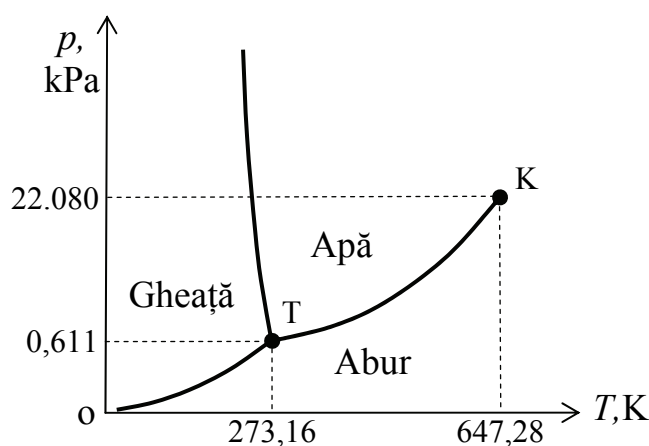


## Capitolul 9

# AERUL UMED

**Aerul umed** reprezintă un amestec de gaze aflat în stare de echilibru termodinamic, compus din aer uscat (în principal azot și oxigen) și vapori de apă. În anumite condiții, vaporii de apă pot condensa în picături (la temperaturi mai mari decât cea a punctului triplu:  $t_t = 0,01^\circ\text{C}$  sau  $T_t = 273,16\text{ K}$ ), formând ploaie sau ceață (dispersie de picături fine) sau se pot transforma în fază solidă (la temperaturi mai mici decât cea a punctului triplu) formând ninsoare (fulgi de zăpadă) sau grindină (particule de gheață).



**Fig. 9.1:** Diagrama  $p$ - $T$  pentru apă

Aplicații ale aerului umed se întâlnesc în procese caracteristice instalațiilor de ventilare - climatizare - condiționare ( $-40^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}$ ), uscare ( $+40^\circ\text{C} \dots +300^\circ\text{C}$ ), răcire ( $-190^\circ\text{C} \dots +10^\circ\text{C}$ ), protecția atmosferei ( $+10^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$ ) și în industria chimică la combinarea sau separarea fazelor ( $-200^\circ\text{C} \dots +300^\circ\text{C}$ ).

Valorile parametrilor critici pentru aerul uscat sunt  $p_{ka}=37,67$  bar și  $t_{ka}= -140,6^{\circ}\text{C}$  ( $T_{ka}= 132,55$  K) iar cei ai apei  $p_{kw}= 220,8$  bar și  $t_{kw}=374,13^{\circ}\text{C}$  ( $T_{kw}= 647,28$  K).

În condiții obișnuite de presiune și temperatură, amestecul dintre aerul uscat și vaporii de apă (aerul umed) se comportă ca un gaz ideal.

**Parametrii de stare** caracteristici ai aerului umed sunt: umiditatea relativă  $\varphi$ , umiditatea absolută (conținutul de umiditate)  $x$ , gradul de saturație  $\psi$ , masa molară  $\mathcal{M}$ , densitatea  $\rho$ , entalpia specifică  $h$ , temperatura punctului de rouă  $t_r$  și temperatura de saturație adiabatică (temperatura termometrului umed)  $t_w$ .

**Umiditatea relativă**, reprezintă raportul dintre cantitatea de vaporii de apă efectivă și cea maximă (la starea de saturație) pe care o poate conține un volum de aer umed la o temperatură dată:

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s} = \frac{\rho_v V}{\rho_s V} = \frac{\rho_v}{\rho_s} \quad [-]$$

Aplicând ecuația termică de stare a gazelor perfecte, rezultă:

$$\varphi = \frac{\frac{p_v}{R_v T}}{\frac{p_s}{R_v T}} = \frac{p_v}{p_s} \quad [-]$$

Umiditatea relativă se poate exprima și în procente și ia valori între 0% pentru aerul uscat și 100% pentru aerul saturat cu vaporii de apă.

