

Nikola Grahovac,
dipl. inž
Institut za nuklearnu
nauku "Vinča",
Laboratorija za
materijale, post, fah
522,11001 Beograd

Primena vlažnog komprimovanog vazduha je danas značajna posebno u oblastima metalurgije, automobilske industrije i raznim domenima procesne proizvodnje. U ovom članku je autor nastojao da čitaocu približi problematiku vlažnog komprimovanog vazduha, uključujući i osobine termodinamičkih faktora od kojih zavisi razmena toplote i mase kod vlažnog komprimovanog vazduha. Posmatran je opseg pritisaka od 10 do 10³ kPa i opseg temperatura od -20°C do +90°C. Apsolutne vrednosti svih termodinamičkih veličina, koje su u vezi sa vlažnim komprimovanim vazduhom, moći će se pronaći u Priručniku za vlažan komprimovan vazduh, koji autor ovog članka priprema za štampu.

Vlažan komprimovan vazduh

1. Uvod

U literaturi se do sada mogla pronaći vrlo oskudna informacija o osobinama vlažnog komprimovanog vazduha i njihovim zavisnostima od apsolutnog pritiska na kome se nalazi vlažan vazduh i temperature vlažnog vazduha. Takve smeše, u kojima se jedna komponenta pojavljuje samo u gasovitom stanju, a druga u gasovitom ili tečnom ili čvrstom stanju, su smeše gasova i para. Tipičan predstavnik ovih smeša je vlažan vazduh.

Čist vazduh (vazduh čist od vode i vodene pare) po sebi nije jedinstvena materija, ali u ovom slučaju i kod sličnih problema odnos sastojaka čistog vazduha (O₂, N₂ i drugih) se ne menja, pa otuda čist vazduh možemo smatrati jednom komponentom, a vodenu paru i vodu drugom. U ovim razmatranjima zanemaruje se i otapanje vazduha na običnoj temperaturi, jer je ono neznatno.

Komponente vlažnog vazduha (čist vazduh i vodenu paru) smatraćemo idealnim gasovima.

U svim problemima količina čistog vazduha biće stalna, dok se voda ili kondenzuje, ili isparava, pa se udeo vodene pare stalno menja.

U radu će delimično biti prikazani delovi matematičkog modela koji potpuno definiše osobine vlažnog vazduha i termodinamičkih faktora, od kojih zavisi razmena toplote u vlažnom vazduhu, koji su neophodni za razumevanje osobina vlažnog vazduha na pritiscima višestruko većim od atmosferskog. Pod apsolutnom vlažnošću vazduha:

$$x = \frac{W}{Z} \quad (\text{kg}_w / \text{kg}_z) \quad (1)$$

smatra se ona količina vode pare x koju nalazimo u $(1 + x)$ kg vlažnog vazduha ili u 1 kg čistog vazduha. Indeks "w" se odnosi na vodu ili vodenu paru, a "z" na čist vazduh. S druge strane, molni udeo vode:

$$x = \frac{W/m_w}{Z/m_z} \quad (\text{kmol}_w / \text{kmol}_z) \quad (2)$$

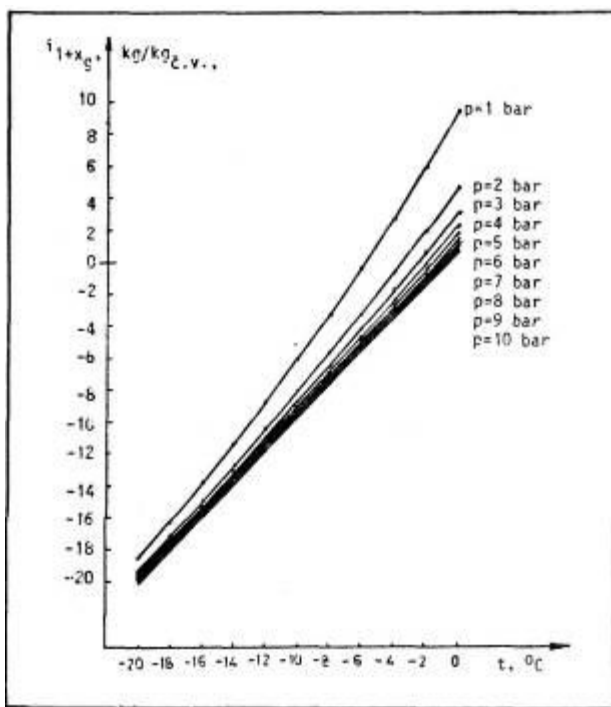
gde su: $m_w = 18 \text{ kg/kmol}$ i $m_z = 29 \text{ kg/kmol}$ molske mase vode

