

111. Struja zraka stanja 1 bar, 32 °C i  $x = 8$  g/kg, protočne mase 2 kg/s, ulazi u prostoriju u kojoj se hladi na 22 °C i prima 20 kg/h vlage. S tim se postignutim stanjem zrak odsisava iz prostorije. Polovica se protočne mase zraka baca, a druga se polovica miješa sa zrakom (uzetim iz okoliša) stanja 0 °C i  $\varphi = 0,8$ , koji je prije ulaska u mješalište zagrijan na +8 °C. Nastala se mješavina ovlažuje vodom temperature 15 °C do konačnoga sadržaja vlage (8 g/kg) i zatim zagrijava prije ulaska u prostoriju.

Kakvo je stanje ( $h$ ,  $x$ ,  $\varphi$ ) zraka u prostoriji? Koliko se zraka baca u okoliš i uzima iz okoliša? Koliko toplinskog toka treba dovoditi za zagrijavanje svježije struje zraka i za zagrijavanje nastale mješavine te koliko se vode troši za ovlaživanje mješavine?

Zadatak treba riješiti računski, bez uporabe  $h,x$ -dijagrama!

Skica procesa u  $h,x$ -dijagramu!

\*\*\* Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati osnovne postupke računanja kako veličina stanja vlažnoga zraka, tako i procesa s vlažnim zrakom.)

Zadani podaci:

$p = 1$  bar

$\vartheta_1 = 32$  °C

$x_1 = 8$  g<sub>w</sub>/kg<sub>sz</sub>

$q_{m, sz} = 2$  kg/s

$\vartheta_2 = 22$  °C

$\Delta q_{m, w} = 20$  kg/h

$z_2 = z_4 = 0,5$

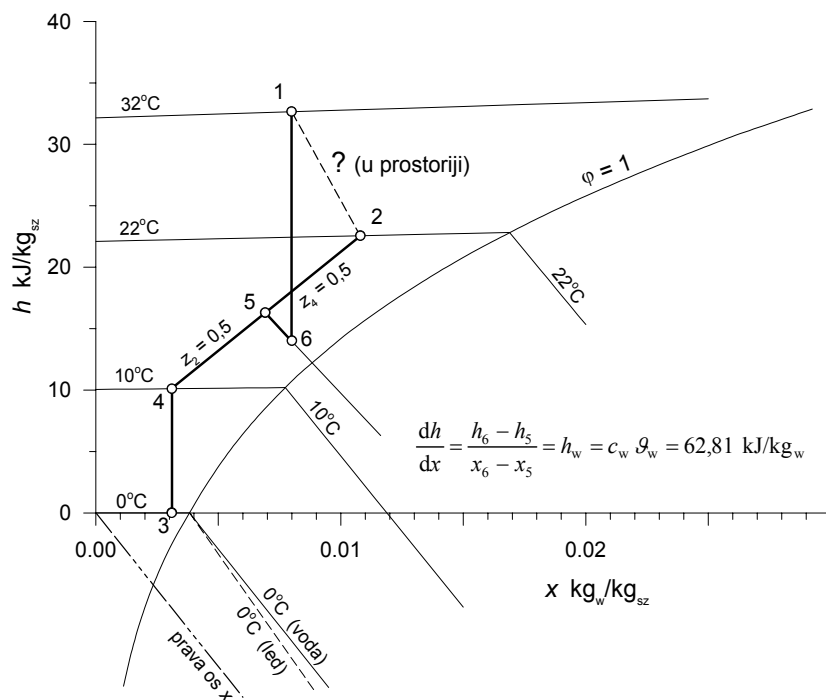
$\vartheta_3 = 0$  °C

$\varphi_3 = 0,8$

$\vartheta_4 = +8$  °C

$\vartheta_w = 15$  °C

$x_6 = x_1 = 8$  g/kg



Ovo je jedan od tipičnih mogućih procesa pripreme zraka za zimsku klimatizaciju neke prostorije. Da bi se održalo stalno stanje zraka u prostoriji (iz koje očigledno toplinski tok izlazi kroz zidove u okoliš niske temperature), zrak koji ulazi u prostoriju mora imati višu temperaturu nego masa zraka koja se nalazi u prostoriji, tako da on, miješajući se s tom masom zraka, njoj predaje toplinski tok, a ona opet, u dodiru s hladnijim zidovima, taj primljeni toplinski tok predaje dalje.

