

Nekoliko riješenih zadataka iz područja Vlažnog zraka

Kako je već najavljeno, studenti koji slušaju predmet Osnove termodinamike A, na pismenom dijelu ispita rješavat će i zadatak iz područja Vlažnog zraka, umjesto zadatka iz područja Izgaranja. To znači da će se na pismenom dijelu ispita alternirati zadaci iz navedena dva područja.

U tu svrhu daju se primjeri rješenja nekoliko zadataka iz područja Vlažnog zraka. Tijekom rješavanja zadataka koristila se literatura [1] i [2]

Zadaci i rješenja

1. Zadatak

U prostoriji dimenzija $5 \times 5 \times 3$ m nalazi se vlažni zrak ukupnog tlaka 760 mmHg, temperature 35°C i relativne vlažnosti 40 %. Potrebno je odrediti:

- sadržaj vlage i specifičnu entalpiju tog zraka;
- temperaturu rosišta tog zraka;
- specifični volumen zraka
- masu suhog zraka i masu vodene pare (vlage) u toj prostoriji.

Rješenje

a) – Sadržaj vlage i specifičnu entalpiju ovog zraka određuje se prema sljedećim jednadžbama

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1)}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1)} = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(35^\circ\text{C})}{p - \varphi_1 p_s(35^\circ\text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,40 \cdot 0,05622}{1,0133 - 0,40 \cdot 0,05622}$$

$$x_1 = \mathbf{0,01412 \text{ kg/kg}}$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 35 + 0,01412 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 35) = \mathbf{71,43 \text{ kJ/kg}}$$

$$\frac{(h_{1+x})_{sH} - (h_{1+x})_1}{x_{sH} - x_1} = c_v \vartheta_{sH} \quad (1)$$

b) – Temperaturu rosišta zraka dobije se iz uvjeta $x_1 = x_R$, koristeći sljedeću jednadžbu

$$x_R = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_R)}{p - p_s(\vartheta_R)} \rightarrow$$
$$p_s(\vartheta_R) = \frac{x_R p}{0,622 + x_R} = \frac{0,01412 \cdot 1,0133}{0,622 + 0,01412} = 0,02249 \text{ bar}$$

Koristeći toplinske tablice [2], linearnom interpolacijom se dobiva iznos temperature rosišta

$$\vartheta_R = 19 + \frac{20 - 19}{0,02337 - 0,02196} \cdot (0,02249 - 0,02196) = \mathbf{19,38^\circ\text{C}}$$

c) – volumen zraka, sveden na kilogram suhog zraka, računa se prema jednadžbi

$$(v_{1+x})_1 = 461,5 \frac{T_1}{p} (0,622 + x_1) = 461,5 \cdot \frac{308,15}{1,0133 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,01412) = \underline{\underline{0,893 \text{ m}^3/\text{kg}}}$$

d) – Masu suhog zraka odnosno masu vlage određuje se prema sljedećim jednadžbama:

$$m_z = \frac{p_z V}{R_z T} = \frac{(p - \varphi_1 p_s(35^\circ \text{C}))}{R_z T_1} = \frac{(1,0133 - 0,40 \cdot 0,05622) \cdot 10^5 \cdot 75}{287 \cdot 308,15} = \underline{\underline{84,026 \text{ kg}}}$$

$$m_d = x_1 m_z = 0,01412 \cdot 84,026 = \underline{\underline{1,186 \text{ kg}}}$$

Masu vode, koja je u ovom slučaju u obliku pregrijane vodene pare, može se također izračunati koristeći sljedeću jednadžbu

$$m_z = \frac{p_d V}{R_d T} = \frac{\varphi_1 p_s(35^\circ \text{C})}{R_z T_1} = \frac{0,4 \cdot 0,05622 \cdot 10^5 \cdot 75}{461,5 \cdot 308,15} = \underline{\underline{1,186 \text{ kg}}}$$

a što je identično gore dobivenom rezultatu!

2. Zadatak

U dobro izoliranoj cijevi je smješten ventilator snage 1,3 kW. Ventilator usisava vlažni zrak nekog ulaznog stanja, tako da je na izlazu iz cijevi (iza ventilatora) izmjeren volumenski protok zraka 0,5 m³/s, pri temperaturi 22 °C i relativnoj vlažnosti 60%. Potrebno je odrediti:

a) – temperaturu i relativnu vlažnost zraka na ulazu u cijev (ispred ventilatora);

b) – volumenski protok zraka na ulazu u cijev.

Uzeti da je ukupni tlak zraka prije i nakon ventilatora 1 bar. Stanja zraka na ulazu u ventilator i na izlazu iz ventilatora prikazati u h_{1+x}, x - dijagramu!

Rješenje

a) Primjenjujući I. zakon termodinamike za ova otvoreni sustav, kroz čije granice kontrolnog volumena struji zrak, odnosno zadana snaga ventilatora, može se napisati sljedeću jednadžbu:

$$-|P_{12}| = q_m ((h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1) \quad (1)$$

Maseni protok suhog zraka je konstantan i određuje se iz zadanih podataka zraka na izlazu iz cijevi

$$q_m = \frac{q_{V2}}{(v_{1+x})_2} = \frac{p q_{V2}}{461,5 \cdot T_2 (x_2 + 0,622)} \quad (2)$$

Sadržaj vlage x_2 se računa prema jednadžbi

$$x_2 = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(\vartheta_2)}{p - \varphi_2 p_s(\vartheta_2)} = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(22^\circ \text{C})}{p - \varphi_2 p_s(22^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,60 \cdot 0,02642}{1 - 0,60 \cdot 0,02642}$$

$$x_2 = 0,0100 \text{ kg/kg}$$

Vraćanjem ove vrijednosti u jed. (2) slijedi

$$q_m = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{461,5 \cdot 295,15 \cdot (0,0100 + 0,622)} = 0,5808 \text{ kg/s}$$

Iz zadanih podatak je moguće odrediti specifičnu entalpiju $(h_{1+x})_2$

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) = 1,005 \cdot 22 + 0,0100 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 22) = 47,53 \text{ kJ/kg}$$

Iz jed.(1), zajedno s izračunatim i zadanim vrijednostima, odredi se specifičnu entalpiju $(h_{1+x})_1$

$$(h_{1+x})_1 = (h_{1+x})_2 - \frac{|P_{12}|}{q_m} = 47,53 - \frac{1,3}{0,5808} = 45,292 \text{ kJ/kg}$$

Koristeći izraz za specifičnu entalpiju za stanje 1, $(h_{1+x})_1$

$$(h_{1+x})_1 = 1,005 \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1)$$

i uvjet da je $x_1 = x_2$, moguće je odrediti temperaturu vlažnog zraka ispred ventilatora

$$\vartheta_1 = \frac{(h_{1+x})_1 - r_0 x_1}{c_{pz} + x_1 c_{pd}} = \frac{45,292 - 0,01 \cdot 2500}{1,005 + 1,93 \cdot 0,01} = \mathbf{19,81^\circ \text{C}}$$

pa se i relativnu vlažnost zraka ispred ventilatora određuje prema jednadžbi

$$\varphi_1 = \frac{x_1 p}{(0,622 + x_1) p_s(\vartheta_1)} \quad (3)$$

Tlak zasićenja $p_s(\vartheta_1=19,81^\circ \text{C})$ određuje se linearnom interpolacijom i podacima iz [2]

$$p_s(19,81^\circ \text{C}) = p_s(19^\circ \text{C}) + \frac{p_s(20^\circ \text{C}) - p_s(19^\circ \text{C})}{20 - 19} \cdot 0,81$$

$$p_s(19,81^\circ \text{C}) = 0,02196 + \frac{0,02337 - 0,02196}{20 - 19} \cdot 0,81 = 0,0231 \text{ bar}$$