În multe cazuri practice, presiunea parțială a vaporilor de apă se calculează în funcție de umiditatea relativă și de presiunea de saturație, care depinde numai de temperatură:

$$p_v = \varphi p_s \quad [\text{Pa}]$$

**Umiditatea absolută** sau **conținutul de umiditate**, reprezintă cantitatea de vaporii de apă conținută într-un kilogram de aer uscat:

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

Aplicând ecuația termică de stare a gazelor perfecte și legea lui Dalton, rezultă:

$$x = \frac{\frac{p_v V}{R_v T}}{\frac{p_a V}{R_a T}} = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p_a} = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p - p_v} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

Înlocuind valorile constantelor caracteristice  $R_a = 287,04 \text{ J/kg K}$  și  $R_v = 461,5 \text{ J/kg K}$ , rezultă:

$$x = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

Aerul umed, aflat la o anumită temperatură, are valoarea maximă a conținutului de umiditate la starea de saturație ( $\varphi = 1$ ):

$$x_s = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

**Gradul de saturație**, reprezintă raportul dintre conținutul de umiditate efectiv și conținutul de umiditate maxim (la starea de saturație) corespunzător aceleiași temperaturi:

$$\psi = \frac{x}{x_s} = \frac{0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}}{0,622 \frac{p_s}{p - p_s}} = \varphi \frac{p - p_s}{p - \varphi p_s} \quad [-]$$

**Observație:** Pentru valori ale umidității relative mai mari de 60%, gradul de saturație și umiditatea relativă sunt practic egale:

$$\varphi > 0,6 \Rightarrow \psi = \varphi$$

Ca și umiditatea relativă, gradul de saturație se poate exprima în procente și ia valori între 0% pentru aerul uscat și 100% pentru aerul saturat.

**Masa molară**, a aerului umed se calculează cu relațiile de la amestecuri de gaze ideale:

$$\mathcal{M} = r_a \mathcal{M}_a + r_v \mathcal{M}_v = \frac{p_a}{p} \mathcal{M}_a + \frac{p_v}{p} \mathcal{M}_v = \frac{p - p_v}{p} \mathcal{M}_a + \frac{p_v}{p} \mathcal{M}_v$$

în care  $r_a$  și  $r_v$  reprezintă participațiile volumice ale aerului uscat și respectiv vaporilor de apă din aerul umed. Rezultă:

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_a - \frac{p_v}{p} (\mathcal{M}_a - \mathcal{M}_v) \quad [\text{kg/kmol}]$$

$$\mathcal{M} = 28,96 - \frac{p_v}{p} (28,96 - 18,02) \quad [\text{kg/kmol}]$$

$$\mathcal{M} = 28,96 - 10,94 \frac{p_v}{p} \quad [\text{kg/kmol}]$$

**Densitatea**, se calculează prin însumarea densităților aerului uscat și a vaporilor de apă:

$$\rho = \rho_a + \rho_v = \frac{p_a}{R_a T} + \frac{p_v}{R_v T} = \frac{p - p_v}{R_a T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\rho = \frac{p}{R_a T} - \frac{p_v}{T} \left( \frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_v} \right) \quad [\text{kg/m}^3]$$

**Remarcă:** În aceleași condiții de presiune și temperatură, densitatea aerului umed este mai mică decât cea a aerului uscat.

**Entalpia specifică**, se calculează pentru 1 kg de aer uscat care conține  $x$  kg de vaporii de apă și deci se raportează la  $(1 + x)$  kg de aer umed:

$$h = h_{1+x} = \frac{m_a h_a + m_v h_v}{m_a} = h_a + x h_v \quad [\text{J/kg}_a]$$

Entalpia specifică pentru aerul uscat are următoarea expresie:

$$h_a = c_{p_a} t = 1,004 t \quad [\text{kJ/kg}_a]$$

iar pentru vaporii de apă:

$$h_v = r_o + c_{p_v} t = 2.500 + 1,86 t \quad [\text{kJ/kg}_v]$$

unde  $r_o$  reprezintă căldura latentă de vaporizare a apei la  $0^\circ\text{C}$ . Rezultă:

$$h = 1,004 t + x(2.500 + 1,86 t) \quad [\text{kJ/kg}_a]$$

În cazul în care aerul umed este suprasaturat cu picături de apă ( $t > t_t = 0,01^\circ\text{C}$ ), conținutul total de umiditate reprezintă suma dintre masa vaporilor de apă aflați la starea de saturație și masa apei în stare lichidă conținută într-un kilogram de aer uscat:

$$x = \frac{m_s + m_w}{m_a} = x_s + x_w \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

