

Vlažan vazduh (I)

D.Voronjec i Đ.Kozić

Vlažan vazduh predstavlja osnovnu radnu materiju u postrojenjima klimatizacije, konvektivnog sušenja itd., koja u toku odvijanja odgovarajućih procesa menja svoje stanje. Pri projektovanju postrojenja koja rade sa vlažnim vazduhom, neophodno je poznavanje termodinamičkih osobina vlažnog vazduha i zakonitosti kojima ova mešavina vazduha i vodene pare podleže.

Brojni primeri iz prakse ukazali su da mnoge greške u projektovanju potiču baš od pogrešnih ili izostavljenih teorijskih analiza promena koje se dešavaju u vlažnom vazduhu.

Zbog toga je Redakcioni odbor »KGH« odlučio da u ovom i nekoliko sledećih brojeva časopisa, ovu rubriku posveti delu termodinamike, koji proučava mešavinu vazduha i vodene pare.

1. UVOD

Među mešavinama gasova i para, koje predstavljaju radne materije u mnogim aparatima i postrojenjima različitih grana mašinske i procesne tehnike, najrasprostranjenija je mešavina vazduha i vodene pare. Ova mešavina predstavlja osnovnu radnu materiju u postrojenjima za klimatizaciju, konvektivno sušenje itd. Za pravilnu eksploataciju i proračun ovih postrojenja, kao i za analizu odgovarajućih procesa, potrebno je posebnu pažnju posvetiti izučavanju osobina vlažnog vazduha. S obzirom da se u mnogim procesima u klimatizacionim postrojenjima i sušarama vlažnost vazduha menja, za analizu takvih procesa ne mogu se primeniti klasične metode, koje se primenjuju za mešavine konstantnog sastava. Za homogenu mešavinu vazduha i vodene pare (nezasićen vlažan vazduh), karakteristična je ne samo činjenica da se u pojedinim procesima količina jedne komponente (vodene pare) menja, već i to da udeo te komponente u mešavini ne može biti proizvoljan, što posebno karakteriše ovu mešavinu u odnosu na obične gasne mešavine.

2. TERMODINAMIČKE OSOBINE VLAŽNOG VAZDUHA

Pošto se, u najopštijem slučaju, vlaga u vlažnom vazduhu može naći u sva tri agregatna stanja (gasovito — vodena para, tečno — voda, čvrsto — led), vlažan vazduh se tretira, u termodinamičkom smislu, kao heterogena dvokomponentna mešavina suvog vazduha i vlage. Nezasićen vlažan vazduh predstavlja u termodinamičkom smislu homogenu dvokomponentnu mešavinu pregrejane vodene pare i suvog vazduha, pri čemu se obe komponente mogu smatrati idealnim gasovima, jer je odstupanje u ponašanju suvog vazduha i pregrejane vodene pare u vlažnom vazduhu na uobičajenim temperaturama i pritiscima neznatno.

Prema osnovnim termodinamičkim zakonima za određivanje toplotnog stanja jedne dvokomponentne mešavine, potrebno je poznavati tri veličine stanja, što znači da se grafička analiza promena stanja jed-

ne dvokomponentne mešavine može sprovesti u prostornom dijagramu, koristeći tri koordinatne ose, od kojih svaka odgovara jednoj od veličina stanja. Grafička analiza procesa, koji se najčešće pojavljuju u tehnici klimatizacije i sušenja, znatno je prostija, pošto se može smatrati da se jedna veličina stanja tokom procesa ne menja (pritisak ostaje približno konstantan, $p = \text{const.}$). Za termodinamičku analizu takvih izobarskih procesa može se koristiti ravanski dijagram (najčešće za $p = 1 \text{ bar} = \text{const.}$) sa dve koordinatne ose, pri čemu se na ordinatu nanose obično vrednosti specifične entalpije vlažnog vazduha (toplotni bilans kod izobarskih procesa svodi se na definisanje razlika entalpija), a na apscisu sastav vlažnog vazduha.