Vraćanjem ove vrijednosti u jed.(3) dobiva se tražena vrijednost relativne vlažnosti

$$\varphi_1 = \frac{0,01 \cdot 1}{(0,622 + 0,01) \cdot 0,0231} = \mathbf{0,6850; (= 68,5\%)}$$

b) Volumenski se protok zraka na ulazu u ventilator (cijev) računa prema jednadžbi

$$q_{V1} = q_m (v_{1+x})_1 = q_m \cdot 461,5 \frac{T_1}{p} (1 + x_1) = 0,5808 \cdot 461,5 \cdot \frac{292,96}{1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,01)$$

$$q_{V1} = \mathbf{0,4963 \text{ m}^3/\text{s}}$$

3. Zadatak

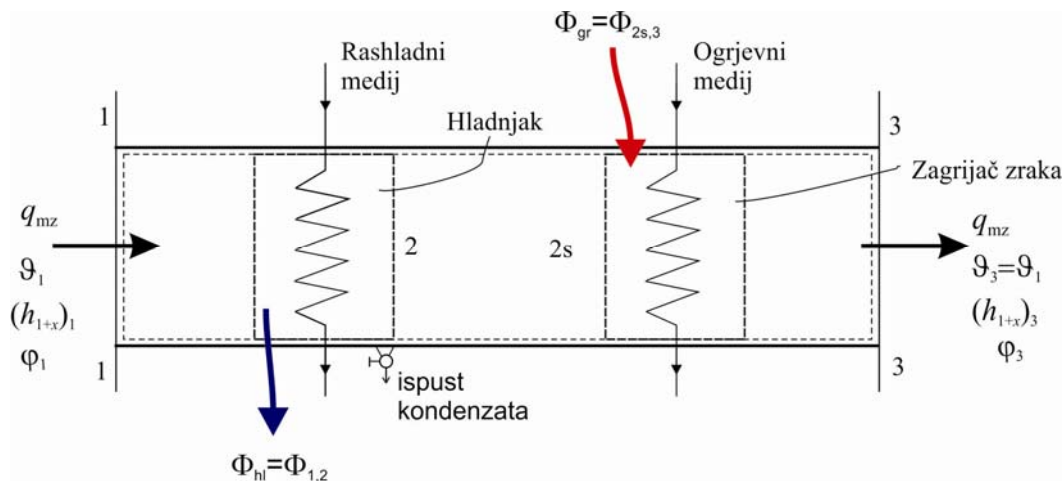
Jedan od načina odstranjivanja vlage iz vlažnog zraka (odvlaživanje) se svodi na ohlađivanje tog zraka u jednom hladnjaku ispod temperature rosišta, naknadnog odstranjivanja nastale kapljevite vlage, te potom zagrijavanja tog zraka u zagrijaču do (obično) početne temperature. Na taj je način potrebno 500 m³/h vlažnog zraka početnog stanja 50 °C i relativne vlažnosti 80 %, dovesti na istu temperaturu i relativnu vlažnost 40%. Potrebno je odrediti:

- temperaturu zraka na izlazu iz hladnjaka;
- rashladni učinak hladnjaka i ogrjevni učinak zagrijača zraka;
- maseni protok kondenzirajuće vlage.

Skica procesa u h_{1+x}, x – dijagramu!

Rješenje

Skicu opisanog procesa prikazuje slika 1.



Slika 1. Skica procesa

a) – Ako se stanjem **3** označi traženo konačno stanje zraka, tada su sljedeće vrijednosti veličina u tom stanju:

$$x_3 = 0,622 \frac{\varphi_3 p_s(\vartheta_3 = 50^\circ \text{C})}{p - \varphi_3 p_s(\vartheta_3 = 50^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,40 \cdot 0,12335}{1 - 0,40 \cdot 0,12335} = 0,0323 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_3 = c_{pz} \vartheta_3 + x_3 (r_0 + c_{pd} \vartheta_3) = 1,005 \cdot 50 + 0,0323 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 50) = 134,12 \text{ kJ/kg}$$

Veličine početnog stanja vlažnog zraka imaju sljedeće vrijednosti:

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 50^\circ \text{C})}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 50^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,80 \cdot 0,12335}{1 - 0,80 \cdot 0,12335} = 0,0681 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_3) = 1,005 \cdot 50 + 0,0681 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 50) = 227,07 \text{ kJ/kg}$$

$$(v_{1+x})_1 = 461,5 \frac{T_1}{p} (0,622 + x_1) = 461,5 \cdot \frac{323,15}{1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,0681) = 1,0292 \text{ m}^3/\text{kg}$$

pa maseni protok suhog zraka kroz sustav iznosi

$$q_{mz} = \frac{q_{V1}}{(v_{1+x})_1} = \frac{500}{1,0292} = 485,83 \text{ kg/h}$$

Iz uvjeta da je $x_3 = x_{2s}$, može se napisati sljedeću jednadžbu

$$x_{2s} = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_2)}{p - p_s(\vartheta_2)}$$

iz koje se lako izračuna $p_s(\vartheta_2)$

$$p_s(\vartheta_2) = \frac{x_{2s} p}{0,622 + x_{2s}} = \frac{0,0323 \cdot 1}{0,622 + 0,0323} = 0,049366 \text{ bar}$$

Iz tog se tlaka, koristeći toplinske tablice, linearnom interpolacijom odredi temperaturu ϑ_2

$$\vartheta_2 = 32,5^\circ \text{C}$$

Specifična entalpija u točki 2s je

$$(h_{1+x})_{2s} = c_{pz} \vartheta_{2s} + x_{2s} (r_0 + c_{pd} \vartheta_{2s}) = 1,005 \cdot 32,52 + 0,0323 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 32,52)$$

$$(h_{1+x})_{2s} = 115,46 \text{ kJ/kg}$$

Točka **2** pada u zasićeno područje s vlagom i u obliku kapljevine, pa je specifična entalpija u toj točki jednaka

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_{2s} (r_0 + c_{pd} \vartheta_3) + (x_1 - x_{2s}) c_v \vartheta_2$$

$$(h_{1+x})_2 = 1,005 \cdot 32,52 + 0,0323 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 32,52) + (0,0681 - 0,0323) \cdot 4,187 \cdot 32,52$$

$$(h_{1+x})_2 = 120,33 \text{ kJ/kg}$$

b) Rashladni učinak hladnjaka iznosi

$$\Phi_{hl} = \Phi_{12} = q_{mz} \left((h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1 \right) = \frac{485,83}{3600} \cdot (120,33 - 227,07) = - \underline{\underline{14,40 \text{ kW}}}$$

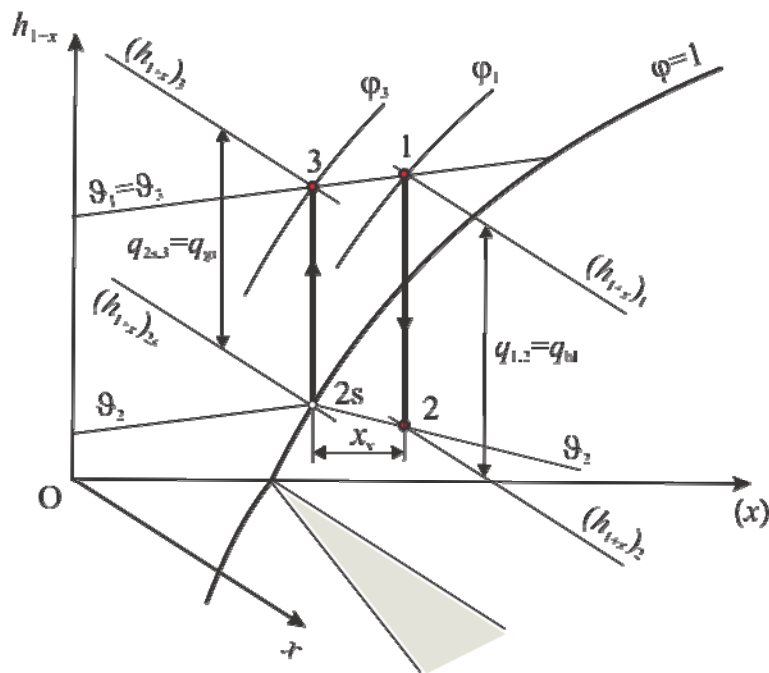
a ogrjevni učinak zagrijača zraka je

$$\Phi_{gr} = \Phi_{2s3} = q_{mz} \left((h_{1+x})_3 - (h_{1+x})_{2s} \right) = \frac{485,83}{3600} \cdot (134,12 - 115,46) = \underline{\underline{2,52 \text{ kW}}}$$

c) Maseni protok kondenzata je jednak

$$q_{mv} = q_{mz} (x_2 - x_{2s}) = 485,83 \cdot (0,0681 - 0,0323) = \underline{\underline{17,39 \text{ kg/h}}}$$

Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu prikazuje donja slika 2.