i čistog vazduha između (1) i (2) je veza:

$$x = 0,622 \chi \quad \chi = 1,61x \quad (3)$$

Ako sa p označimo ukupan pritisak smeše, a sa p_d parcijalni pritisak vodene pare, biće ($p_z = p - p_d$) parcijalni pritisak čistog vazduha u smeši, prema Daltonovom zakonu. U smeši idealnih gasova, poznato je da se molske količine odnose kao parcijalni pritisci, pa je:

$$x_d = 0,622 \frac{p_d}{p - p_d}; \quad \chi = \frac{p_d}{p - p_d} \quad (4)$$



Slika 1. Oblast niskih temperatura

Poslednji izraz važi samo za parni deo vode u smeši, a ne i za tečni. Kada je parcijalni pritisak vodene pare jednak pritisku

zasićenja p_g apsolutna vlažnost vazduha za određenu temperaturu je:

$$x_g = 0,622 \frac{p_g}{p - p_g}; \quad \chi_g = \frac{p_g}{p - p_g} \quad (5)$$

Inače, pri ukupnom pritisku smeše p i pri temperaturi t , 1 kg čistog vazduha ne može primiti više vodene pare u parnom stanju, nego što to dozvoljava izraz (5). Svaki višak bi se odmah kondenzovao, drugim rečima zamaglio. Pritisak p_g iz izraza (5) određujemo iz tablica vodene pare za posmatranu temperaturu t . Prema tome, maksimalna vlažnost koju je moguće postići kada je vazduh u parnom stanju, zavisi, osim od ukupnog pritiska, još i od temperature.

U ovom radu se prikazuju osobine vlažnog komprimovanog vazduha na pritiscima $p = 10^2$ kPa do $p = 10^3$ kPa i temperaturama $t = -20^\circ\text{C}$ do $t = +90^\circ\text{C}$, a gde je to potrebno računalo se po 1 kg čistog vazduha. Sve apsolutne vrednosti koje se javljaju u dijagramima koji će biti prikazani u radu, dobijene su izračunavanjem iz poznatog matematičkog modela za osobine vlažnog vazduha na personalnom računaru. Sva razmatranja i diskusije vezane su za pomenute opsege apsolutnih pritisaka i temperatura vlažnog vazduha na liniji zasićenja.

2. Apsolutna vlažnost i entalpija vlažnog vazduha na liniji zasićenja pri $p = 10^2$ kPa do $p = 10^3$ kPa i temperaturama $t = -20^\circ\text{C}$ do $t = +90^\circ\text{C}$

Za određivanje parcijalnog pritiska vodene pare, apsolutne vlažnosti i entalpije vlažnog vazduha, korišćemo Daltonov zakon, izraz (5), kao i izraz za određivanje entalpije vlažnog vazduha, ako je vlaga samo u parnom stanju, tj. ako imamo mešavinu vazduha sa pregrejanom parom (mešavina je homogena). Izraz za određivanje entalpije je:

$$i_1 + x_g = C_{PL} \cdot t + x_g (C_{Pd} \cdot t + r_0) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (6)$$

gde je: $C_{PL} = 1,005$ kJ/kgK; $C_{Pd} = 1,93$ kJ/kgK i $r_0 = 2500$ kJ/kg.

Prema dijagramu na slici 1, očigledno je da sa porastom temperature vlažnog vazduha, a pri konstantnom pritisku, dolazi do povećanja entalpije po zakonu koji nije linearan, što je i logično, jer je iz izraza (6) u opštem slučaju $C = f(t)$.

Kada se zadržimo samo na oblasti niskih temperatura vlažnog komprimovanog vazduha, očigledno je da sa porastom apsolutnog pritiska vlažnog vazduha do 4 bara, promena entalpije nije velika, a za pritiske veće od 4 bara dobija se skoro konstantna vrednost entalpije, ako se posmatranje vrši za jednu temperaturu vlažnog vazduha. Ovo se odnosi na niske temperature (oblast sublimacije vlažnog vazduha), tj. za temperature do "trojne tačke" - $t = 0^\circ\text{C}$, što ostaje oblast i dalje vrlo interesantna za istraživanje uslova za razmenu toplote i mase kao i termodinamičkih osobina.