În acest caz, entalpia specifică va avea următoarea expresie:

$$h = h_a + x_s h_v + x_w h_w \quad [\text{J/kg}_a]$$

$$h = c_{pa} t + x_s (r_o + c_{pv} t) + x_w c_{pw} t \quad [\text{J/kg}_a]$$

$$h = 1,004t + x_s (2.500 + 1,86t) + 4,186(x - x_s)t \quad [\text{kJ/kg}_a]$$

În cazul în care aerul umed este suprasaturat cu fulgi de zăpadă sau particule de gheață ( $t < t_t = 0,01^\circ\text{C}$ ), conținutul total de umiditate reprezintă suma dintre masa vaporilor de apă aflați la starea de saturație și masa apei în stare solidă (zapadă sau gheață) conținută într-un kilogram de aer uscat:

$$x = \frac{m_s + m_g}{m_a} = x_s + x_g \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

În acest caz, entalpia specifică va avea următoarea expresie:

$$h = h_a + x_s h_v + x_g h_g \quad [\text{J/kg}_a]$$

$$h_g = c_{pg} t - \lambda_o \quad [\text{J/kg}_a]$$

$$h = c_{pa} t + x_s (r_o + c_{pv} t) + x_g (c_{pg} t - \lambda_o) \quad [\text{J/kg}_a]$$

unde  $\lambda_o$  reprezintă căldura latentă de solidificare a apei la  $0^\circ\text{C}$ . Rezultă:

$$h = 1,004t + x_s (2.500 + 1,86t) - (x - x_s)(333 - 2,05t) \quad [\text{kJ/kg}_a]$$

**Temperatura punctului de rouă**, reprezintă temperatura la care vaporii de apă din aerul umed condensează în urma unui proces de răcire izobar în care conținutul de umiditate rămâne constant.

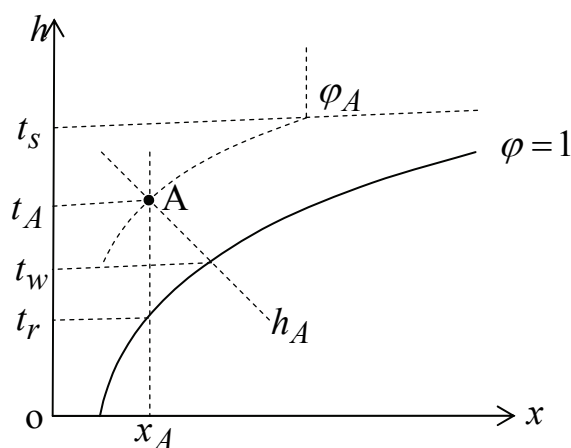
**Temperatura de saturație adiabatică**, reprezintă temperatura de condensare a vaporilor de apă din aerul umed într-un proces de răcire izobar și adiabatic.

**Diagrama h-x (Mollier)** este construită pentru o anumită valoare a presiunii totale, în axe oblice, având unghiul astfel ales încât izoterma de 0°C să fie orizontală. Valorile umidității absolute de pe axa înclinată sunt proiectate pe orizontală. Izentalpele sunt drepte paralele oblice iar izotermele formează un fascicul divergent de drepte în sensul de creștere al umidității absolute. Liniile de umiditate relativă constantă sunt curbe care, pentru valori ale temperaturii mai mari decât cea de saturație corespunzătoare presiunii aerului umed,  $t_s$ , devin drepte verticale și sunt construite în baza următoarei relații:

$$\varphi = \frac{x p}{0,622 p_s + x p_s} \quad [-]$$

Presiunea parțială a vaporilor de apă variază în funcție de conținutul de umiditate după următoarea relație:

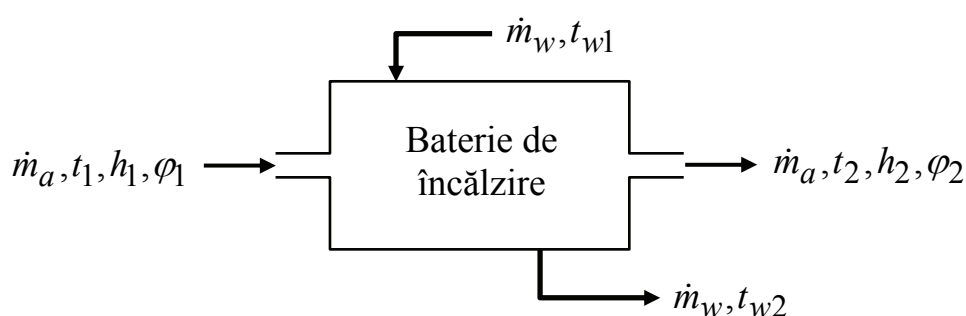
$$p_v = \frac{x p}{0,622 + x} \quad [\text{Pa}]$$