Slika 2. Prikaz procesa, u h_{1+x}, x – dijagramu

4. Zadatak

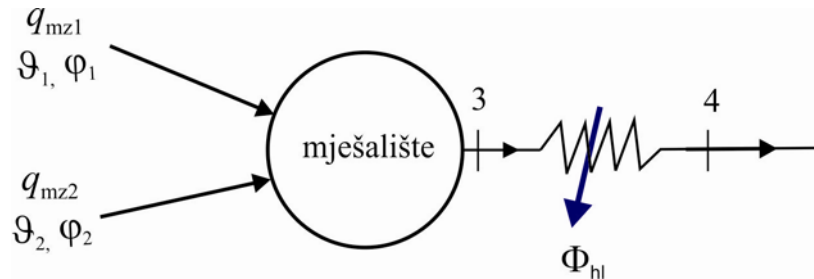
U izolirano mješalište ulazi $500 \text{ m}^3/\text{h}$ vlažnog zraka stanja 1,1 bar, temperature $30 \text{ }^\circ\text{C}$ i relativne vlažnosti 50% i struja vlažnog zraka ukupnog tlaka 1,1 bar, temperature $40 \text{ }^\circ\text{C}$, relativne vlažnosti 60% nepoznatog volumenskog protoka. Nastala mješavina se zatim hladi u hladnjaku, tako da iz hladnjaka izlazi zasićeni vlažni zrak temperature $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i također ukupnog tlaka 1,1 bar. Potrebno je odrediti:

- volumenski protok druge (toplije) struje;
- rashladni učinak hladnjaka.

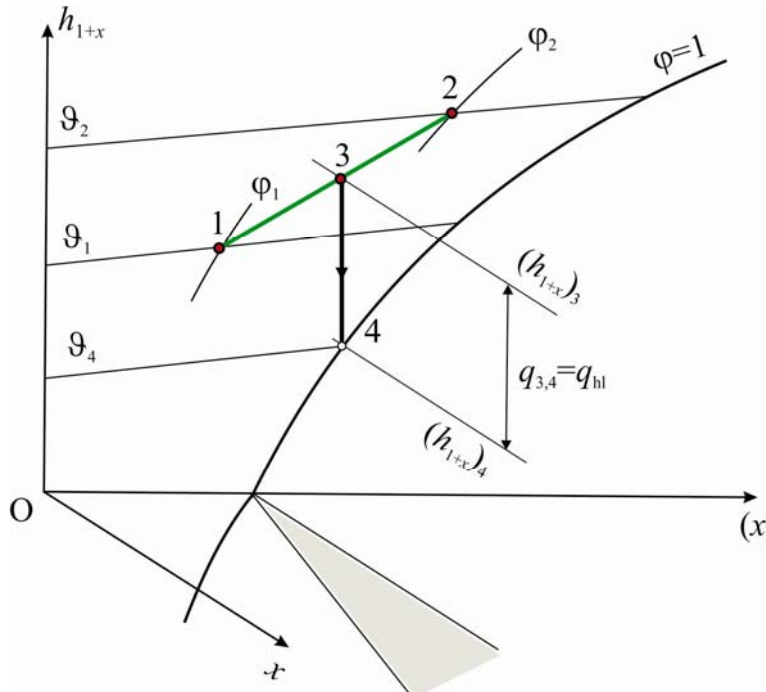
Cjelokupni proces prikazati u h_{1+x}, x – dijagramu!

Rješenje

Slika 3a prikazuje shemu zadanog procesa, a slika 3b prikazuje proces u h_{1+x}, x – dijagramu



Slika 3a. Shema procesa



Slika 3b. Prikaz procesa u h_{1+x}, x - dijagramu

a) – Iz zadanih se podataka mogu odrediti veličine u točki **1**

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 30^\circ \text{C})}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_3 = 30^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,50 \cdot 0,04241}{1,1 - 0,50 \cdot 0,04241} = 0,0122 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 30 + 0,0122 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 30) = 61,36 \text{ kJ/kg}$$

$$(v_{1+x})_1 = 461,5 \frac{T_1}{p} (0,622 + x_1) = 461,5 \cdot \frac{303,15}{1,1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,0122) = 0,807 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$q_{mz1} = \frac{q_{V1}}{(v_{1+x})_1} = \frac{500}{0,807} = 619,88 \text{ kg/h}$$

Nadalje je moguće odrediti stanje u točki 4, koja predstavlja stanje zasićenog vlažnog zraka

$$x_4 = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_4 = 25 \text{ °C})}{p - p_s(\vartheta_4 = 25 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,03166}{1,1 - 0,03166} = 0,0184 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_4 = c_{pz} \vartheta_4 + x_4 (r_0 + c_{pd} \vartheta_4) = 1,005 \cdot 25 + 0,0184 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 25) = 72,01 \text{ kJ/kg}$$

Relevantne veličine u točki 2 (toplija struja) su

$$x_2 = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(\vartheta_2 = 40 \text{ °C})}{p - \varphi_2 p_s(\vartheta_2 = 40 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,60 \cdot 0,07375}{1,1 - 0,60 \cdot 0,07375} = 0,0261 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) = 1,005 \cdot 40 + 0,0261 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 40) = 107,39 \text{ kJ/kg}$$

$$(v_{1+x})_2 = 461,5 \frac{T_2}{p} (0,622 + x_2) = 461,5 \cdot \frac{313,15}{1,1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,0261) = 0,852 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kako je $x_3 = x_4$, iz bilance vlage mješališta, lako se određuje maseni protok toplije struje

$$q_{m2} = q_{m1} \frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_3} = 619,88 \cdot \frac{0,0184 - 0,0122}{0,0261 - 0,0184} = 499,09 \text{ kg/h}$$

pa je traženi volumenski protok druge (toplije) struje jednak

$$q_{V2} = q_{m2} (v_{1+x})_2 = 499,09 \cdot 0,852 = \underline{\underline{425,23 \text{ m}^3/\text{h}}}$$

b) – Specifična entalpija u točki 3 (na izlazu iz mješališta) dobije se iz energijske bilance postavljene za ovo izolirano mješalište

$$(h_{1+x})_3 = \frac{q_{mz1} (h_{1+x})_1 + q_{mz2} (h_{1+x})_2}{q_{mz1} + q_{mz2}} = \frac{619,88 \cdot 61,36 + 499,09 \cdot 107,39}{619,88 + 499,09} = 81,89 \text{ kJ/kg}$$

pa rashladni učinak hladnjaka iznosi

$$\Phi_{hl} = \Phi_{34} = q_{mz} ((h_{1+x})_4 - (h_{1+x})_{31}) = \frac{619,88 + 499,09}{3600} \cdot (72,01 - 81,89) = - \underline{\underline{3,07 \text{ kW}}}$$

5. Zadatak

Stanje vlažnog (okolišnjeg) zraka određuje se psihrometrom na kojem termometri pokazuju temperature 35 °C odnosno 23 °C, dok barometar pokazuje tlak od 760 mm Hg. Potrebno je odrediti.

- sadržaj vlage i relativnu vlažnost tog zraka;
- temperaturu rosišta tog (okolišnjeg) zraka.

Način određivanja stanja zraka na temelju očitanih temperatura, kao i temperaturu rosišta prikazati u h_{1+x}, x - dijagramu!

Rješenje

a) – Višu temperaturu na psihrometru pokazuje suhi a nižu temperaturu vlažni termometar, to znači da je

$$\begin{aligned} \vartheta_s &= \vartheta_1 = 35 \text{ °C}; \\ \vartheta_{vl} &= \vartheta_{sH} = 23 \text{ °C} \rightarrow \text{temperatura granice hlađenja} \end{aligned}$$

Prema [1] može se napisati sljedeću jednadžbu

$$\frac{(h_{1+x})_{sH} - (h_{1+x})_1}{x_{sH} - x_1} = c_v \vartheta_{sH} \quad (1)$$

Iz zadanih podataka moguće je izračunati specifičnu entalpiju i sadržaj pare u točki granice hlađenja sH:

$$x_{sH} = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_{sH} = 23 \text{ °C})}{p - p_s(\vartheta_{sH} = 23 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,02808}{1,0133 - 0,02808} = 0,0177 \text{ kg/kg (a)}$$

$$(h_{1+x})_{sH} = c_{pz} \vartheta_{sH} + x_{sH} (r_0 + c_{pd} \vartheta_{sH}) = 1,005 \cdot 23 + 0,0177 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 23) = 68,22 \text{ kJ/kg (b)}$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 35 + x_1 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 35) = 35,175 + 2567,55x_1 \quad (c)$$

Uvrštavanjem (a), (b) i (c) u jed. (1) dobiva se jednadžbu u kojoj se javlja nepoznanica x_1

$$\frac{68,22 - 35,175 - 2567,55x_1}{0,0177 - x_1} = 4,187 \cdot 23 = 96,30$$

odakle se dobiva sadržaj vlage okolišnjeg zraka

$$x_1 = \frac{33,045 - 1,7045}{2567,55 - 96,30} = \underline{\underline{0,0127 \text{ kg/kg}}}$$

pa tražena relativna vlažnost zraka ima vrijednost

$$\varphi_1 = \frac{x_1 p}{(0,622 + x_1) p_s(\vartheta_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C})} = \frac{0,0127 \cdot 1,0133}{(0,622 + 0,0127) \cdot 0,05622} = \underline{\underline{0,3606; (36,06\%)}}$$