3. Termodinamički faktori od kojih zavisi razmena toplote u vlažnom vazduhu na pritiscima $p = 10^2$ kPa do $p = 10^3$ kPa i temperaturama $t = -20^\circ\text{C}$ do $t = +90^\circ\text{C}$

Gustinu vlažnog vazduha odredićemo preko:

$$\rho = \rho_{cv} + \rho_p \quad (7)$$

gde je $\rho_{cv} = \frac{p_{cv}}{R_{cv}T}$ gustina čistog vazduha, a $\rho_p = \varphi \cdot \rho''$ gustina vodene pare, pa je:

$$\rho = \frac{p - \varphi \cdot p_g}{R_{cv}T} + \varphi \cdot \rho'' \quad (8)$$

Prema Daltonovom zakonu je:

$$p_{cv} = p - p_p \quad (9)$$

gde je:

$$p_p = \varphi \cdot p_g \quad (10)$$

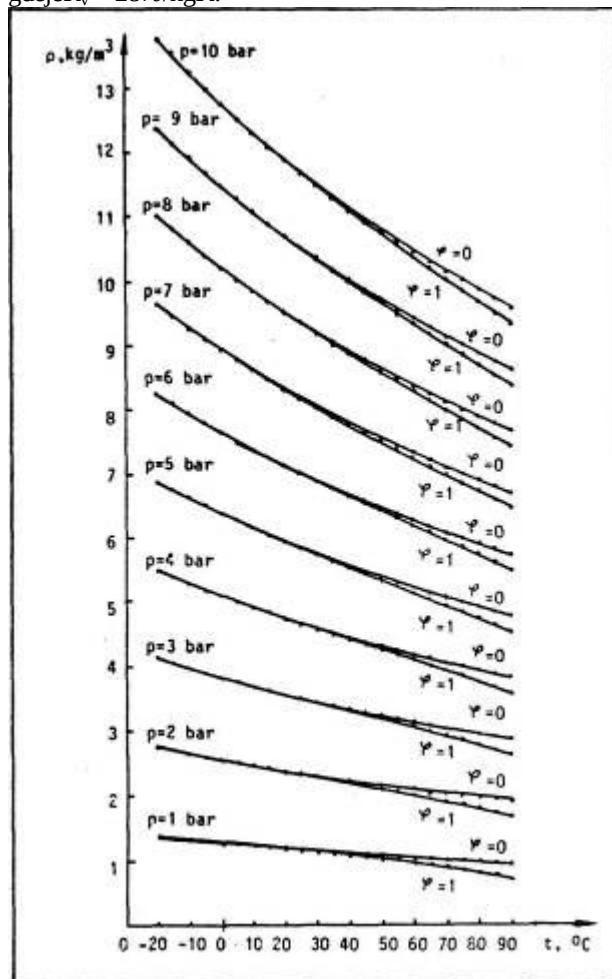
paje:

$$p_{cv} = p - \varphi \cdot p_g \quad (11)$$

a gustina je:

$$P = \frac{p - \varphi \cdot p_g}{R_{cv}T} + \varphi \cdot \rho'' \quad (\text{kg/m}^3) \quad (12)$$

gde je $R_{cv} = 287$ J/kgK.

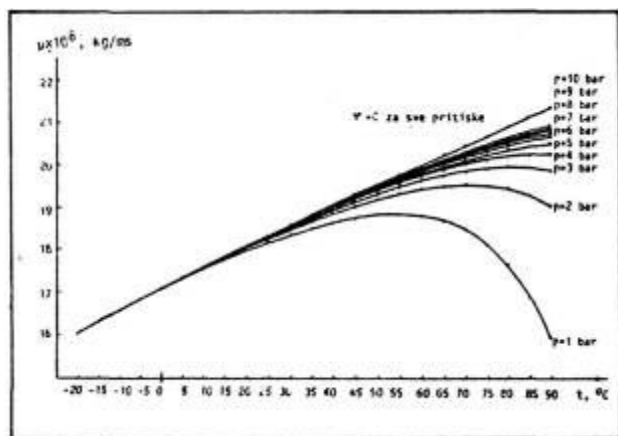


Slika 2. Zavisnost gustine vlažnog vazduha od pritiska i temperature

Dijagramom na slici 2 prikazana je zavisnost gustine vlažnog vazduha na pritiscima $p = 10^2$ kPa do $p = 10^3$ kPa i pri relativnoj vlažnosti $\varphi = 0$ i $\varphi = 1$, od temperature. Uočava se da se u oblasti niskih temperatura do $t = 0^\circ\text{C}$ vrednosti gustine za $\varphi = 0$ i $\varphi = 1$ za svaki od posmatranih pritisaka vlažnog vazduha poklapaju, da bi na temperaturama od $t = 35^\circ\text{C}$ do $t = 90^\circ\text{C}$ za svaki od posmatranih pritisaka bila prisutna ravnomerna promena gustine vlažnog komprimovanog vazduha od temperature u opsegu $\varphi = 0$ do $\varphi = 1$.