Sastav vlažnog vazduha definiše se najčešće apsolutnom vlažnošću (x), koja predstavlja odnos količine vlage (m_w) i količine suvog vazduha (m_{sv}) u posmatranom vlažnom vazduhu:

$$x = \frac{m_w}{m_{sv}}, \text{ kg vlage/kg suvog vazduha.}$$

Sastav vlažnog vazduha izražen je na ovaj način koncentracijom (odnosom količine jedne komponente prema količini druge komponente), pa se vrednost apsolutne vlažnosti može menjati od 0 do ∞ . Suv vazduh ($m_w = 0$) može se smatrati vlažnim vazduhom sa $x = 0$, a čista vlaga ($m_{sv} = 0$) vlažnim vazduhom sa $x = \infty$.

Pošto je ranije naglašeno da se vlaga u vlažnom vazduhu može naći u tri agregatna stanja, ukupna apsolutna vlažnost, u najopštijem slučaju, iznosi:

$$x = x_p + x_t + x_c$$

gde su:

x_p , kg/kg, — vlaga u parnom stanju (vodena para) u odnosu na jedan kilogram suvog vazduha,

x_t , kg/kg, — vlaga u tečnom stanju (voda) u odnosu na jedan kilogram suvog vazduha,

x_c , kg/kg, — vlaga u čvrstom stanju (led) u odnosu na jedan kilogram suvog vazduha.

Apsolutna vlažnost vazduha može se izraziti i odnosom broja kilomolova vlage (n_w) i broja kilomolova suvog vazduha (n_{sv} , tj. molskom koncentracijom):

$$\square = \frac{n_w}{n_{sv}}, \text{ kmol vlage/kmol suvog vazduha, pa}$$

pošto su molekulske mase vlage (M_w) i suvog vazduha (M_{sv}) poznate:

$$M_w = 18,016, \text{ kg/kmol, } M_{sv} = 28,964, \text{ kg/kmol.}$$

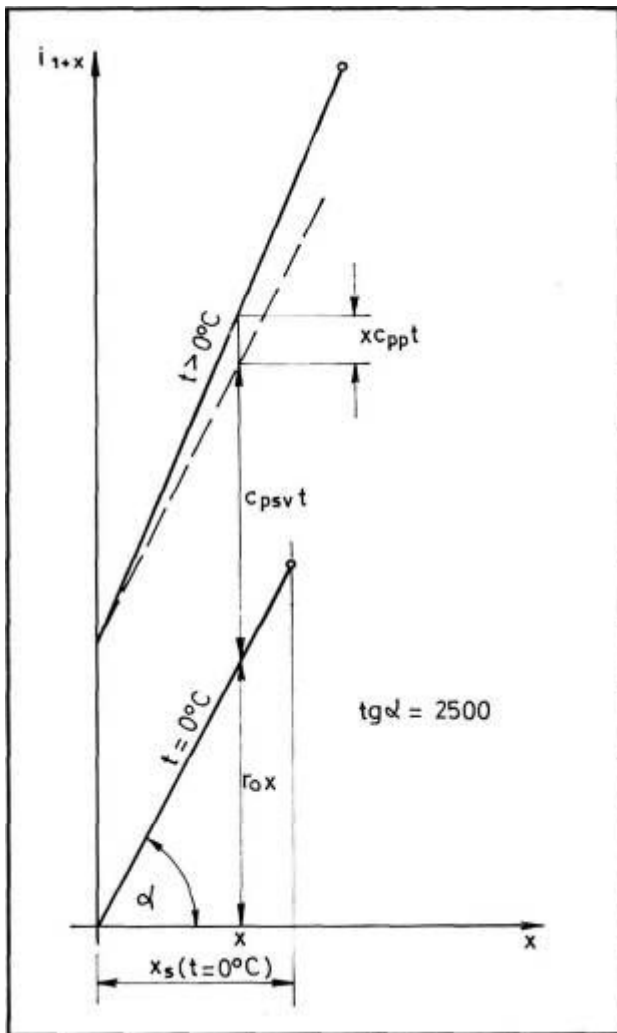
važiće odnosi:

$$\square = \frac{n_w}{n_{sv}} = \frac{m_w/M_w}{m_{sv}/M_{sv}} = 1,61x,$$

odnosno:

$$x = 0,622 \square.$$

Sl. 1.