U svim našim zadacima pretpostavlja se da je zadano stanje stacionarno, a inače, za ozbiljne proračune klimatizacije postoje već računalni programi koji uzimaju u obzir realnije (promjenljive) uvjete. Zbog gornjih razloga, zrak koji ulazi u prostoriju mora zimi imati višu temperaturu od one koja se uzima kao stalna u prostoriji. Kako zrak ulazi u prostoriju upuhivanjem kroz nekakve istrujne otvore (rešetke), domet mlaza je razmjerno malen, ulazeći zrak se dosta brzo pomiješa s masom zraka u prostoriji, pa smatramo da najveći dio zraka u prostoriji ima ujednačeno stanje (“stanje u prostoriji”).

Većina klimatiziranih prostorija su one u kojima borave ljudi. Budući da čovjek odaje određenu količinu vlage disanjem i kroz kožu, tamo gdje je prisutan veći broj ljudi zrak će u prostoriji imati primjetno veći sadržaj vlage nego što ga je imao na ulazu u prostoriju. Ako zrak ulazi u prostoriju, po zakonu održanja mase, mora ista količina zraka i izaći (bilo da se odsisava ili sama izlazi kroz otvore – prozore). Mjesta gdje zrak izlazi udaljena su od ulaznih otvora, pa izlazi zrak sa “stanjem u prostoriji”, dakle s povećanim sadržajem vlage. Zato kažemo da “zrak odvodi vlagu iz prostorije”. Jednadžbe koje prikazuju bilanciranje energije i tvari u prostoriji prikazane su u kasnijim zadacima.

Sâm proces pripreme zraka teče na sljedeći način: zbog uštede energije ne koristi se samo (hladan) svježi zrak, nego se dio (toploga) zraka iz prostorije vraća i miješa sa svježim zrakom. Često se taj svježi zrak prije miješanja malo zagrije, prvenstveno da bi se izbjeglo stvaranje zamagljene mješavine pri miješanju toplog i vlažnog zraka s jako hladnim zrakom. Ako je omjer miješanja tako odabran (npr. zbog higijenskih razloga) da sadržaj vlage u nastaloj mješavini nije onakav kakav bi trebao biti za ulaz u prostoriju, može se vlaga dodati u samom procesu tako da se u struju zraka raspršuje ili kapljevita voda ili vodena para. U ovom je primjeru odabrano da to bude kapljevita voda. Tako pripremljen zrak još uvijek ima nižu temperaturu od onog u prostoriji (a treba imati višu), pa ga treba još zagrijati u izmjenjivaču topline. Tek sada je zrak spreman za ubacivanje u prostoriju.

U zadacima se rabi uvijek ista “šablona”:

- za izračunavanje veličina stanja vlažnoga zraka postoji nekoliko razmjerno jednostavnih analitičkih formula, kao npr.:

$$x = \frac{0,622 \cdot p_d}{p - p_d} \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz},$$

$$h = c_{p,sz} \vartheta + x (r_0 + c_{p,d} \vartheta) \text{ kJ/kg}_{sz},$$

a ako se dozvoljava očitavanje podataka iz Mollierovog  $h,x$ -dijagrama, te se veličine mogu i očitati. Čak ako se i traži računski postupak, preporuča se izračunate vrijednosti provjeriti s pomoću dijagrama (standardni  $h,x$ -dijagram je crtan za ukupni tlak 1 bar!);

- za pripremu zraka koristimo se sa svega nekoliko osnovnih procesa (zagrijavanje ili ohlađivanje zraka, miješanje, dodavanje kapljevite vode ili vodene pare) i za svaki od njih postoje također jednostavne analitičke veze između početnih i konačnih veličina stanja zraka (ili jednostavne konstrukcije u  $h,x$ -dijagramu);
- svaki se zadatak sastoji od slaganja “kockica” (procesu) prema opisu u tekstu.