**Fig. 9.2:** Diagrama h-x (Mollier) pentru aer umed

**Procesele fundamentale** cu aer umed sunt: încălzirea, răcirea, amestecul și umidificarea.

**Încălzirea aerului umed** se realizează în schimbătoare de căldură numite baterii de încălzire. În timpul procesului, conținutul de umiditate al aerului umed rămâne constant ( $x = \text{const.}$ ). Agentul termic de încălzire (agentul primar) poate fi apa caldă, aburul de joasă presiune, gazele de ardere, etc.

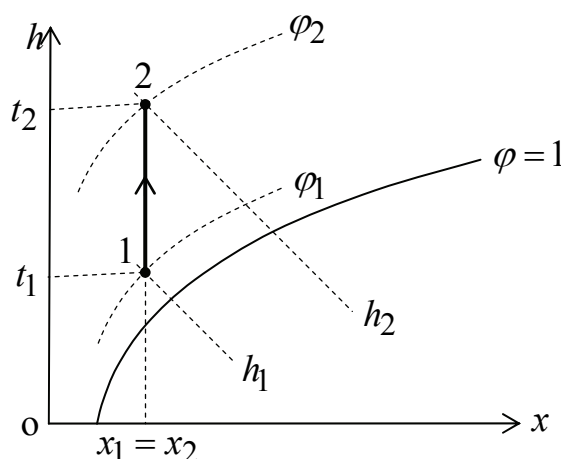


**Fig. 9.3:** Schema bateriei de încălzire

Bilanțul termic al bateriei de încălzire este:

$$\dot{Q}_{bi} = \eta_{bi} \dot{m}_w c_{pw} (t_{w1} - t_{w2}) = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad [\text{W}]$$

unde  $\eta_{bi}$  reprezintă randamentul bateriei de încălzire.

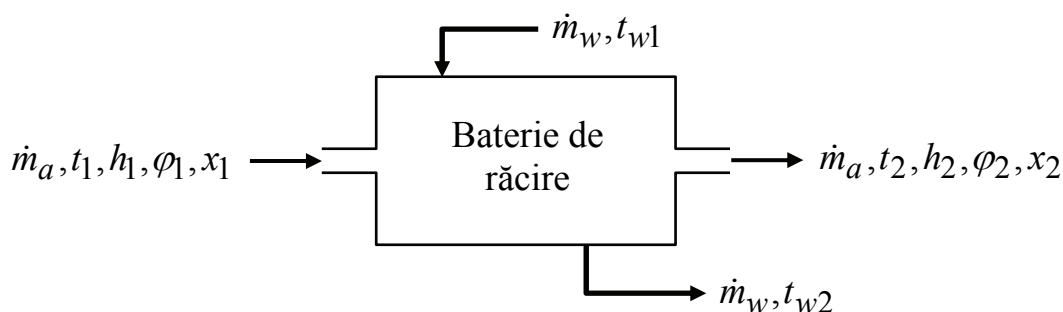


**Fig. 9.4:** Reprezentarea încălzirii în diagrama  $h-x$

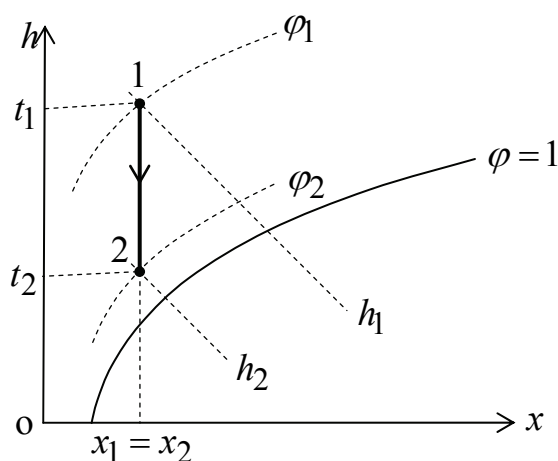
Debitul de agent termic necesar se calculează cu următoarea relație:

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_a (h_2 - h_1)}{\eta_{bi} c_{pw} (t_{w1} - t_{w2})} \quad [\text{kg/s}]$$

**Răcirea aerului umed** se realizează în baterii de răcire în care agentul de răcire (agentul secundar) poate fi apa răcită, saramurile, amoniacul, freonii, hidrocarburile, etc. Schema este asemănătoare cu cea a bateriei de încălzire. Procesul se desfășoară la conținut de umiditate constant.