Prirodna jedinica za količinu je 1 kg vlažnog vazduha. Pošto u mnogim procesima tehnike klimatizacije i sušenja dolazi do promene apsolutne vlažnosti vazduha, a količina suvog vazduha ostaje pri tome konstantna, često se za jedinicu količine vlažnog vazduha uzima 1 kg suvog vazduha pomešan sa x kg vlage. U $(1 + x)$ kg vlažnog vazduha nalazi se 1 kg suvog vazduha i x kg vlage, odnosno u 1 kg vlažnog vazduha nalazi se $1/(1 + x)$ kg suvog vazduha i $x/(1 + x)$ kg vlage. Prema tome, količina suvog vazduha može se uvek odrediti iz izraza:

$$m_{sv} = m_w / (1 + x).$$

Zapremina u kojoj se nalazi nezasićen vlažan vazduh pritiska $p = p_{sv} + p_p$ i temperature t , koji je sastavljen od 1 kg suvog vazduha pritiska p_{sv} i temperature t i x_p kg pregrejane vodene pare pritiska p_p i temperature t , obeležava se sa V_{1+x} pri čemu indeks »1 + x« ukazuje na način definisanja. Na sličan način mogu se definisati i ostale specifične veličine stanja: specifična entalpija i_{1+x} specifična entropija s_{1+x} itd. Ovako definisane veličine naročito su pogodno za grafičku analizu procesa sa vlažnim vazduhom.

Ukupna zapremina koju zauzima neka količina vlažnog vazduha biće $V = m_{sv} V_{1+x}$ a ako se traži ukupna promena neke veličine stanja, treba razliku specifičnih veličina stanja definisanih za $(1 + x)$ kg vlažnog vazduha množiti masom suvog vazduha, na primer

$$I_2 - I_1 = m_{sv}(i_{(1+x)2} - i_{(1+x)1})$$

Ukoliko je potrebno definisati specifičnu zapreminu nezasićenog vlažnog vazduha za 1 kg vlažnog vazduha, biće:

$$V_w = \frac{V}{m_w} = \frac{m_{sv} V_{1+x}}{m_{sv}(1+x)} = \frac{v_{1+x}}{1+x}, \quad \text{m}^3/\text{kg v. v.}$$

Tada je gustina ρ_w kg v. v./m³ nezasićenog vlažnog vazduha definisana izrazom:

$$\rho_w = \frac{1}{V_w} = \frac{1+x}{v_{1+x}} = \frac{m_{sv}(1+x)}{m_{sv} v_{1+x}} = \frac{m_{sv} + m_w}{V} = \rho_{sv} + \rho_p$$

Gasna konstanta nezasićenog vlažnog vazduha može se definisati samo za slučaj kada se apsolutna vlažnost (sastav) ne menja. Koristeći zakone smeše idealnih gasova biće:

$$R_w = g_{sv} R_{sv} + g_p R_p,$$

gde su g_{sv} i g_p maseni udeli suvog vazduha i vodene pare, a

$$R_{sv} = 287,1 \text{ J/(kgK)}, \quad R_p = 461,5 \text{ J/(kgK)},$$

gasne konstante suvog vazduha i pregrejane vodene pare. Za 1 kg vlažnog vazduha biće

$$g_{sv} = 1/(1+x), \quad g_p = x/(1+x),$$

pa je

$$R_w = \frac{1}{1+x} (R_{sv} + x R_p), \quad \text{J/(kg v.v.K).}$$

Kao što je to ranije naglašeno, na uobičajenim uslovima pritiska i temperature, odstupanje ponašanja pregrejane vodene pare u nezasićenom vlažnom vazduhu od ponašanja idealnog gasa je neznatno, što se može konstatovati iz tabele 1, gde je dat faktor $z = p_v/m_p R_p T$ za vodenu paru u stanju zasićenja, u zavisnosti od temperature (za idealni gas $z = 1$).