Prema tome stanje zraka je $p = 1,0133 \text{ bar}$; $\vartheta = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi = 36,06 \%$

b) – Temperaturu rosišta ovog zraka dobiva se iz uvjeta

$$x_R = x_1 = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_R)}{p - p_s(\vartheta_R)}$$

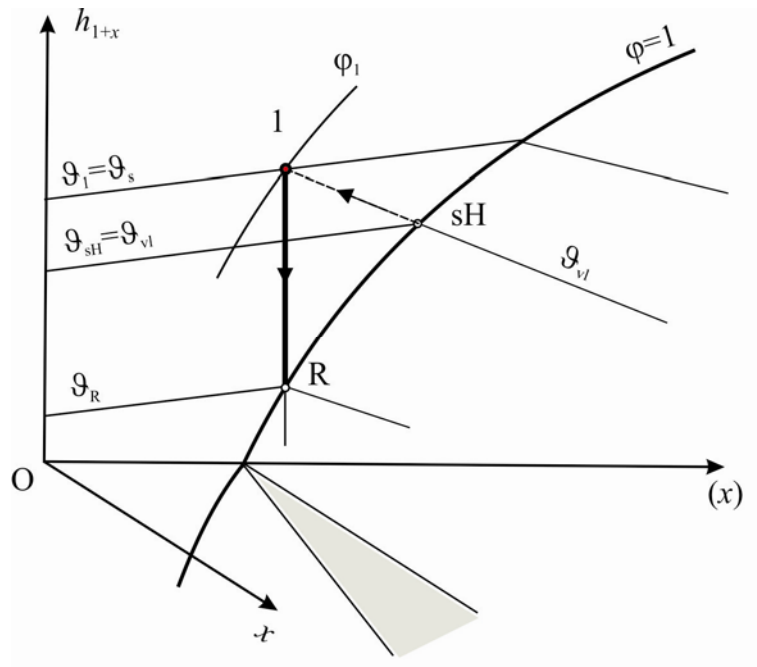
iz kojeg se dobiva tlak zasićenja $p_s(\vartheta_R)$

$$p_s(\vartheta_R) = \frac{x_1 p}{0,622 + x_1} = \frac{0,0127 \cdot 1,0133}{0,622 + 0,0127} = 0,0203 \text{ bar}$$

Koristeći toplinske tablice [2] linearnom interpolacijom se dobiva traženu temperaturu u točki rosišta

$$\vartheta_R = 17,362 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{18 - 17}{0,02062 - 0,019362} \cdot (0,0203 - 0,019362) = \underline{\underline{18,10 \text{ }^\circ\text{C}}}$$

Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu je na slici 4.



Slika 4. Prikaz rješenja u h_{1+x}, x – dijagramu

6. Zadatak

Vlažni zrak temperature 20 °C, ukupnog tlaka 1,02 bar ima temperaturu rosišta 12 °C. Potrebno je odrediti:

- relativni i apsolutnu vlažnost, te sadržaj vlage tog zraka;
- ukupni tlak na kojeg se izotermno mora komprimirati taj zrak, da bi on postao zasićen s pojavom vlage samo u obliku suhozasićene pare!

Rješenje

a) – Iz uvjeta da je $x_1 = x_R$ može se napisati sljedeći oblik jednadžbe

$$0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1)}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1)} = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_R)}{p - p_s(\vartheta_R)}$$

iz kojeg se izravno dobiva

$$\varphi_1 = \frac{p_s(\vartheta_R)}{p_s(\vartheta_1)} = \frac{p_s(\vartheta_R = 12 \text{ °C})}{p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})} = \frac{0,014014}{0,02337} = \underline{\underline{0,5997; (59,97\%)}}$$

Apsolutnu vlažnost se računa prema jednadžbi

$$\rho_d = \frac{p_d}{R_w T_1} = \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C}) M_w}{R_m T_1} = \frac{0,5997 \cdot 0,02337 \cdot 18}{8314 \cdot 293,15} = \underline{\underline{0,0103 \text{ kg/m}^3}}$$

Sadržaj vlage ovog zraka je

$$x_3 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,5997 \cdot 0,02337}{1,02 - 0,5997 \cdot 0,02337} = \underline{\underline{0,0087 \text{ kg/kg}}}$$

b) – Ukupni tlak vlažnog zraka nakon izotermne kompresije dobiva se iz uvjeta da je $x_s(p_2, \vartheta_1) = x_1$, odnosno iz jednadžbe

$$0,622 \frac{p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})}{p_2 - p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})} = x_1$$
$$p_2 = \frac{p_s(\vartheta_1 = 20 \text{ °C})(0,622 + x_1)}{x_1} = \frac{0,02337 \cdot (0,622 + 0,0087)}{0,0087} = \underline{\underline{1,694 \text{ bar}}}$$

7. Zadatak

U adijabatsko mješalište ulazi struja vlažnog zraka temperature $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ i sadržaja vlage $3,6\text{ g/kg}$ i struja zraka temperature $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativne vlažnosti 60% . Te se dvije struje miješaju u masenim omjerima $1:1$. Nastalu se mješavinu zagrijava u zagrijaču zraka ogrjevnog učinka 5 kW na 30°C , nakon čega se taj zrak ovlažuje zasićenom parom tlaka $1,2\text{ bara}$ koju se prethodno prigušuje na $1,05\text{ bar}$, sve dok zrak ne postane zasićen s vlagom samo u obliku suhozasićene pare temperature $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ukupni tlak vlažnog zraka u opisanom procesu iznosi $1,05\text{ bar}$. Potrebno je odrediti:

a) volumenske protoke struja na ulazu u mješalište, kao i volumenski protok struje nakon ovlaživanja vodom;

b) – sadržaj pare i maseni protok ubrizgavajuće vodene pare;

Skica cjelokupnog procesa u h_{1+x},x – dijagramu!

Rješenje

a) – Prvo se odrede veličine stanja vlažnog zraka prije miješanja

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 4 + 0,0036 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 4) = 13,048\text{ kJ/kg}$$

$$(v_{1+x})_1 = 461,5 \frac{T_1}{p} (0,622 + x_1) = 461,5 \cdot \frac{277,15}{1,05 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,0036) = 0,762\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_2 = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(\vartheta_2 = 20^{\circ}\text{C})}{p - \varphi_2 p_s(\vartheta_2 = 20^{\circ}\text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,6 \cdot 0,02337}{1,05 - 0,6 \cdot 0,02337} = 0,0084\text{ kg/kg}$$

$$(v_{1+x})_2 = 461,5 \frac{T_2}{p} (0,622 + x_2) = 461,5 \cdot \frac{293,15}{1,05 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,0052) = 0,808\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) = 1,005 \cdot 20 + 0,0084 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 20) = 41,47\text{ kJ/kg}$$

Budući je maseni omjer miješanja struja $1:1$, specifična entalpija odnosno sadržaj vlage mješavine su jednako aritmetičkoj sredini odnosnih veličina ulaznih struja

$$(h_{1+x})_m = \frac{(h_{1+x})_1 + (h_{1+x})_2}{2} = \frac{13,048 + 41,47}{2} = 27,26\text{ kJ/kg}$$

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{0,0036 + 0,0084}{2} = 0,0060\text{ kg/kg}$$

Temperaturu nastale mješavine dobije se iz jednadžbe za specifičnu entalpiju mješavine

$$(h_{1+x})_m = c_{pz} \vartheta_m + x_m (r_0 + c_{pd} \vartheta_m) \rightarrow \vartheta_m = \frac{(h_{1+x})_1 - x_m r_0}{x_m c_{pd} + c_{pd}} = \frac{27,26 - 0,0060 \cdot 2500}{0,0060 \cdot 1,93 + 1,005} = 12,06\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Specifična entalpija zraka nakon zagrijavanja, uz $x_4 = x_m$

$$(h_{1+x})_4 = c_{pz} g_4 + x_4 (r_0 + c_{pd} g_4) = 1,005 \cdot 30 + 0,0060 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 30) = 45,49 \text{ kJ/kg}$$

Ukupni maseni protok dobiva se iz zadanog ogrjevnog učinka zagrijača zraka

$$q_m = \frac{\Phi_{gr}}{(h_{1+x})_4 - (h_{1+x})_m} = \frac{5 \cdot 3600}{45,49 - 27,26} = 987,83 \text{ kg/h}$$