\*\*\* TREBA PAZITI! Iako stalno imamo posla s vlažnim zrakom, sve gornje jednadžbe (i za veličine stanja i za procese) izražene su po kilogramu suhoga zraka!

Točka “1” - zadano je:  $\vartheta_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $x_1 = 0,008 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}$ , pa se entalpija može izravno računati:

$$h_1 = c_{p,sz} \vartheta_1 + x_1 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_1) = 1,005 \cdot 32 + 0,008 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 32) = 52,654 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

Točka “2” – stanje u prostoriji - zadano je:  $\vartheta_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ( $p_{g,2} = 0,02642 \text{ bara}$ ).

Zadano je i to da se u prostoriji, kroz koju prolazi  $2 \text{ kg/s}$  zraka, “oslobađa”  $20 \text{ kg/h}$  vlage, što znači da se sadržaj vlage u zraku poveća na:

$$x_2 = x_1 + \frac{\Delta q_{m,w}}{q_{m,sz}} = 0,008 + \frac{20}{3600 \cdot 2} = 0,01078 \text{ kg}_w/\text{kg}_{sz}.$$

Napomena: zadana protočna masa od 2 kg/s je protočna masa “suhoga” zraka i ona je ista na ulazu u prostoriju i na izlazu iz nje! Prava je protočna masa veća za iznos sadržane vlage, dakle, nije ista na ulazu u prostoriju i na izlazu iz nje! Prava je protočna masa (vlažnog zraka) na ulazu u prostoriju

$$2 \cdot (1+x_1) = 2 \cdot (1+0,008) = 2,016 \text{ kg/s} = 7257,6 \text{ kg}_{vz}/h,$$

a na izlazu iz nje

$$2 \cdot (1+x_2) = 2 \cdot (1+0,01078) = 2,0215 \text{ kg/s} = 7277,6 \text{ kg}_{vz}/h$$

i očigledno se razlikuju baš za masu vlage koja se oslobađa u prostoriji (20 kg/h)!

Baš zato što se prava protočna masa zraka mijenja, a protočna masa suhoga zraka ne mijenja, u svim se računima služimo protočnom masom suhoga zraka!

Sadržaju vlage  $x_2$  odgovara parcijalni tlak pare u zraku

$$p_{d,2} = \frac{x_2 p}{0,622 + x_2} = \frac{0,01078 \cdot 1}{0,622 + 0,01078} = 0,01703 \text{ bar},$$

pa je relativna vlažnost zraka stanja “2”:

$$\varphi_2 = \frac{p_{d,2}}{p_{g,2}} = \frac{0,01703}{0,02642} = 0,6446 = 64,46 \%$$

i njegova entalpija:

$$h_2 = c_{p,sz} \vartheta_2 + x_2 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_2) = 1,005 \cdot 22 + 0,01078 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 22) = 49,512 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “3” - okolišno stanje – zadano je:  $\vartheta_3 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_3 = 0,8$ ;

$$p_{g,3} = 0,006108 \text{ bar}; \quad p_{d,3} = \varphi_3 p_{g,3} = 0,8 \cdot 0,006108 = 0,004886 \text{ bar};$$

$$x_3 = \frac{0,622 \cdot p_{d,3}}{p - p_{d,3}} = \frac{0,622 \cdot 0,004886}{1 - 0,004886} = 0,003054 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_3 = c_{p,sz} \vartheta_3 + x_3 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_3) = 1,005 \cdot 0 + 0,003054 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 0) = 7,636 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “4” – zadano je:  $\vartheta_4 = +8 \text{ }^\circ\text{C}$ ; za zagrijavanje vrijedi:  $x_4 = x_3 = 0,003054 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ , pa je:

$$h_4 = c_{p,sz} \vartheta_4 + x_4 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_4) = 1,005 \cdot 8 + 0,003054 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 8) = 15,723 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka “5” – dobije se miješanjem stanja “2” i “4” u omjeru:  $z_2 = z_4 = 0,5$ :

$$x_5 = z_2 x_2 + z_4 x_4 = 0,5 \cdot 0,01078 + 0,5 \cdot 0,003054 = 0,006916 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_5 = z_2 h_2 + z_4 h_4 = 0,5 \cdot 49,512 + 0,5 \cdot 15,723 = 32,617 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

$$\vartheta_5 = \frac{h_5 - x_5 r_0}{c_{p,sz} + x_5 c_{p,d}} = \frac{32,617 - 0,006916 \cdot 2500}{1,005 + 0,006916 \cdot 1,93} = 15,05 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Kako je sadržaj vlage  $x_5 = 0,006916 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$  manji od traženog  $x_1 = 0,008 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ , nastalu mješavinu treba ovlažiti do tog sadržaja vlage.

Točka “6” – zahtjev je:  $x_6 = x_1 = 0,008 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$  i zadano je ovlaživanje vodom.

Entalpija vode za ovlaživanje određena je njenom zadanom temperaturom:

$$h_w = c_w \vartheta_w = 4,187 \cdot 15 = 62,805 \text{ kJ/kg}_w.$$

Za ovlaživanje kapljevitom vodom vrijedi zakon:

$$\frac{h_6 - h_5}{x_6 - x_5} = h_w$$

iz čega se dobije entalpija točke "6":

$$h_6 = h_5 + h_w (x_6 - x_5) = 32,617 + 62,805 \cdot (0,008 - 0,006916) = 32,686 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

Temperatura zraka stanja "6":

$$g_6 = \frac{h_6 - x_6 r_0}{c_{p,sz} + x_6 c_{p,d}} = \frac{32,686 - 0,008 \cdot 2500}{1,005 + 0,008 \cdot 1,93} = 12,43^\circ\text{C}$$

niža je od temperature zraka stanja "5", jer toplinu za ishlapljivanje vode daje zrak!

U okoliš se baca (i iz njega uzima):  $q_{m,s} = q_{m,svježe} = q_{m,bačeno} = 1 \text{ kg/s}$  (suhoga!) zraka.

Izmijenjeni toplinski tokovi su:

- za zagrijavanje okolišnoga zraka od stanja "3" do "4":

$$\Phi_{3-4} = q_{m,s} (h_4 - h_3) = 1 \cdot (15,723 - 7,636) = 8,09 \text{ kW} = 29100 \text{ kJ/h};$$