Isto tako, sa povećanjem pritiska vlažnog vazduha uočava se strmiji karakter krive promene $p = f(p, t)$, da bi najstmpija kriva bila za $p = 10^3$ kPa. Apsolutne vrednosti gustine vlažnog vaz-

duha se sa povećanjem pritiska povećavaju, a sa povećanjem temperature smanjuju. Karakter promene gustine vlažnog komprimovanog vazduha $\rho = f(p, t)$ je hiperbolični [što se slaže sa izrazom (12)].



Slika.3.

Razlog viskoznosti gasova leži pre svega u izmeni impulsa molekula. Pošto pod vlažnim vazduhom podrazumevamo smesu dva idealna gasa, to pri određivanju viskoznosti vlažnog komprimovanog vazduha koristimo činjenicu da kod idealnih gasova viskoznost zavisi samo od temperature. Da nije ove pretpostavke, morala bi se uzeti u obzir i zavisnost od pritiska. Zbog toga, za čist vazduh i vodenu paru (kao idealne gasove) posebno, koristimo Satherlandovu relaciju:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (13)$$

gde je $C = \text{const}$, za određeni gas, a vrednosti za T_0 i μ_0 su date tablično (Emova tabela). U našem slučaju u relaciji Satherland, odgovarajuće konstante su:

za čist vazduh: $t_0 = 0^\circ\text{C}$; $\mu_0 = 17,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms} \rightarrow C = 123,6$

za vodenu paru: $t_0 = 99^\circ\text{C}$; $\mu_0 = 12,55 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms} \rightarrow C = 673$

Pošto za tražene temperature odredimo preko izraza (13) dinamičke viskoznosti za svaku od komponenata vlažnog vazduha i znajući težinske delove komponenti, odredićemo dinamičku viskoznost vlažnog vazduha kao:

$$\mu = \mu_{cv} \cdot g_{cv} + \mu_p \cdot g_p \quad (\text{kg/ms}) \quad (14)$$

gde su g_{cv} i g_p težinski delovi pojedinih komponenata u smesi, da bi zatim kinematska viskoznost bila:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (15)$$

uz napomenu da se sve odnosi na stanje, na liniji zasićenja.

Na slici 3. je prikazana zavisnost dinamičke viskoznosti vlažnog vazduha od pritiska i temperature na liniji zasićenja ($\varphi = 1$). Očigledan je parabolni karakter promene za pritiske do $4 \cdot 10^3 \text{ kPa}$, dok za više pritiske do 10^3 kPa dolazi do konvergenije funkcionalne zavisnosti na skoro linearnoj zavisnosti za najviše pritiske. Isto tako, u oblasti niskih temperatura zavisnost $\mu = \mu(p, t)$ je linearna i jednaka za sve pritiske, dok su u intervalu od ($t = 0^\circ\text{C}$ do $t = 10^\circ\text{C}$) za razne pritiske izražene odgovarajuće funkcionalne zavisnosti. Za pritiske od $5 \cdot 10^3 \text{ kPa}$ do 10^3 kPa skoro su konstantne vrednosti dinamičke viskoznosti vlažnog komprimovanog vazduha, ako se posmatranje vrši za jed-

nu temperaturu vlažnog vazduha. Pretpostavka je, što je veoma interesantno, da sa daljim povećavanjem pritiska vlažnog vazduha krive $\mu = \mu(p, t)$ konvergiraju krivoj za $\varphi = 0$ koja je linearna i odgovarajuća za sve pritiske.