Kako je zadan maseni omjer miješanja struja 1:1, to znači da obje struje imaju jednake masene protoke koje odgovaraju polovici gornje vrijednosti

$$q_{m1} = q_{m2} = \frac{q_m}{2} = \frac{987,38}{2} = 493,69 \text{ kg/h}$$

pa traženi volumenski protoci struja na ulazu u mješalište iznose

$$q_{V1} = q_{m1} (v_{1+x})_1 = 493,62 \cdot 0,762 = \mathbf{376,19 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$q_{V2} = q_{m2} (v_{1+x})_2 = 493,62 \cdot 0,808 = \mathbf{398,85 \text{ m}^3/\text{h}}$$

b) Specifičnu entalpiju ubrizgavajuće vodene dobiva se iz jednadžbe

$$h_D = \frac{(h_{1+x})_5 - (h_{1+x})_4}{x_5 - x_4} \quad (1)$$

$$x_5 = 0,622 \frac{p_s (g_5 = 20 \text{ }^\circ\text{C})}{p - p_s (g_5 = 20 \text{ }^\circ\text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,02337}{1,05 - 0,02337} = 0,0142 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_5 = c_{pz} g_5 + x_5 (r_0 + c_{pd} g_5) = 1,005 \cdot 20 + 0,0142 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 20) = 56,15 \text{ kJ/kg}$$

Vraćanjem ovih i prethodno izračunatih vrijednosti u jed.(1) dobiva se vrijednost tražene temperature ubrizgavajuće vode

$$h_D = \frac{(h_{1+x})_5 - (h_{1+x})_4}{x_5 - x_4} = \frac{56,15 - 45,49}{0,0142 - 0,0060} = 1300 \text{ kJ/kg}$$

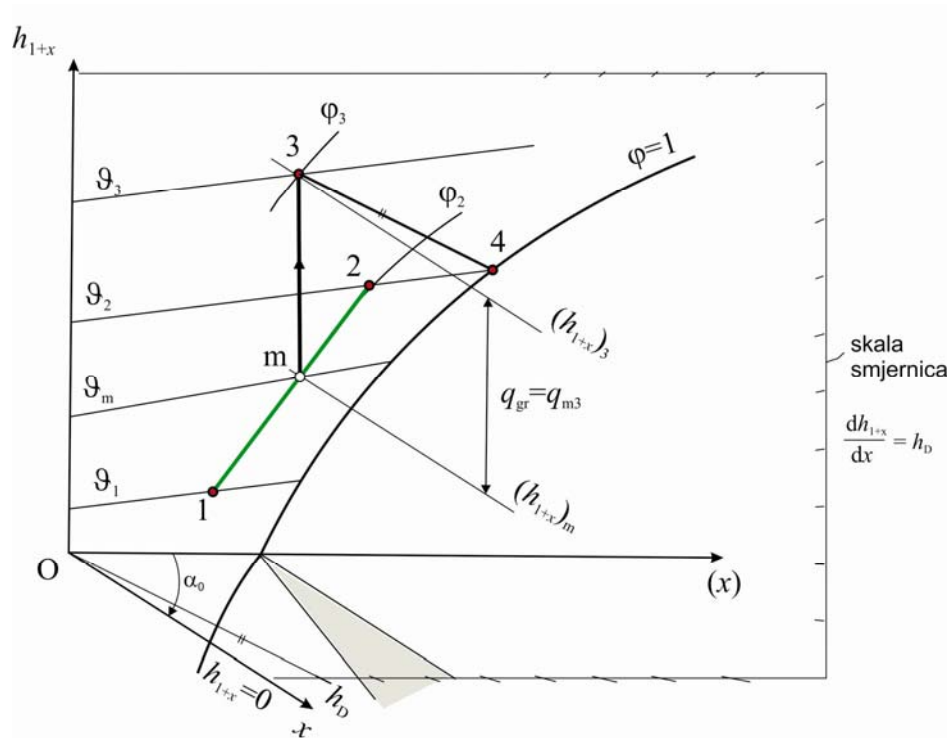
pa je sadržaj pare prije prigušivanja jednak

$$x_D = \frac{h_D - h'(p = 1,2 \text{ bar})}{r(1,2 \text{ bar})} = \frac{1300 - 439,299}{2243,76} = \mathbf{0,3836 \text{ kg/kg}}$$

Maseni protok ubrizgavajuće vodene pare iznosi

$$q_{mD} = q_m (x_5 - x_4) = 987,38 \cdot (0,0142 - 0,0060) = \mathbf{8,097 \text{ kg/h}}$$

Skicu cjelokupnog procesa u h_{1+x}, x – dijagramu prikazuje slika 5.



Slika 5. Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu

8. Zadatak

U struju vlažnog zraka ukupnog tlaka 1,0133 bar, temperature 40 °C, relativne vlažnosti 20% i volumenskog protoka 250 m³/h adijabatski se ubrizgava struju kapljevite vode temperature 20 °C koja ishlapljuje u taj zrak, hladeći i ovlažujući ga pri tome. Temperatura zraka nakon ubrizgavanja vode je 25 °C, dok je ukupni tlak također 1,0133 bar. Potrebno je odrediti:

- relativnu vlažnost zraka nakon ubrizgavanja i maseni protok ubrizgavajuće vode;
- koristeći h_{1+x}, x dijagram očitati minimalnu temperaturu na koju se može ohladiti taj zrak s tom ubrizgavajućom vodom. Tako očitane minimalnu temperaturu prekontrolirati i analitičkim putem! Koliki bi trebao iznositi maseni protok vode u tom slučaju?

Proces skicirati u h_{1+x}, x – dijagramu!

Rješenje

- Prvo se treba odrediti sadržaj pare, specifičnu entalpiju zraka početnog stanja kao i maseni protok suhog zraka

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 40^\circ \text{C})}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 40^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,20 \cdot 0,07375}{1,0133 - 0,20 \cdot 0,07375} = 0,009228 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 40 + 0,009228 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 40) = 63,98 \text{ kJ/kg}$$

$$(v_{1+x})_1 = 461,5 \frac{T_1}{p} (0,622 + x_1) = 461,5 \cdot \frac{313,15}{1,0133 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,009228) = 0,90027 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$q_{mz} = \frac{q_{V1}}{(v_{1+x})_1} = \frac{250}{0,90027} = 277,69 \text{ kg/h}$$

Stanje zraka nakon ubrizgavanja određuje se iz sljedeće jednačbe

$$\frac{(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1}{x_2 - x_1} = c_v \vartheta_v \quad (1)$$

iz koje slijedi

$$(h_{1+x})_2 - x_2 c_v \vartheta_v = (h_{1+x})_1 - x_1 c_v \vartheta_v$$

$$c_{pz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) - x_2 c_v \vartheta_v = (h_{1+x})_1 - x_1 c_v \vartheta_v$$

$$x_2 = \frac{(h_{1+x})_1 - x_1 c_v \vartheta_v - c_{pz} \vartheta_2}{r_0 + c_{pd} \vartheta_2 - c_v \vartheta_v} = \frac{63,91 - 0,0092 \cdot 4,187 \cdot 20 - 1,005 \cdot 25}{2500 + 1,93 \cdot 25 - 4,187 \cdot 20} = 0,01542 \text{ kg/kg}$$

pa relativna vlažnost zraka u stanju 2 iznosi

$$\varphi_2 = \frac{x_2 p}{(0,622 + x_2) p_s(\vartheta_2 = 25 \text{ °C})} = \frac{0,01542 \cdot 1,0133}{(0,622 + 0,01542) \cdot 0,03166} = \mathbf{0,7743; (77,43\%)}$$

Maseni protok ubrizgavajuće vode je

$$q_{mv} = q_{mz} (x_2 - x_1) = 277,69 \cdot (0,01542 - 0,009228) = \mathbf{1,719 \text{ kg/h}}$$

b) – Minimalnu temperaturu na koju se može ohladiti struju zraka stanja 1, shodno jed.(1), dobije se na način, da se na skalu smjernicu nanese vrijednost specifične entalpije ubrizgavajuće vode $h_v = c_v \vartheta_v = 4,187 \cdot 20 = 83,86 \text{ kJ/kg}$, i zatim se tu točku spoji s ishodištem h_{1+x}, x – dijagrama, pa se iz točke početnog stanja zrak 1 povuče paralelu s prethodnom spojnicom do presjecišta s linijom zasićenja $\varphi = 1$, i očita u točki tog presjecišta vrijednost minimalne temperature na koju se može ohladiti zadanu struju zraka.

$$\vartheta_{2\min} = \mathbf{22,01 \text{ °C}}$$

Prekontrolirajmo ovi temperaturu računski shodno jed.(1)

$$\frac{(h_{1+x})_3 - (h_{1+x})_1}{x_3 - x_1} = c_v \vartheta_v \quad (2)$$

$$x_3 = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_{2s} = 22,01^\circ \text{C})}{p - p_s(\vartheta_{2s} = 22,01^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,02654}{1,0133 - 0,02654} = 0,01673 \text{ kg/kg}$$

$$(h_{1+x})_{2s} = c_{pz} \vartheta_{2\min} + x_3 (r_0 + c_{pd} \vartheta_{2\min}) = 1,005 \cdot 22,01 + 0,016732 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 22,01) = 64,6588 \text{ kJ/kg}$$