**Fig. 9.5:** Schema bateriei de răcire



**Fig. 9.6:** Reprezentarea răcirii în diagrama  $h-x$

Bilanțul termic al bateriei de răcire este:

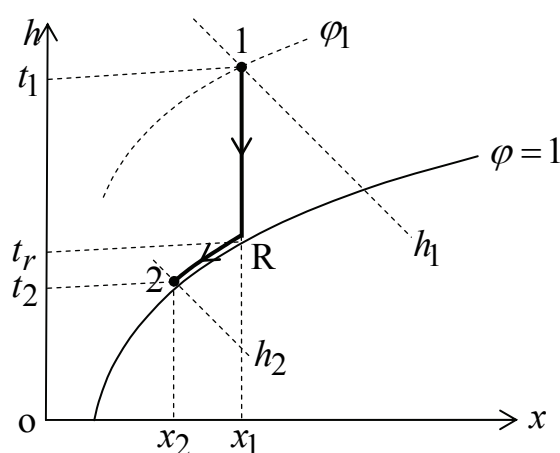
$$\dot{Q}_{br} = \eta_{br} \dot{m}_a (h_1 - h_2) = \dot{m}_w c_{pw} (t_{w2} - t_{w1}) \quad [\text{W}]$$



unde  $\eta_{br}$  reprezintă randamentul bateriei de răcire iar debitul de agent de răcire necesar se calculează cu relația:

$$\dot{m}_w = \frac{\eta_{br} \dot{m}_a (h_1 - h_2)}{c_{pw} (t_{w2} - t_{w1})} \quad [\text{kg/s}]$$

Dacă temperatura finală a aerului umed scade sub valoarea punctului de rouă, o parte din vaporii de apă condensează, conținutul de umiditate din aerul umed scade iar procesul se numește **răcire cu uscare**.



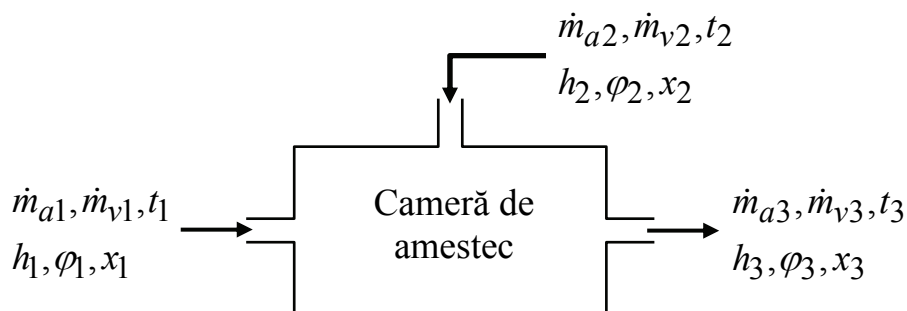
**Fig. 9.7:** Reprezentarea răcirii cu uscare în diagrama  $h-x$

**Observație:** Practic, temperatura finală a aerului umed, la răcirea cu uscare, nu atinge starea de saturație, valorile maxime ale umidității relative fiind cuprinse între 95 și 98%.

Debitul de condens rezultat în urma răcirii cu uscare va fi:

$$\dot{m}_{cds} = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2} = \dot{m}_a (x_1 - x_2) \quad [\text{kg/s}]$$

**Amestecul** a două debite de aer umed, având stări diferite, se realizează în camere de amestec.



**Fig. 9.8:** Schema camerei de amestec

Parametrii stării finale se determină din ecuațiile de conservare a masei și de bilanț termic, exprimate sub formă de debite (fluxuri):

$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3}$$

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3}$$

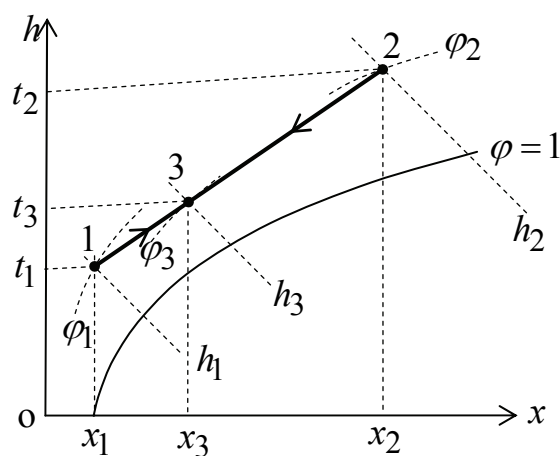
$$\dot{m}_{a1} x_1 + \dot{m}_{a2} x_2 = \dot{m}_{a3} x_3 = (\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}) x_3$$