Posmatrajući krive na sl. 4 nameće se generalna ocena da sa povećanjem pritiska (komprimovanjem vlažnog vazduha) dolazi do smanjivanja apsolutne vrednosti kinematske viskoznosti. Promena $\nu = \nu(p, t)$ je skoro linearna i to izrazito pri većim pritiscima do 10^3 kPa . Očigledno je da se sa povećanjem pritiska apsolutne vrednosti $\nu = \nu(p, t)$ za jednu temperaturu vlažnog komprimovanog vazduha konvergiraju jednog konstantnoj vrednosti, što bi verovatno još izraženije bilo sa daljim povećanjem pritiska iznad 10^3 kPa .

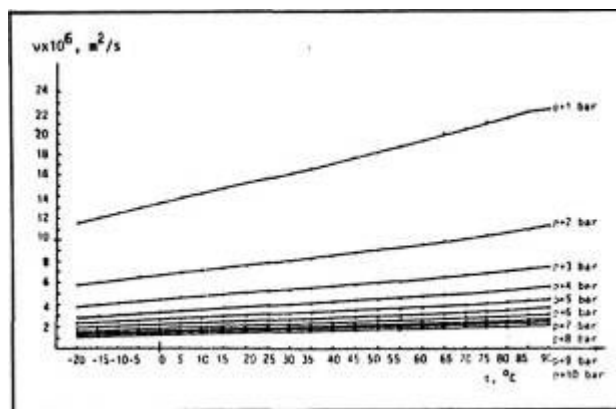
Vlažan vazduh se tretira kao gasna smeša vodene pare i čistog vazduha, pa se otuda masena specifična toplota gasne smeše može izračunati ako su poznati maseni sastav smeše i masene specifične toplote pojedinih komponenata u smeši, tj. da bi se 1 kg gasne smeše zagrejavao za 1°C , potrebno je dovesti $g_1 c_1 + g_2 c_2 + g_3 c_3 + \dots$ toplote, a to znači da je masena specifična toplota gasne smeše jednaka [2]:

$$C_3 = \sum_1^n g_k c_k \quad (16)$$

Isto tako, da bi se 1 m^3 gasne smeše zagrejavao za 1°C , potrebno je dovesti $r_1 c_1' + r_2 c_2' + r_3 c_3' + \dots$ toplote, tj. zapreminska specifična toplota gasne mreže jednaka je:

$$C_s' = \sum_1^n r_k c_k' \quad (17)$$

U ovom slučaju posmatraćemo specifičnu toplotu pri konstantnom pritisku i vrednosti će biti određene korišćenjem jednačine (16). Maseni sastav smeše je poznat (izračunat), a vrednosti specifične toplote pojedinih komponenata uzeće se iz odgovarajuće literature.



Slika 4.

Vrednosti specifične toplote vlažnog vazduha pri konstantnom pritisku mogu se odrediti korišćenjem jednačine:

$$C_p = g_{cv} \cdot C_{pv} + g_p \cdot C_{pp} \quad (18)$$

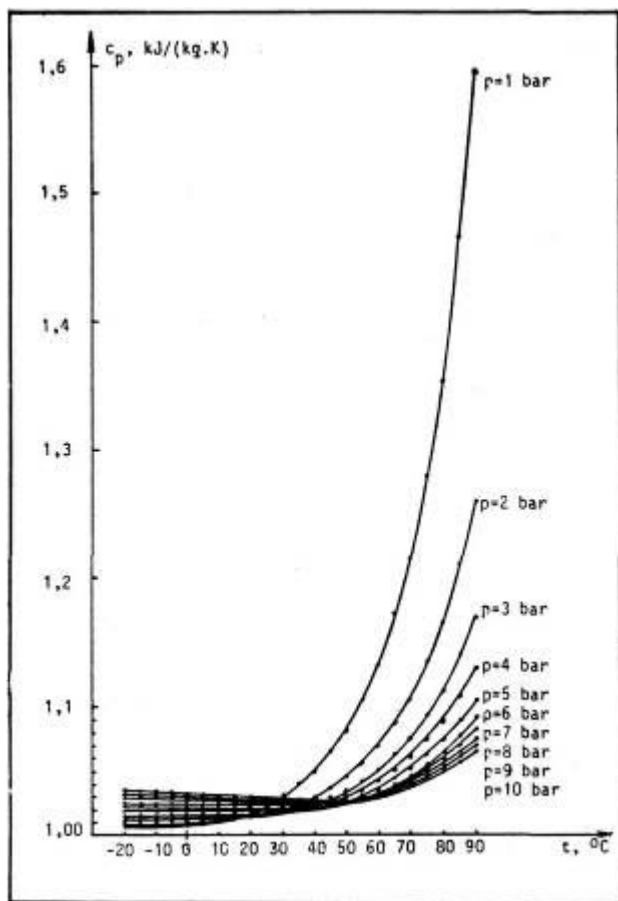
gde su:

g_{cv} - težinski udeo čistog vazduha,

C_{pv} - specifična toplota pri konstantnom pritisku čistog vazduha,

g_p - težinski udeo vodene pare,

C_{pp} - specifična toplota pri konstantnom pritisku vodene pare na liniji zasićenja.