Vraćanjem ovih i prethodnih vrijednosti u jed.(2), provodi se kontrolu iste

$$\frac{64,6588 - 63,91}{0,01673 - 0,009228} = 4,187 \cdot 20,01$$

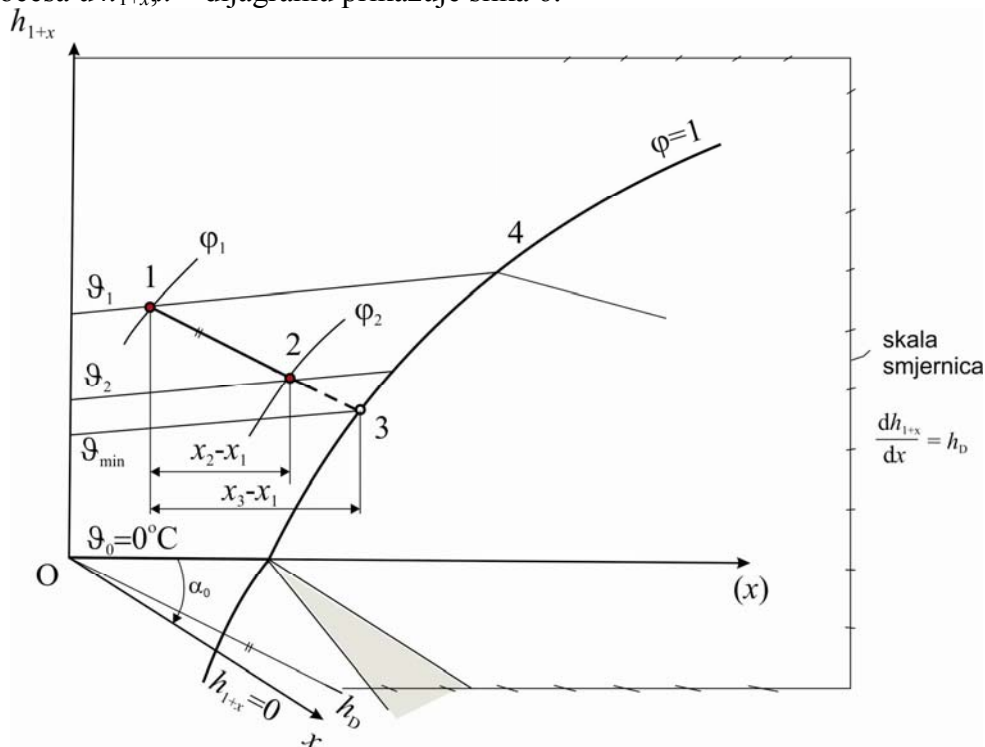
$$90,13 \approx 92,16$$

što potvrđuje činjenicu da je minimalna temperatura dobro očitana u h_{1+x}, x – dijagramu!

Jasno je da se za taj slučaj mora ubrizgavati više vode, pa se maseni protok vode u ovom slučaju, računa prema jednadžbi

$$q_{mb} = q_{mz} (x_3 - x_1) = 277,69 \cdot (0,01673 - 0,009228) = \underline{\underline{2,083 \text{ kg/h}}}$$

Skicu procesa u h_{1+x}, x – dijagramu prikazuje slika 6.



Slika 6. Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu

9. Zadatak

Struju vlažnog zraka temperature 50 °C, stupnja zasićenja 40 % i ukupnog tlaka 1,2 bara adijabatski se prigušuje na tlak 1 bar. Potrebno je odrediti:

- relativnu vlažnost zraka nakon prigušivanja;
- omjer promjera cijevi prije i nakon prigušilišta, da bi brzine strujanja zraka prije i nakon prigušilišta bile međusobno jednake!

Rješenje

a) - Za adijabatsko prigušivanje vrijedi zakonitost

$$(h_{1+x})_1 = (h_{1+x})_2 \quad (1)$$

kao i zakonitost da je

$$x_1 = x_2 \quad (2)$$

Ako se raspiše jed.(1), dobiva se sljedeću jednakost

$$c_{pz} g_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} g_1) = c_{pz} g_2 + x_1 (r_0 + c_{pd} g_2)$$

iz koje proizlazi činjenica da je

$$g_1 = g_2 \quad (3)$$

(To je i razumljivo, budući su stanja zraka prije i nakon prigušivanja u nezasićenom području u kojem se i vlaga (vodena para) i suhi zrak ponašaju kao idealni plinovi!)

Nakon prigušivanja vlažnom zraku se promijenila relativna vlažnost, koju se računa prema jednadžbi

$$\varphi_2 = \frac{x_2 p_2}{(0,622 + x_2) \cdot p_s (g_2 = 50 \text{ °C})} \quad (4)$$

Odredimo relativnu vlažnost, odnosno sadržaj vlage prije prigušivanja

$$\varphi_1 = x_1 \frac{p_1}{p_1 - (1 - x_1) p_s (g_1 = 50 \text{ °C})} = 0,40 \cdot \frac{1,2}{1,2 - (1 - 0,40) \cdot 0,12335} = 0,4263$$

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s (g_1 = 50 \text{ °C})}{p - \varphi_1 p_s (g_1 = 50 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,4263 \cdot 0,12335}{1,2 - 0,4263 \cdot 0,12335} = 0,0285 \text{ kg/kg}$$

Vraćanjem ove izračunate vrijednosti kao i ostalih zadanih u jed.(4) dobiva se iznos relativne vlažnosti zraka nakon prigušivanja

$$\varphi_2 = \frac{x_2 p_2}{(0,622 + x_2) \cdot p_s(\vartheta_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C})} = \frac{0,0285 \cdot 1}{(0,622 + 0,0285) \cdot 0,12335} = \mathbf{0,3552; (35,52\%)}$$

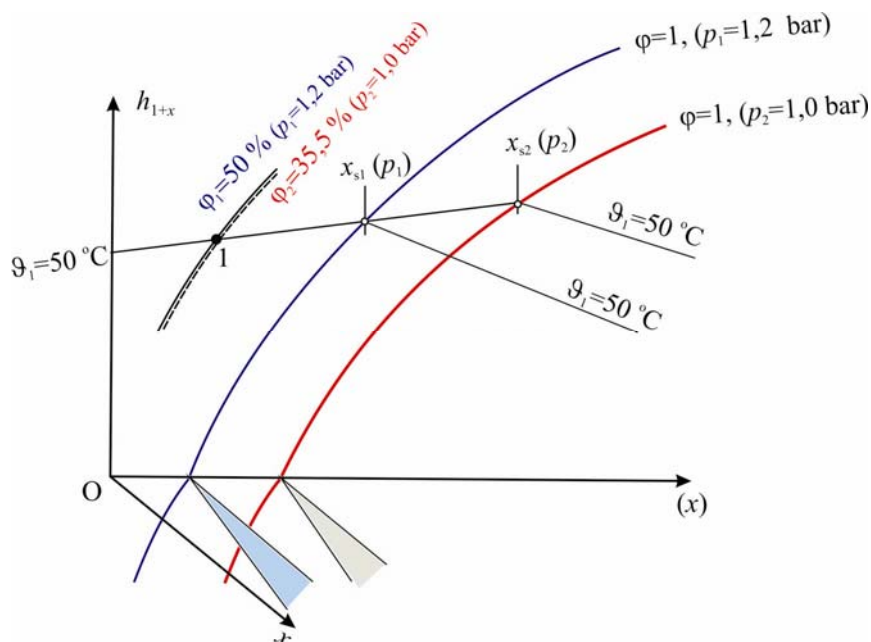
Očito se relativna vlažnost zraka nakon prigušivanja smanjuje, a što je u skladu s činjenicom da se linija zasićenja $\varphi = 1,0$ sa smanjenjem ukupnog tlaka pomiče u desno!

b) – Traženi omjer promjera dobije se iz zakona o održanju mase, kojeg se može napisati u obliku

$$\frac{d_1^2 \pi w}{4 \cdot (v_{1+x})_1} = \frac{d_2^2 \pi w}{4 \cdot (v_{1+x})_2} \rightarrow \frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{(v_{1+x})_1}{(v_{1+x})_2}} = \sqrt{\frac{461,5 \frac{T_1}{p_1} (0,622 + x_2)}{461,5 \frac{T_1}{p_2} (0,622 + x_1)}} = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt{\frac{1}{1,2}}$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \mathbf{0,913}$$

Prikaz promatranog procesa u h_{1+x}, x – dijagramu daje se na slici 7.