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3 = (\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}) h_3$$

Rezultă că:

$$x_3 = \frac{\dot{m}_{a1} x_1 + \dot{m}_{a2} x_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

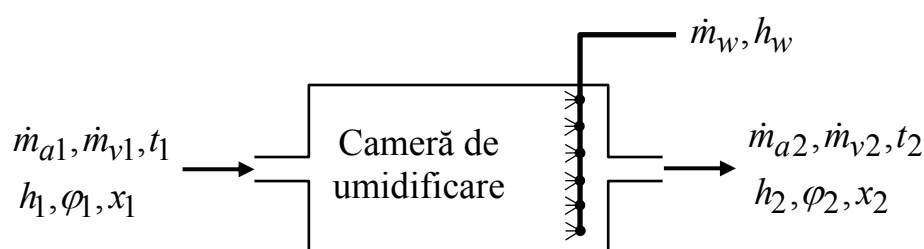
$$h_3 = \frac{\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}} \quad [\text{J}/\text{kg}_a]$$



**Fig. 9.9:** Reprezentarea amestecului în diagrama  $h$ - $x$

**Remarcă:** Din punct de vedere grafic, punctul stării de amestec M, se află în diagramă pe segmentul de dreaptă care unește punctele de stare 1 și 2, având distanța față de acestea invers proporțională cu debitele de aer corespunzătoare.

**Umidificarea aerului umed** se realizează în camere de umidificare prin pulverizare de apă sau injectare de abur.



**Fig. 9.10:** Schema camerei de umidificare

Parametrii stării finale se determină din ecuațiile de conservare a masei și de bilanț termic exprimate sub formă de debite (fluxuri):

$$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_w = \dot{m}_{v2} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_a x_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_a x_2 \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_a (x_2 - x_1) = \dot{m}_w \quad [\text{kg}_v/\text{s}]$$

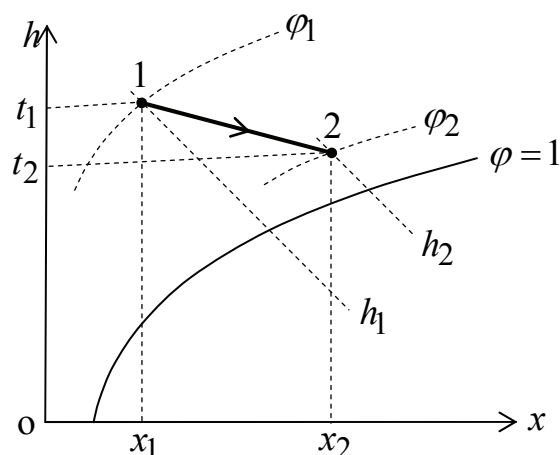
$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_a h_2 \quad [\text{W}]$$

$$\dot{m}_a (h_2 - h_1) = \dot{m}_w h_w$$

Rezultă că:

$$x_2 = x_1 + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$$

$$h_2 = h_1 + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} h_w \quad [\text{J/kg}_a]$$



**Fig. 9.11:** Reprezentarea umidificării în diagrama  $h$ - $x$

În funcție de temperatura apei pulverizate sau a aburului injectat, procesul de umidificare poate fi cu încălzire sau răcire (cu creșterea sau scăderea temperaturii aerului umed), izoterm sau adiabatic.

Se definește **raza procesului** ca fiind direcția după care se desfășoară procesele cu aer umed în diagrama  $h$ - $x$  și se calculează ca raportul între fluxul de caldură și debitul de umiditate schimbate de aerul umed în cadrul procesului:

$$\xi = \frac{\dot{Q}}{\Delta \dot{m}_v} = \frac{\dot{m}_a (h_2 - h_1)}{\dot{m}_a (x_2 - x_1)} = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad [\text{J/kg}_v]$$

Raza procesului este utilă în analiza pe cale grafică (cu ajutorul diagramei  $h$ - $x$ ) a proceselor cu aer umed.