Slika 5.

Na slici 5. prikazana je zavisnost specifične toplote $c_p = c_p(p, t)$ pri konstantnom pritisku od pritiska i temperature. Pri niskim temperaturama vlažnog vazduha dolazi do povećanja specifične toplote sa porastom pritiska, a promena apsolutne vrednosti c_p za čitav opseg posmatranih pritisa je relativno mala. Sa povećanjem pritiska, krive $c_p = c_p(p, t)$ se ispravljavaju i konvergiraju na konstantnoj vrednosti.

Kod idealnih gasova, a samim tim i kao smeše idealnih gasova, i pojava provođenja toplote se može svesti na izmenu impulsa molekula. Sa ovakvim rasuđivanjem kinetička teorija gasova daje vezu između dinamičke viskoznosti i koeficijenta toplotne provodljivosti u obliku:

$$\lambda = \varepsilon \cdot c_p \cdot \mu \quad (\text{W/mK}) \quad (19)$$

gde je $\varepsilon > 1$ (prema A. Eucken) i zavisi od eksponenta adijabate c_p/c_v i to u obliku:

$$\varepsilon = \frac{9-\varepsilon}{4} \quad (20)$$

Specifičnu toplotu pri konstantnoj zapremini odredićemo preko Majerove jednačine:

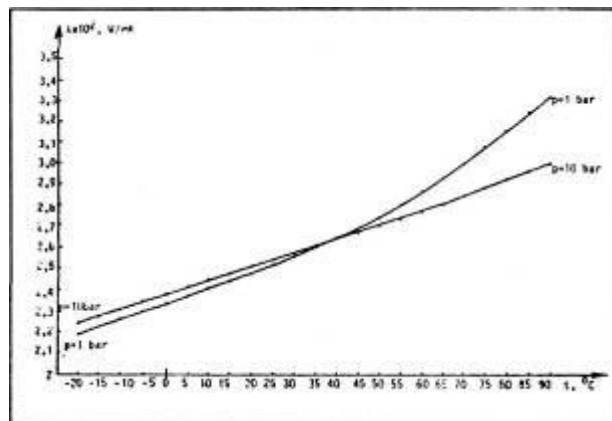
$$C_v = c_p - R \quad (\text{kJ/kgK}) \quad (21)$$

gde se gasna konstanta R određuje preko izraza:

$$R = 0,2887 \cdot (1 - 0,377 \cdot \varphi \frac{p_s}{p}) \quad (\text{kJ/kgK}) \quad (22)$$

Vrednosti koeficijenta toplotne provodljivosti su izračunate posredstvom jednačine (19) i predstavljene dijagramom na slici 6 koji predstavlja $\lambda = \lambda(p, t)$. Za posmatrani opseg pritisa i u celom opsegu temperatura, vrednosti koeficijenta toplotne

provodljivosti vlažnog komprimovanog vazduha su smeštene između krivih za $p = 10^2 \text{ kPa}$ i $p = 10^3 \text{ kPa}$. Do temperature $t = 40^\circ\text{C}$ sa povećanjem pritiska povećava se vrednost λ , dok se iznad $t = 40^\circ\text{C}$ dešava obrnut slučaj - smanjuje se vrednost λ sa komprimovanjem vazduha. Na višim temperaturama $t = 90^\circ\text{C}$ veći je procenat smanjenja λ nego procenat povećanja λ pri niskim temperaturama. Za temperaturu $t = 40^\circ\text{C}$ jednake su vrednosti λ za pritiske $p = 10^2 \text{ kPa}$ i $p = 10^3 \text{ kPa}$.



Slika 6.

4. Zavisnost apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha od pritiska i temperature

Da bismo ispitali zavisnost apsolutne vlažnosti vazduha od pritiska i temperature, posmatraćemo apsolutnu vlažnost na liniji zasićenja (x_g) u zavisnosti od pritisa $p = 10^2 \text{ kPa}$ do $p = 10^3$ i temperatura $t = -20^\circ\text{C}$ do $t = +90^\circ\text{C}$. Dobijene vrednosti su sređene i prikazane u vidu x - x dijagrama (si. 7) i u vidu t - x_g dijagrama (slika 8).

