},$$

$$\dot{m}_{1-1'} = \frac{66\,250 \cdot 31,25 - (-7)}{2675 - 417,4}, \quad \dot{m}_{1-1'} = 1123 \text{ kg/h}.$$

Ilość pary $\dot{m}_{1'-2}$ określa się ze wzoru:

$$\dot{m}_{1'-2} = m_g(x_2 - x_1),$$

$$\dot{m}_{1'-2} = 66\,250(0,019 - 0,00135), \quad \dot{m}_{1'-2} = 1165 \text{ kg/h},$$

$$\dot{m} = 1123 + 1165, \quad \dot{m} = 2288 \text{ kg/h}.$$

9.2.38. Stosując proces ogrzewania i nawilżania wodą o temperaturze $t = 10^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu $p = 1$ bar uzyskano z powietrza o temperaturze $t_1 = -5^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 80\%$ powietrze o parametrach $t_2 = 20^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_2 = 70\%$ w ilości $V_w = 25\,000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Określić:

- temperaturę powietrza t_1' po pośrednim podgrzaniu powietrza przed nawilżeniem,

- ilość ciepła dla podgrzewania pośredniego $Q_{1-1'}$.

Zilustrować przebieg obróbki powietrza na wykresie I-x.

Odp. $t_1' = 40^\circ\text{C}$; $Q_{1-1'} = 1490 \text{ MJ/h}$.

9.2.39. Powietrze zamglone w ilości $m_{w1} = 1000 \text{ kg}$, temperaturze $t_1 = 24^\circ\text{C}$ i stosunku $\frac{x}{x_{\max}} = 1,25$ w wyniku zmieszania z gorącym powietrzem w ilości m_{w2} , temperaturze t_2 i wilgotności $\varphi_2 = 10\%$ uzyskało temperaturę $t_M = 20^\circ\text{C}$ i wilgotności $\varphi_M = 70\%$.

Określić:

- temperaturę gorącego powietrza t_2 ,

- ilość gorącego powietrza m_{w2} ,

- niezbędną ilość ciepła dla podgrzania (w nagrzewnicy)

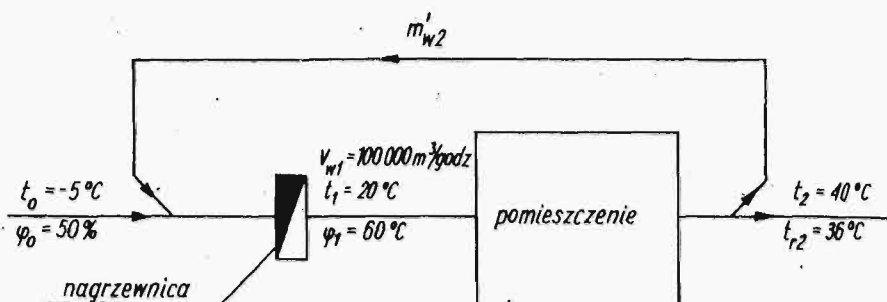
do $t_3 = 40^\circ\text{C}$ powietrza po zmieszaniu Q_{M-3} .

Zilustrować przebieg procesu na wykresie I-x.

Odp. $t_2 = 25^\circ\text{C}$; $m_{w2} = 1533 \text{ kg}$; $Q_{M-3} = 51,6 \text{ MJ}$.

9.2.40. Dla danych liczbowych podanych na schemacie rys. 9.18 ilustrujących układ wentylacji z recyrkulacją powietrza w ilości m'_{w2} określić:

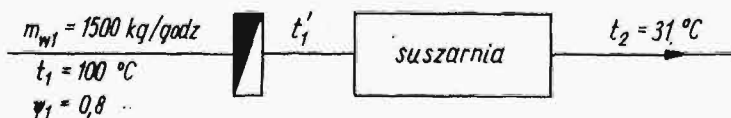
- ilość powietrza recyrkulacyjnego m'_{w2} ,
- ilość ciepła Q_N potrzebną na podgrzanie w nagrzewnicy powietrza uzyskanego ze zmieszania się powietrza recyrkulacyjnego ze świeżym powietrzem o parametrach t_o i φ_o ,
- ile ciepła pobrało powietrze przepływające przez wentylowane pomieszczenie Q_{1-2} ,
- ilość wilgoci uniesionej przez powietrze z pomieszczenia ΔW_{1-2} .



Rys.9.18

Odp. $m'_{w2} = 22\,300 \text{ kg/h}$; $Q_N = 1778 \text{ MJ/h}$;
 $Q_{1-2} = 10\,050 \text{ MJ/h}$; $\Delta W_{1-2} = 3495 \text{ kg/h}$.