Sl.2

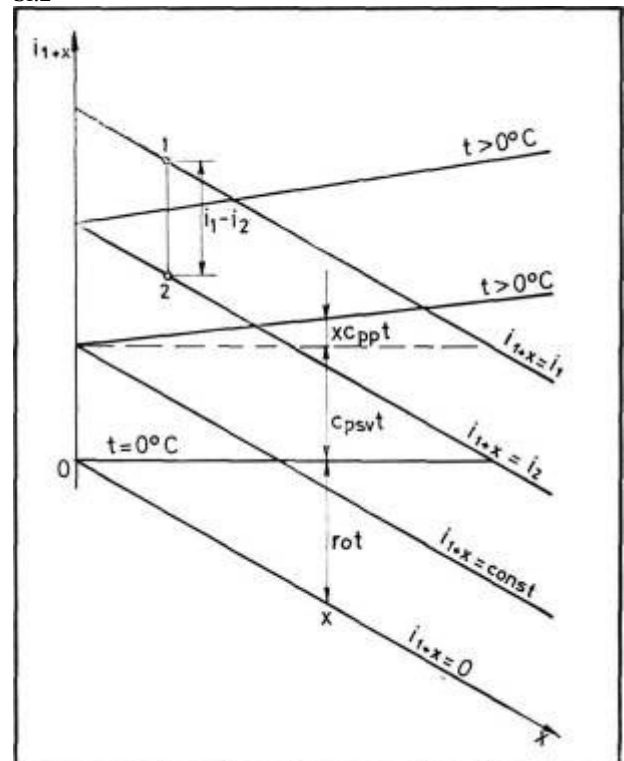


Tabela 1. Vrednost faktora z

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80
z	0,9995	0,9991	0,9976	0,9946	0,9905

U nezasićenom vlažnom vazduhu parcijalni pritisak vodene pare p_p (ili p_d) manji je od pritiska zasićenja $p_s = p_{ps} = p'_d$ (ili p'_d) za odgovarajuću temperaturu vlažnog vazduha, pa se vlaga u takvom vazduhu nalazi samo u obliku pregrejane vodene pare. Parcijalni pritisci pregrejane vodene pare i suvog vazduha mogu se na osnovu jednačine stanja idealnog gasa jednostavno sračunati:

$$p_p = m_p R_p T / V, \quad p_{sv} = m_{sv} R_{sv} T / V,$$

gde su T i V temperatura i zapremina vlažnog vazduha.

Apsolutna vlažnost nezasićenog vlažnog vazduha može se tada izraziti i preko parcijalnih pritisa vodene pare i suvog vazduha:

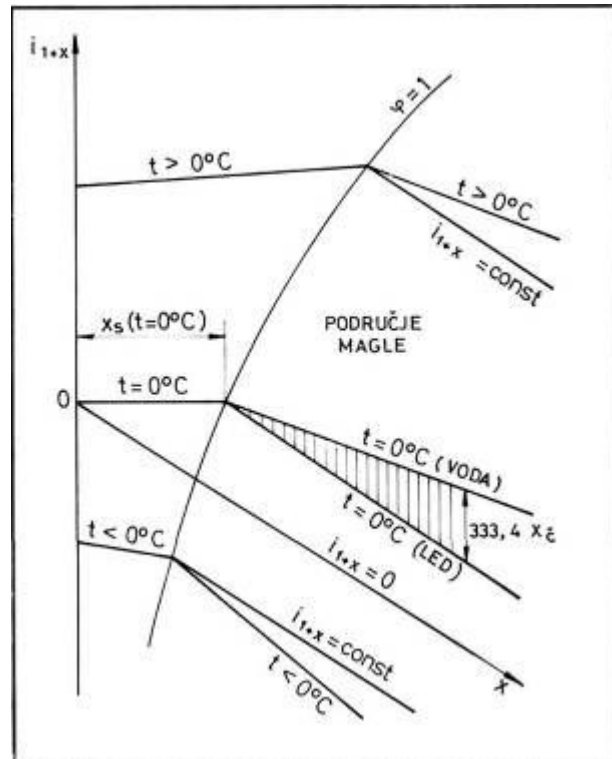
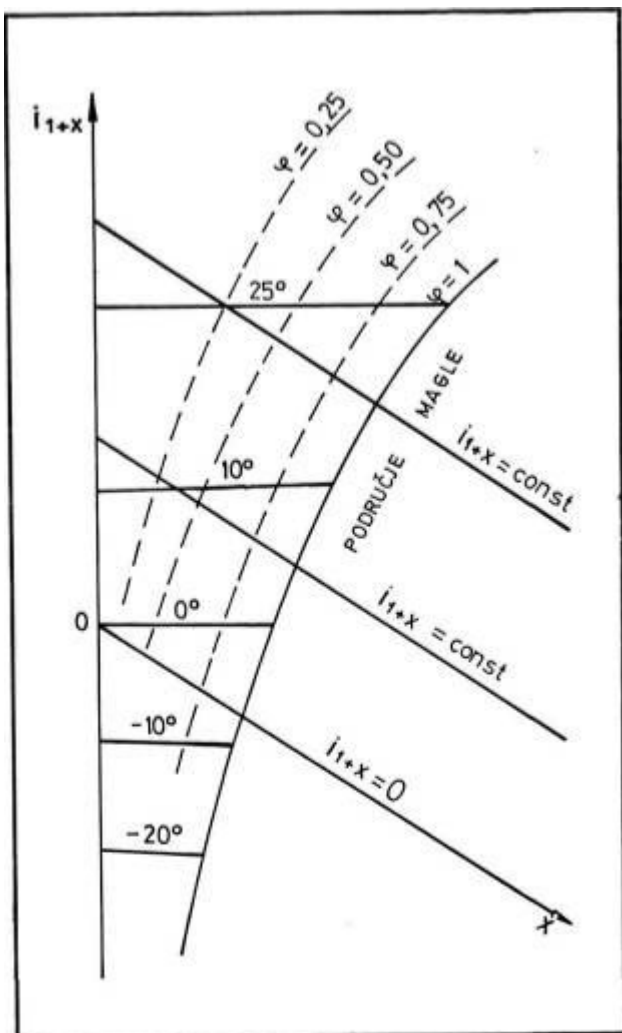
$$x_p = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{R_{sv} p_p}{R_p p_{sv}} = \frac{M_p p_p}{M_{sv} p_{sv}} = 0,622 \frac{p_p}{p_{sv}},$$

odnosno, ako se iskoristi izraz za ukupni pritisak vlažnog vazduha

$$P = p_{sv} + p_p,$$

biće

Sl. 3.



Sl. 4.

$$x_p = 0,622 \frac{p_p}{P - p_p} \quad \text{ili} \quad p_p = \frac{p x_p}{0,622 + x_p}$$

Ako parcijalni pritisak vodene pare p_p pri određenoj temperaturi dostigne za tu temperaturu pritisak zasićenja $p_s = p_{ps} = p'_p = p_{pmax}$, onda je vodena para u vlažnom vazduhu suvozasićena. U tom slučaju suvozasićeni vlažni vazduh (za tu temperaturu) sadrži maksimalno moguću količinu vlage u parnom stanju ($x_s = x'_p = x_{pmax}$):

$$x_s = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s} = x_s(t, p).$$

Sl. 5.