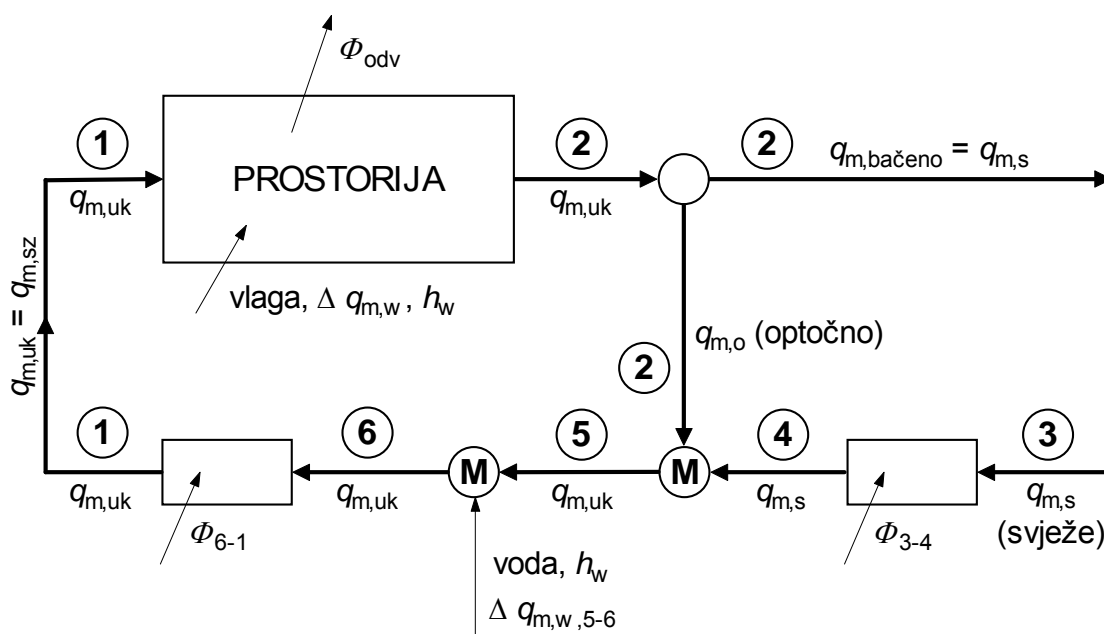
- za zagrijavanje mješavine od stanja "6" do "1":

$$\Phi_{6-1} = q_{m,uk} (h_1 - h_6) = 2 \cdot (52,654 - 32,686) = 39,94 \text{ kW} = 143800 \text{ kJ/h}.$$

Za ovlaživanje zraka od stanja "5" do "6" potrebna je protočna masa vode:

$$\Delta q_{m,w,5-6} = q_{m,uk} (x_6 - x_5) = 2 \cdot (0,008 - 0,006916) = 0,00217 \text{ kg}_w / \text{s} = 7,80 \text{ kg}_w / \text{h}.$$

Schema prostorije i postrojenja za pripremu zraka:



114. Za ljetnu klimatizaciju prostorije koristi se sljedeći postupak: iz prostorije se odsisava zrak stanja 24 °C i  $\varphi = 50\%$  i miješa se s jednakom protočnom masom vanjskog zraka stanja 33 °C i  $\varphi = 40\%$ . Nastala se mješavina hladi da bi se izdvojila suvišna vlaga, tako da nakon hlađenja i odvajanja izlučene vlage preostane potpuno zasićen zrak temperature 10 °C. Nakon toga se zrak zagrijava na 20 °C i s postignutim stanjem ubacuje (upuhuje) u prostoriju.

Treba odrediti entalpiju i sadržaj vlage u istaknutim točkama procesa! Kolika je odvedena i dovedena toplina u procesu pripreme zraka, izražena po  $\text{m}^3$  zraka konačnoga stanja s kojim on ulazi u prostoriju?

Zadatak riješiti računski, bez uporabe  $h,x$ -dijagrama!

Skica procesa pripreme zraka u  $h,x$ -dijagramu!

\*\*\* Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati jedan mogući proces pripreme zraka za ljetnu klimatizaciju. Pokazati kako se izmijenjena toplina izražena po kilogramu suhoga zraka može preračunati na  $\text{m}^3$  volumena vlažnoga zraka odabranog stanja - pogodno, npr. ako se želi daljnji račun provoditi s protočnim volumenima.)