9.2.41. Dla odprowadzenia $\Delta \dot{m}_w = 70 \text{ kg/h}$ wody z suszonego materiału doprowadza się do suszarni rys.9.19 powietrze w ilości $\dot{m}_w = 3500 \text{ kg/h}$ o temperaturze $t_1 = 10^\circ\text{C}$ i stopniu



Rys.9.19

nasycenia $\varphi_1 = 0,8$ przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$. Temperatura powietrza opuszczającego suszarnię $t_2 = 31^\circ\text{C}$. Określić:

$$\dot{m}_{g1} = \frac{\dot{m}_{w1}}{1 + x_1}, \quad \dot{m}_{g1} = \frac{3500}{1 + 0,0059}, \quad \dot{m}_{g1} = 3475 \text{ kg/h};$$

$$x_2 = 0,0059 + \frac{70}{3475}, \quad x_2 = 0,0059 + 0,02012,$$

$$x_2 = 0,02602 \text{ kg/kg}.$$

Przecinając linię stałej zawartości wilgoci $x_2 = 0,02602 \text{ kg/kg}$ z linią stałej temperatury $t_2 = 31^\circ\text{C}$ określa się położenie punktu 2, któremu odpowiada

$$\varphi_2 = 90\%.$$

Wobec tego, że proces suszenia zachodzi przy stałej entalpii (tj. izoentalpowo), punkt 1' określający stan powietrza po nagrzaniu będzie leżał na przecięciu się linii stałej zawartości $x_1 = x_{1'} = 0,0202 \text{ kg/kg}$ z linią stałej entalpii $I_2 = I_{1'} = 97,6 \text{ kJ/kg}$, na której leży punkt 2. Przecięciu się tej linii odpowiada temperatura

$$t_{1'} = 82^\circ\text{C}.$$

Wartość zapotrzebowania ciepła q na odparowanie 1 kg wody w suszarni określa stosunek

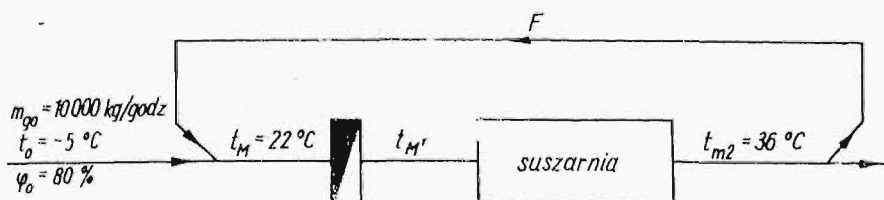
$$q = \frac{Q_{1-1'}}{W} = \frac{\dot{m}_g(I_{1'} - I_1)}{\dot{m}_g(x_2 - x_1)} = \frac{\Delta I}{\Delta x},$$

$$q = \frac{98,3 - 25}{0,02602 - 0,0059}, \quad q = 3355 \text{ kJ/kg} \quad 3,355 \text{ MJ/kg}.$$

Wartość q może być określona również z wykresu $I-x$ za pomocą podziałki kierunkowej $\frac{\Delta I}{\Delta x}$.

W tym celu należy przez punkty 1 i 2 przeprowadzić linię prostą (1-2) a następnie do tej linii przeprowadzić prostą równoległą przechodzącą przez biegun podziałki P. Drugi koniec prostej wyznacza na podziałce $\frac{\Delta I}{\Delta x}$ wartość q , która w interesującym przypadku wynosi $q = 3,3 \text{ MJ/kg}$.

9.2.42. Celem obniżenia zapotrzebowania ciepła dla podgrzewania powietrza przed jego dopływem do nagrzewnicy, zastosować w układzie suszarni recyrkulację powietrza, jak to ilustruje schemat rys.9.21.



Rys.9.21

Dla danych podanych na schemacie określić:

- temperaturę powietrza po podgrzaniu $t_{M'}$,
- ilość wody odparowanej w suszarni i uniesionej z powietrzem $\Delta \dot{m}$,
- przekrój przewodu recyrkulacyjnego S przy prędkości przepływu powietrza w przewodzie $w = 20$ m/s.

Odp. $t_{M'} = 81^\circ\text{C}$; $\Delta \dot{m} = 361$ kg/h; $S = 0,1362$ m².

9.2.43. Z suszonego materiału odprowadza się w ciągu godziny $W = 40$ kg/h wody. Do suszarni doprowadza się powietrze o temperaturze $t_1 = 5^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\varphi_1 = 80\%$. Zawartość wilgoci w powietrzu opuszczającym suszarnię $x_2 = 0,025$ kg/kg. Zapotrzebowanie ciepła na odparowanie 1 kg wody dla przyjętej suszarni $q = 4,0$ MJ/kg. Określić:

- parametry powietrza $t_{1'}$, $\varphi_{1'}$, po podgrzaniu przed wprowadzeniem do suszarni;
- parametry powietrza opuszczającego suszarnię t_2 , φ_2 ;
- ilość powietrza przepływającego przez suszarnię \dot{m}_g .

Odp. $t_{1'} = 90^\circ\text{C}$; $\varphi_{1'} = 0,74\%$; $t_2 = 34^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 75\%$;

$\dot{m}_g = 1485$ kg/h.