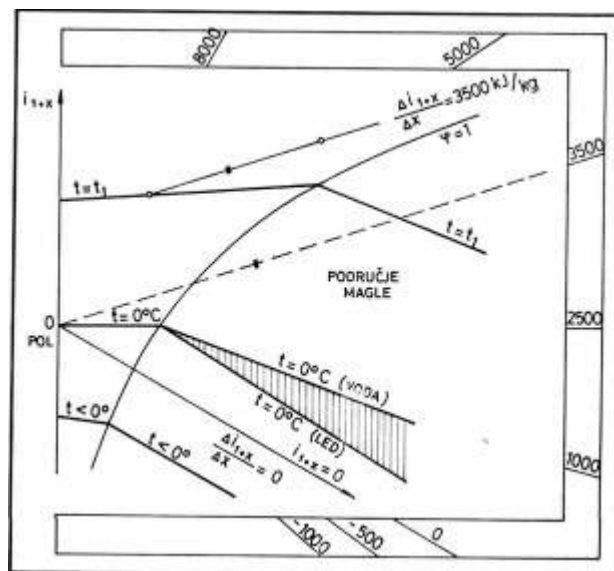


Tabela 2. Parcijalni pritisak vodene pare, apsolutna vlažnost i entalpija vlažnog vazduha na liniji zasićenja pri ukupnom pritisku $p = 1$ bar

t °C	$p_{ps} \cdot 10^3$ bar	x_s kg/kg s.v.	i_{1+x} kJ/kg s.v.	t °C	$p_{ps} \cdot 10^3$ bar	x_s kg/kg s.v.	i_{1+x} kJ/kg s.v.
-40	0,124	0,000077	-40,03	-5	4,010	0,002504	+1,21
-39	0,140	0,000087	-39,00	-4	4,368	0,002729	2,78
-38	0,159	0,000099	-37,97	-3	4,754	0,002971	4,40
-37	0,179	0,000111	-36,93	-2	5,172	0,003234	6,06
-36	0,200	0,000124	-35,90	-1	5,621	0,003516	7,78
-35	0,223	0,000139	-34,85	0	6,108	0,00382	9,56
-34	0,247	0,000154	-33,81	1	6,566	0,00411	11,29
-33	0,273	0,000170	-32,77	2	7,054	0,00441	13,08
-32	0,303	0,000189	-31,72	3	7,575	0,00474	14,91
-31	0,336	0,000209	-30,66	4	8,129	0,00509	15,81
-30	0,373	0,000232	-29,60	5	8,719	0,00547	18,76
-29	0,415	0,000258	-28,53	6	9,347	0,00586	20,77
-28	0,460	0,000286	-27,45	7	10,01	0,00629	22,85
-27	0,511	0,000318	-26,37	8	10,72	0,00674	25,00
-26	0,567	0,000353	-25,28	9	11,47	0,00721	27,22
-25	0,628	0,000391	-24,18	10	12,27	0,00772	29,52
-24	0,695	0,000432	-23,07	11	13,11	0,00826	31,90
-23	0,768	0,000478	-21,95	12	14,01	0,00884	34,37
-22	0,848	0,000527	-20,82	13	14,96	0,00945	36,93
-21	0,935	0,000582	-19,68	14	15,97	0,01009	39,59
-20	1,029	0,000644	-18,53	15	17,04	0,01078	42,3
-19	1,133	0,000705	-17,37	16	18,17	0,01151	45,2
-18	1,247	0,000777	-16,18	17	19,36	0,01228	48,2
-17	1,369	0,000853	-14,99	18	20,62	0,01310	51,3
-16	1,504	0,000937	-13,77	19	21,96	0,01397	54,5
-15	1,651	0,001029	-12,54	20	23,57	0,01488	57,8
-14	1,809	0,001127	-11,28	21	24,86	0,01585	61,3
-13	1,981	0,001235	-10,01	22	26,43	0,01688	65,0
-12	2,169	0,001352	-8,72	23	28,08	0,01797	68,8
-11	2,373	0,001479	-7,39	24	29,82	0,01912	72,8
-10	2,594	0,001618	-6,04	25	31,66	0,02034	76,9
-9	2,833	0,001767	-4,66	26	33,60	0,02163	81,2
-8	3,094	0,001930	-3,25	27	35,64	0,02299	85,8
-7	3,376	0,002107	-1,80	28	37,79	0,02442	90,5
-6	3,681	0,002298	-0,31	29	40,04	0,02594	95,4
30	42,41	0,02755	100,6	65	250,1	0,2074	609,3
31	44,91	0,02925	106,0	66	261,5	0,2202	644,2
32	47,53	0,03104	111,6	67	273,3	0,2339	681,7
33	50,29	0,03294	117,5	68	285,6	0,2487	721,8
34	53,18	0,03494	123,7	69	298,4	0,2645	764,9
35	56,22	0,0370	130,3	70	311,7	0,2815	811,3
36	59,40	0,0392	137,1	71	325,4	0,2999	860,7
37	62,74	0,0416	144,2	72	339,6	0,319	914,7
38	66,24	0,0441	151,7	73	354,3	0,341	972,7
39	69,91	0,0467	159,6	74	369,6	0,364	1036