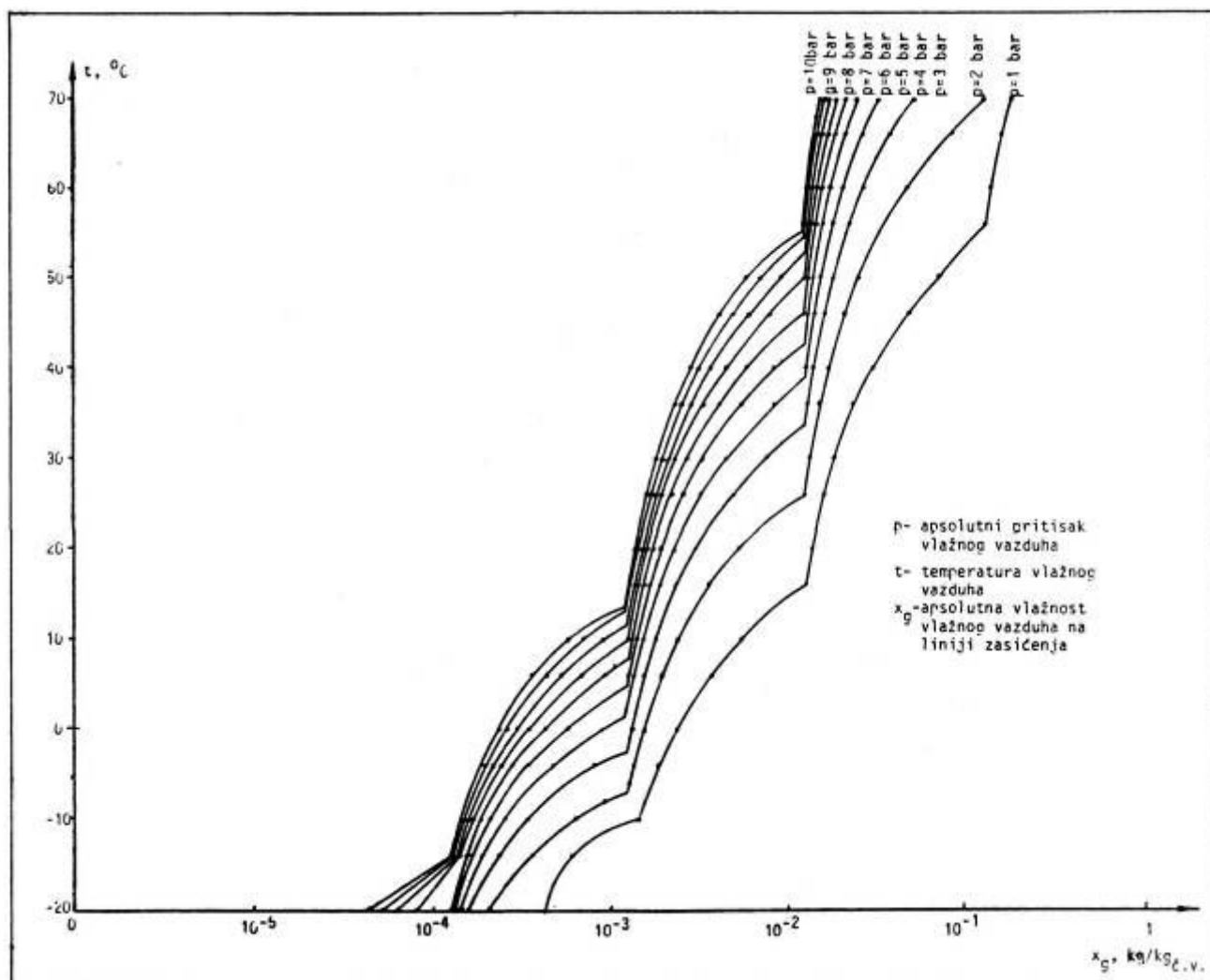
Posmatrajući dijagram na slici 7, očigledno je da se sa povećanjem pritiska smanjuje količina vlage u parnom stanju na liniji zasićenja za jednu temperaturu. Isto tako, za jedan određeni pritisak, povećanjem temperature se povećava količina vlage u parnom stanju (x_g) na liniji zasićenja.