Zadani podaci:

$$g_1 = 24\text{ °C}$$

$$\varphi_1 = 50\% = 0,5$$

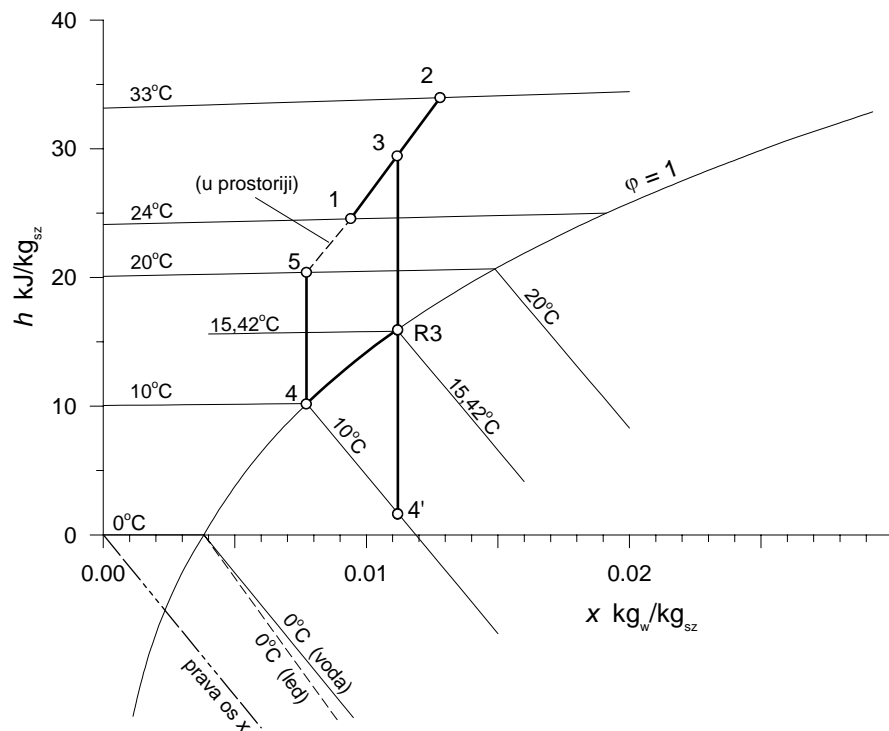
$$z_1 = z_2 = 0,5$$

$$g_2 = 33\text{ °C}$$

$$\varphi_2 = 40\% = 0,4$$

$$g_4 = +10\text{ °C}$$

$$g_5 = 20\text{ °C}$$



Točka "1":  $g_1 = 24\text{ °C}$ ;  $\varphi_1 = 50\%$ ;  $p_{g,1} = 0,02982\text{ bar}$ ;  $p_{d,1} = \varphi_1 \cdot p_{g,1} = 0,01491\text{ bar}$ .

$$x_1 = \frac{0,622 \cdot p_{d,1}}{p - p_{d,1}} = \frac{0,622 \cdot 0,01491}{1 - 0,01491} = 0,009414\text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_1 = c_{p,sz} g_1 + x_1 (r_0 + c_{p,d} g_1) = 1,005 \cdot 24 + 0,009414 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 24) = 48,092\text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "2":  $g_2 = 33\text{ °C}$ ;  $\varphi_2 = 40\%$ ;  $p_{g,2} = 0,05029\text{ bar}$ ;  $p_{d,2} = \varphi_2 \cdot p_{g,2} = 0,020116\text{ bar}$ .

$$x_2 = \frac{0,622 \cdot p_{d,2}}{p - p_{d,2}} = \frac{0,622 \cdot 0,020116}{1 - 0,020116} = 0,01277\text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_2 = c_{p,sz} g_2 + x_2 (r_0 + c_{p,d} g_2) = 1,005 \cdot 33 + 0,01277 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 33) = 65,901\text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "3": dobije se miješanjem struja "1" i "2" u masenom omjeru:  $z_1 : z_2 = 1:1$ , dakle je:

$$z_1 = z_2 = 0,5;$$

$$x_3 = z_1 x_1 + z_2 x_2 = 0,5 \cdot 0,009414 + 0,5 \cdot 0,01277 = 0,01109 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz};$$

$$h_3 = z_1 h_1 + z_2 h_2 = 0,5 \cdot 48,092 + 0,5 \cdot 65,901 = 56,996 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

$$\vartheta_3 = \frac{h_3 - x_3 r_0}{c_{p,sz} + x_3 c_{p,d}} = \frac{56,996 - 0,01109 \cdot 2500}{1,005 + 0,01109 \cdot 1,93} = 28,51 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (ne traži se!)};$$