Tabela 2 — nastavak

40	73,75	0,0495	167,8	75	385,5	0,390	1105
41	77,77	0,0524	176,4	76	401,9	0,417	1180
42	81,98	0,0555	185,5	77	418,9	0,448	1262
43	86,39	0,0588	195,1	78	436,5	0,481	1352
44	91,01	0,0622	205,1	79	454,7	0,518	1452
45	95,84	0,0659	215,6	80	473,6	0,559	1582
46	100,8	0,0697	226,7	81	493,1	0,605	1685
47	106,1	0,0738	238,4	82	513,3	0,655	1822
48	111,6	0,0781	250,7	83	534,2	0,713	1976
49	117,3	0,0827	263,7	84	555,8	0,778	2151
50	123,3	0,0875	277,5	85	578,1	0,852	2350
51	129,6	0,0926	291,7	86	601,1	0,937	2579
52	136,1	0,0980	306,9	87	624,9	1,036	2845
53	142,9	0,1037	322,9	88	649,5	1,152	3158
54	150,0	0,1097	339,9	89	674,9	1,291	3531
55	157,4	0,1161	357,8	90	701,1	1,458	3982
56	165,1	0,1229	376,8	91	728,1	1,665	4537
57	173,1	0,1302	396,8	92	756,0	1,927	5240
58	181,4	0,1378	418,1	93	784,8	2,268	6156
59	190,1	0,1460	440,6	94	814,5	2,731	7399
60	199,1	0,1547	464,6	95	845,1	3,39	9178
61	208,6	0,1639	490,0	96	876,7	4,42	11942
62	218,4	0,1738	517,0	97	909,3	6,23	16811
63	228,5	0,1843	545,8	98	942,9	10,27	27600
64	239,1	0,1954	576,5	99	977,5	198,2	72631
				100	1013,1		

Gustine nezasićenog vlažnog vazduha i suvozasićenog vlažnog vazduha mogu se odrediti ako se iskoristi jednačina stanja idealnog gasa

$$p = (m_{sv} R_{sv} + m_p R_p) (T/V),$$

i definicija gustine

$$\rho_{vv} = \frac{m_{sv} + m_p}{V} = P_{sv} + P_p,$$

pa je

$$\rho_{vv} = \frac{1 + x_p}{R_{sv} + x_p R_p} \cdot \frac{p}{T} = \frac{p}{R_{sv} T} - \left(\frac{1}{R_{sv}} - \frac{1}{R_p} \right) \frac{p_p}{T},$$

Pošto je $R_p > R_{sv}$, nezasićeni vlažni vazduh ima uvek manju gustinu nego suvi vazduh na istoj temperaturi i istom pritisku.