Pri crtanju dijagrama, uzeta je u obzir činjenica da u području u kome se vlažan vazduh vlada kao idealan gas, entalpija vlažnog vazduha je nezavisna od pritiska. Zato za razne pritiske može služiti ista mreža izotermi nezasićenog područja. Linija zasićenja i zamagljeno područje se razlikuje za svaki pritisak, a samim tim i snop izotermi u zamagljenom području.

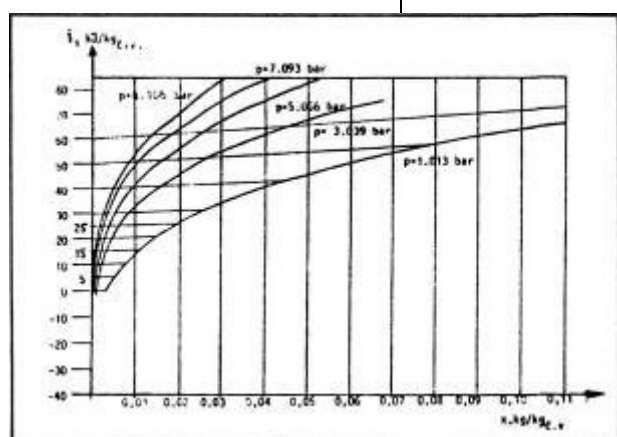
Generalna ocena dijagrama na slici 8 je da krive zavisnosti $t = t(x_g, p)$ imaju prevojne tačke, i da sa povećanjem pritiska konvergiraju na jednoj krivoj koja bi ispravljanjem prevojnih tačaka za još veće pritiske imala oblik verovatno sličan liniji zasićenja vlažnog vazduha.

5. Zaključak

Kada se posmatraju termodinamički faktori od kojih zavisi razmena toplote u vlažnom komprimovanom vazduhu, od pritiska i temperature, nameće se generalni zaključak da u većini slučajeva (kod svih termodinamičkih faktora, izuzev gustine vlažnog vazduha) krive promene od pritiska i temperature, za vrednosti pritiska veće od $p = 4 \cdot 10^2 \text{ kPa}$ konverguju ka jednoj krivoj. Ovo ukazuje na zaključak da pri većim pritiscima od 10^3 kPa , termodinamički faktor, od kojih zavisi razmena toplote skoro da i ne zavise od pritiska, već samo od temperature. U slučaju zavisnosti sa dijagrama na slikama 4,5 i 8, krive



Slika 7.



Slika 8.

promene termodinamičkih faktora od pritiska i temperature konvergiraju čak ka konstantnim vrednostima.

Posmatrajući i-x dijagram na slici 7, nameće se zaključak da se sa komprimovanjem vlažnog vazduha granična kriva pomera u levu stranu, čime se područje magle povećava, što opet ima za posledicu da se za istu vrednost temperature, povećanjem pritiska vlažnog vazduha, smanjuje apsolutna vlažnost vazduha na liniji zasićenja (x_g), a i u ostale dve oblasti.

Oznake

- p - pritisak
- ϕ - relativna vlažnost
- x - apsolutna vlažnost
- c - specifična toplota
- t - temperatura
- r - latentna toplota isparavanja
- ρ - gustina
- T - apsolutna temperatura
- R - gasna konstanta
- μ - dinamička viskoznost
- C - konstanta
- g - težinski udeo
- r - zapreminski udeo
- γ - kinematska viskoznost
- λ - koeficijent provođenja toplote
- ϵ - koeficijent prema A. Euckenu
- ρ - eksponent adijabate

Indeksi

- v.p - vodena para
- č.v. - čist vazduh
- g - linija zasićenja
- p - pri konstantnom pritisku
- L - vazduh
- z - čisti vazduh
- d - para
- o - spoljašnji vazduh

v - vazduh
(") - suva para (sa granične krive)
p - para
v - pri konstantnoj zapremini
w - voda ili vodena para

Literatura

[1] Bošnjaković, *F. Nauka o toplini*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.

[2] **Malić, D.:** *Termodinamika I - Termotehnika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1977.

[3] **Voronjec, D., Kozić, Đ.:** *Vlalan vazduh - termodinamičke osobine i primena*, SMEITS, Beograd, 1980.

[4] **Kozić, Đ. Bekavac, V., Vasiljević, B.:** *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1979.

KGH broj 4/1994