Slika 7. Prikaz procesa prigušivanja u h_{1+x}, x - dijagramu

10. Zadatak

U struju vlažnog zraka temperature 10 °C i sadržaja vlage 3 g/kg adijabatski ubrizgavamo vodenu paru tako da se nakon adijabatskog ubrizgavanja postiže temperaturu zraka 25 °C i sadržaj vlage 22 g/kg. Ukupni tlak vlažnog zraka je 1 bar što je ujedno i tlak ubrizgavajuće vodene pare. Ako ukupni maseni protok suhog zraka u procesu iznosi 220 kg/h potrebno je:

- provjeriti da li stanje zraka nakon ubrizgavanja pare pada u zasićeno područje;
- ako je odgovor pod a) potvrđan, odrediti maseni protok vlage koja kondenzira;
- odrediti stanje vodene pare koju se ubrizgava kao i njezin maseni protok u promatranom slučaju.

Proces prikazati u h_{1+x}, x – dijagramu!

Rješenje

- a) – Da bi se odgovorilo na pitanje pod a) treba odrediti sadržaj vlage x_{2s}

$$x_{2s} = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_2 = 25 \text{ °C})}{p - p_s(\vartheta_2 = 25 \text{ °C})} = 0,622 \cdot \frac{0,03166}{1 - 0,03166} = 0,02034 \text{ kg/kg} = 20,34 \text{ g/kg}$$

Kako je zadani $x_2 = 22 \text{ g/kg} > x_{2s} = 20,34 \text{ g/kg}$, to znači da stanje zraka nakon ubrizgavanja vodene pare spada u *zasićeno područje*, pa će se dio ubrizgavane vodene pare nužno kondenzirati.

- b) – Maseni protok nastalog kondenzata računa se prema jednadžbi

$$q_{mv} = q_{mz}(x_2 - x_{2s}) = 220 \cdot (0,022 - 0,02034) = \underline{\underline{0,365 \text{ kg/h}}}$$

- c) – Specifičnu entalpiju ubrizgavajuće vodene pare određuje se iz jednadžbe

$$h_D = \frac{(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 10 + 0,003 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 10) = 17,608 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_{2s} (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) + (x_2 - x_{2s}) c_v \vartheta_2$$

$$(h_{1+x})_2 = 1,005 \cdot 25 + 0,02034 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 25) + (0,022 - 0,02034) \cdot 4,187 \cdot 25 = 77,13 \text{ kJ/kg}$$

Uvrštavanjem ovih i zadanih vrijednosti u jed.(1) dobiva se traženi iznos ubrizgavajuće vodene pare

$$h_D = \frac{(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1}{x_2 - x_1} = \frac{77,13 - 17,608}{0,022 - 0,003} = 3132,7 \text{ kJ/kg}$$

Kako je $h_D = 3132,7 \text{ kJ/kg} > h''(p = 1 \text{ bar}) = 2257,51 \text{ kJ/kg}$ znači da se radi o pregrijanoj vodenoj pari čiju se temperaturu odredi koristeći toplinske tablice i linearnu interpolaciju

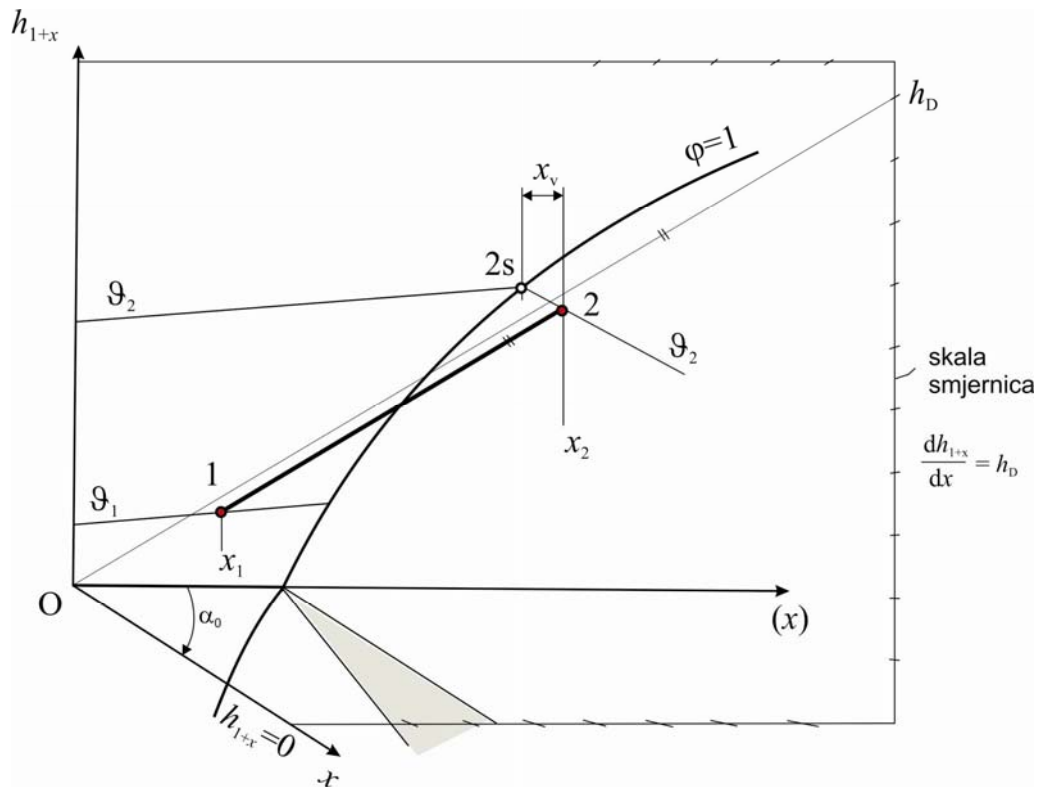
$$\vartheta_D = 320 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{340 - 320}{3155,45 - 3114,89} \cdot (3132,7 - 3114,89) = 320,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

pa je stanje ubrizgavajuće vodene pare: $p = \underline{1 \text{ bar}}$; $\vartheta_D = \underline{320,8 \text{ }^\circ\text{C}}$

Maseni protok ubrizgavajuće vodene pare iznosi

$$q_{mD} = q_{mz} (x_2 - x_1) = 220 \cdot (0,022 - 0,003) = \underline{4,18 \text{ kg/h}}$$

Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu prikazuje slika 8.



Slika 8. Prikaz procesa u h_{1+x}, x – dijagramu

11. Zadatak

Vlažni zrak stupnja zasićenja 1,6 temperature $0 \text{ }^\circ\text{C}$ u kojem se višak vlage javlja na način da je maseni omjer vlažne i ledene magle 1:1, treba razmagliti zagrijavanjem do temperature rosišta tog zraka. Ako je ukupni tlak tog vlažnog zraka 1,1 bar, potrebno je odrediti:

- temperaturu rosišta tog zraka;
- potrebni specifični toplinski tok kojeg treba dovoditi za razmagljivanje tog zraka.

Proces skicirati u h_{1+x}, x – dijagramu.

Rješenje

a) – Temperaturu rosišta se dobije iz uvjeta da je $x_1 = x_R$, pa slijedi jednačnja

$$x_R = 0,622 \frac{p_s(\vartheta_R)}{p - p_s(\vartheta_R)} \rightarrow p_s(\vartheta_R) = \frac{x_R p}{0,622 + x_R} \quad (1)$$

$$x_1 = x_R = \chi_1 x_{s0} = \chi_1 \cdot 0,622 \frac{p_s(\vartheta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C})}{p - p_s(\vartheta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C})} = 1,6 \cdot 0,622 \cdot \frac{0,006108}{1,1 - 0,006108} = 0,00648 \text{ kg/kg}$$

Uvrštavanjem ove vrijednosti u jed.(1) dobiva se

$$p_s(\vartheta_R) = \frac{x_R p}{0,622 + x_R} = \frac{0,00648 \cdot 1,1}{0,00648 + 0,622} = 0,01134 \text{ bar}$$

Koristeći toplinske tablice i linearnu interpolaciju, dolazi se do vrijednosti temperature rosišta

$$\vartheta_R = 8 \text{ }^\circ\text{C} + \frac{9 - 8}{0,011472 - 0,010720} \cdot (0,01134 - 0,010720) = \underline{\underline{8,83 \text{ }^\circ\text{C}}}$$

b) – Dovođeni specifični toplinski tok na zagrijaču zraka računa se prema jednadžbi

$$q_{1R} = (h_{1+x})_R - (h_{1+x})_1 \quad (2)$$

$$(h_{1+x})_R = c_{pz} \vartheta_R + x_R (r_0 + c_{pd} \vartheta_R) = 1,005 \cdot 8,83 + 0,00648 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 8,83) = 21,18 \text{ kJ/kg}$$