Točka "4": zadano  $\vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_4 = x_{s4} = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ .

$$h_4 = c_{p,sz} \vartheta_4 + x_4 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_4) = 1,005 \cdot 10 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 10) = 29,516 \text{ kJ/kg}_{sz};$$

Točka "4'":  $x_{4'} = x_3 = 0,01109 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ ;  $\vartheta_{4'} = \vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Ta je točka u zamagljenu području, a poznate su i temperatura  $\vartheta_{4'}$  i sadržaja vlage  $x_{4'}$ , pa se entalpija zamagljenoga zraka  $h_{4'}$  može računati s pomoću formule:

$$h_{4'} = \underbrace{c_{p,sz} \vartheta_{4'} + x_{s,4} (r_0 + c_{p,d} \vartheta_{4'})}_{h_4!} + (x_{4'} - x_{s,4}) c_w \vartheta_{4'} =$$

$$= \underbrace{1,005 \cdot 10 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 10)}_{29,516} + (0,01109 - 0,007727) \cdot 4,187 \cdot 10 = 29,657 \text{ kJ/kg}_{sz},$$

gdje je  $x_{s,4} = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$  sadržaj vlage zasićenoga zraka temperature  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

No, kako točke "4" i "4'" leže na istoj vlažnoj izotermi  $\vartheta_4 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , čiji je nagib:

$$\left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\vartheta_4} = \frac{h_{4'} - h_4}{x_{4'} - x_4} = h_w = c_w \vartheta_4 = 4,187 \cdot 10 = 41,87 \text{ kJ/kg}_w,$$

entalpija  $h_{4'}$  može se računati i s pomoću formule:

$$h_{4'} = h_4 + h_w (x_{4'} - x_4) = 29,516 + 41,87 \cdot (0,01109 - 0,007727) = 29,657 \text{ kJ/kg}_{sz}.$$

No, ako bolje zagledamo tu jednadžbu i usporedimo je s gornjom formulom za entalpiju zamagljenoga vlažnog zraka, vidjet ćemo da je to zapravo ista formula!

Točka "5": zadano  $\vartheta_5 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $x_5 = x_4 = 0,007727 \text{ kg}_w / \text{kg}_{sz}$ .

$$h_5 = c_{p,sz} \vartheta_5 + x_5 (r_0 + c_{p,d} \vartheta_5) = 1,005 \cdot 20 + 0,007727 \cdot (2500 + 1,93 \cdot 20) = 39,715 \text{ kJ/kg}_{sz}.$$

$$v_5 = 461,5 \frac{T_5}{p} (0,622 + x_5) = 461,5 \cdot \frac{293,15}{1 \cdot 10^5} \cdot (0,622 + 0,007727) = 0,8520 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Toplina odvedena pri hlađenju od "3" do "4" (svedena na 1 kg (suhoga zraka) mješavine):

$$q_{3-4} = h_4 - h_3 = 29,516 - 56,996 = -27,480 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

može se preračunati na  $\text{m}^3$  zraka stanja "5", dijeljenjem s  $v_5$ :

$$q_{3-4}^* = \frac{q_{3-4}}{v_5} = \frac{-27,480}{0,8520} = -32,26 \text{ kJ/m}^3$$

Toplina dovedena za zagrijavanje od "4" do "5":

$$q_{4-5} = h_5 - h_4 = 39,715 - 29,516 = 10,199 \text{ kJ/kg}_{sz}$$

preračunato na  $\text{m}^3$  stanja "5":

$$q_{4-5}^* = \frac{q_{4-5}}{v_5} = \frac{10,199}{0,8520} = 11,97 \text{ kJ/m}^3.$$