Zrak u stanju 1 sadrži x_{s0} vlage u obliku suhozasićene pare, $0,5 \cdot (x_1 - x_{s0})$ vlage u obliku leda i isto toliko vlage u obliku kapljevine temperature $0 \text{ }^\circ\text{C}$, pa je specifična entalpija tog zraka jednaka

$$(h_{1+x})_1 = x_{s0} r_0 - 0,5 \cdot (x_1 - x_{s0}) q_k \quad (3)$$

$$x_{s0} = \frac{x_1}{\chi_1} = \frac{0,00648}{1,6} = 0,00405 \text{ kg/kg}$$

Vraćanjem ove vrijednosti u jed.(3) slijedi

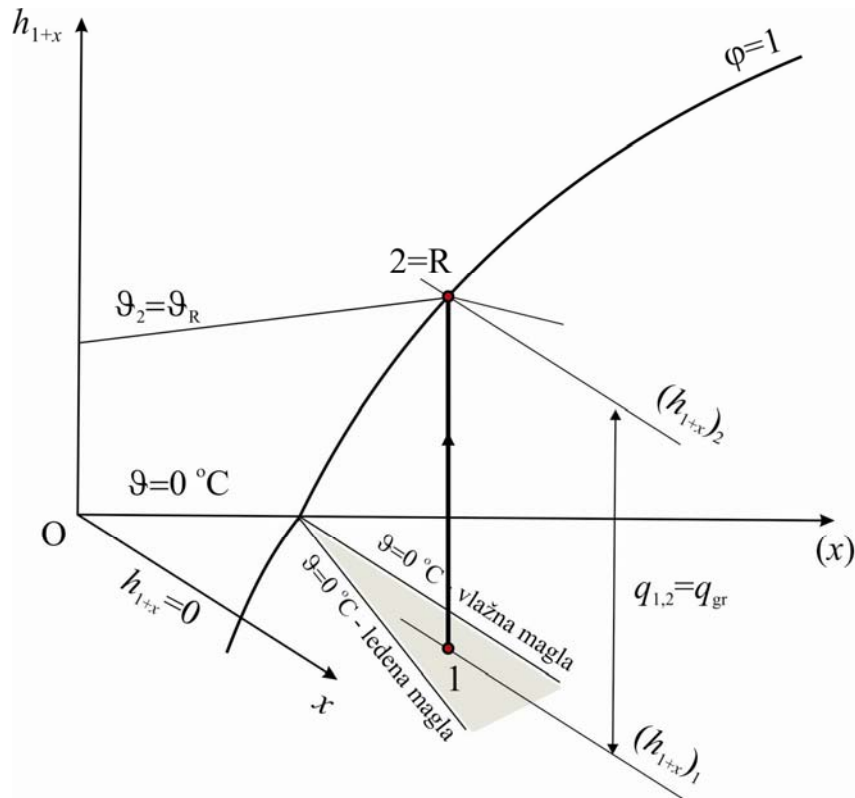
$$(h_{1+x})_1 = x_{s0} r_0 - 0,5 \cdot (x_1 - x_{s0}) q_k = 0,00405 \cdot 2500 - 0,5 \cdot (0,00648 - 0,00405) \cdot 334$$

$$(h_{1+x})_1 = 9,72 \text{ kJ/kg}$$

Uvrštavanjem ovih izračunatih vrijednosti u jed.(2) dobiva se vrijednost traženog specifičnog toplinskog toka

$$q_{1R} = (h_{1+x})_R - (h_{1+x})_1 = 21,18 - 9,73 = \underline{\underline{11,46 \text{ kJ/kg}}}$$

Dijagram na slici 9 predstavlja proces u h_{1+x}, x – dijagramu.



Slika 9. Prikaz procesa u h_{1+x} - x dijagramu

12. Zadatak

Vlažni zrak ukupnog tlaka 100 kPa, temperature 20 °C i relativne vlažnosti 90% se izentropski komprimira u kompresoru na tlak 800 kPa. Potrebno je odrediti:

- relativnu vlažnost zraka na izlazu iz kompresora;
- specifičnu utrošenu snagu za ovu kompresiju

Rješenje

a) – Pretpostavka je, a koju se kasnije, provjerava, da se izentropska kompresija odvija u nezasićenom području vlažnog zraka, gdje se i vlaga (vodena para) i suhi zrak ponašaju po zakonitostima idealnog plina. Tijekom te kompresije ne mijenja se sadržaj vlage pa je $x_1 = x_2$, te se prvo odredi sadržaj pare x_1

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 20^\circ \text{C})}{p - \varphi_1 p_s(\vartheta_1 = 20^\circ \text{C})} = 0,622 \cdot \frac{0,90 \cdot 0,02337}{1,0 - 0,90 \cdot 0,02337} = 0,01336 \text{ kg/kg}$$

$$x_2 = x_1 = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(\vartheta_2)}{p_2 - \varphi_2 p_s(\vartheta_2)} \rightarrow \varphi_2 = \frac{x_1 p_2}{(0,622 + x_1) p_s(\vartheta_2)} \quad (1)$$

Dakle, treba odrediti temperaturu nakon izentropske kompresije, a nju se računa iz omjera temperatura i tlakova pri izentropskoj promjeni mješavine idealnih plinova

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2)$$

Potrebno je odrediti izentropski eksponent κ

$$\kappa = \frac{C_{mp}}{C_{mV}} = \frac{C_{mp}}{C_{mp} - R_m} = \frac{y_z C_{mpz} + y_d C_{mpd}}{y_z C_{mpz} + y_d C_{mpd} - R_m} \quad (3)$$

Molne udjele y_z i y_d u vlažnom zraku, mogu se odrediti iz molne vlažnosti kako slijedi

$$\kappa_d = \frac{n_d}{n_z} = 1,61 \cdot x_1 = 1,61 \cdot 0,01336 = 0,0251 \rightarrow n_d = 0,0251 \cdot n_z$$

$$y_z = \frac{n_z}{n_z + n_d} = \frac{n_z}{n_z + 0,0251 \cdot n_z} = \frac{1}{1 + 0,0251} = 0,9789$$

$$y_d = 1 - y_z = 1 - 0,9789 = 0,0211$$

Vraćanjem ovih vrijednosti u jed.(3) dobiva se vrijednost izentropskog eksponenta κ

$$\kappa = \frac{y_z C_{mpz} + y_d C_{mpd}}{y_z C_{mpz} + y_d C_{mpd} - R_m} = \frac{0,9789 \cdot 29,0948 + 0,0211 \cdot 33,499}{0,9789 \cdot 29,0948 + 0,0211 \cdot 33,499 - 8,314} = 1,3983$$

Uvrštavajući ovu vrijednost u jed.(2), dobiva se iznos tražene temperature T_2

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293,15 \cdot \left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{1,3983-1}{1,3983}} = 530,06 \text{ K}; (= 256,9 \text{ °C})$$

Tlak zasićenja za ovu temperaturu dobiva se linearnom interpolacijom

$$p_s(\vartheta_2 = 256,9 \text{ °C}) = 43,227 + \frac{46,921 - 43,227}{260 - 255} \cdot (256,9 - 255) = 45,324 \text{ bar}$$

pa relativna vlažnost zraka na izlazu iz kompresora iznosi

$$\varphi_2 = \frac{x_1 p_2}{(0,622 + x_1) p_s(\vartheta_2)} = \frac{0,01336 \cdot 8}{(0,622 + 0,01336) \cdot 45,324} = \mathbf{0,0037; (3,7\%)}$$

Vidi se da se nakon izentropske kompresije radi o izrazito suhom zraku, što znači da je utjecaj povećanja temperature tijekom kompresije bio bitno veći od utjecaja povećanja ukupnog tlaka tijekom ove izentropske kompresije.

b) – Specifičnu utrošenu snagu, normiranu na masu suhog zraka, određuje se prema jednadžbi

$$(w_{\text{teh}})_{12} = (h_{1+x})_1 - (h_{1+x})_2 \quad (4)$$

$$(h_{1+x})_1 = c_{pz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{pd} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 20 + 0,01336 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 20) = 54,02 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_{1+x})_2 = c_{pz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{pd} \vartheta_2) = 1,005 \cdot 256,9 + 0,01336 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 256,9) = 298,21 \text{ kJ/kg}$$

Vraćanjem ovih vrijednosti u jed.(4) dobiva se vrijednost utrošene specifične snage

$$(w_{\text{teh}})_{12} = 54,02 - 298,21 = - \mathbf{244,19 \text{ kJ/kg}}$$

[1] A. Galović: Termodinamika II, V. promijenjeno izdanje, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.

[2] B. Halasz, A. Galović, I. Boras: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

Antun Galović