Koristeći vrednosti gasnih konstanti za suvi vazduh i vodenu paru, dobija se

$$\rho_{vv} = 348,3 \frac{P}{T} - 0,1316 \frac{P_p}{T},$$

a za gustinu pregrejane vodene pare, koja se nalazi u nezasićenom vlažnom vazduhu

$$p_p = \frac{m_p}{V} = \frac{P_p}{R_p T} = 0,2167 \frac{P_p}{T},$$

odnosno, za suvozasićeni vlažni vazduh

$$p_s = 348,3 \frac{P}{T} - 0,1316 \frac{P_s}{T},$$

i za suvozasićeni vodenu paru, koja se nalazi u suvozasićenom vlažnom vazduhu

$$P_{ps} = 0,2167 \frac{P_s}{T}$$

pri čemu se mora voditi računa da se u gornje izraze p_p i p_s moraju uvrstiti u mbar.

U tabelama 2. i 3. date su neke termodinamičke veličine vlažnog vazduha na liniji zasićenja.

U nezasićenom vlažnom vazduhu udeo vodene pare može se izraziti i relativnom vlažnošću, što se veoma često koristi u tehnici i meteorologiji. Za mnoge procese sa vlažnim vazduhom od većeg je značaja poznavanje relativne vlažnosti nego vrednosti apsolutne vlažnosti, pošto se u odnosu na stanje zasićenja relativnom vlažnošću očiglednije definiše stanje nezasićenog vlažnog vazduha. Relativna vlažnost posmatranog vlažnog vazduha (ϕ) definišana je izrazom

Tabela 3. Koncentracija vlage, specifična zapremina, specifična toplota pri konstantnom pritisku, koeficijent kinematičkog viskoziteta, koeficijent toplotne provodljivosti vlažnog vazduha na liniji zasićenja pri ukupnom pritisku $p = 1 \text{ atm}$

t °C	Koncentracija vlage kg/m ³	v_{1+z} m ³ /kg s. v.	$v \cdot 10^6$ m ² /s	c_p kJ/(kg·K)	λ W/(m·K)
0	0,004846	0,7781	13,25	1,0108	0,02380
2	0,005557	0,7845	13,43	1,0120	0,02413
4	0,006358	0,7911	13,61	1,0134	0,02427
6	0,007257	0,7977	13,79	1,0149	0,02440
8	0,008267	0,8046	13,97	1,0167	0,02454
10	0,009396	0,8116	14,15	1,0186	0,02466
12	0,01066	0,8187	14,34	1,0208	0,02478
14	0,01206	0,8261	14,52	1,0233	0,02490
16	0,01363	0,8337	14,71	1,0260	0,02500
18	0,01536	0,8415	14,89	1,0291	0,02511
20	0,01729	0,8497	15,08	1,0325	0,02520
22	0,01942	0,8511	15,27	1,0364	0,02529
24	0,02177	0,8669	15,46	1,0407	0,02537
26	0,02437	0,8761	15,65	1,0455	0,02544
28	0,02723	0,8857	15,84	1,0509	0,02508
30	0,03036	0,8958	16,03	1,0569	0,02556
32	0,03380	0,9065	16,22	1,0635	0,02561
34	0,03753	0,9178	16,41	1,0710	0,02565
36	0,04171	0,9297	16,61	1,0793	0,02567
38	0,04622	0,9425	16,80	1,0885	0,02569
40	0,05114	0,9560	17,00	1,0989	0,02569
42	0,05650	0,9706	17,20	1,1103	0,02568
44	0,06233	0,9862	17,39	1,1232	0,02666
46	0,06867	1,0030	16,59	1,1375	0,02563
48	0,07553	1,0213	17,79	1,1534	0,02558
50	0,08298	1,0410	17,99	1,1713	0,02552
52	0,09103	1,0626	18,19	1,1913	0,02545
54	0,09974	1,0861	18,39	1,2137	0,02536
56	0,1091	1,1112	18,59	1,2389	0,02526
58	0,1193	1,1405	18,79	1,2673	0,02514
60	0,1302	1,1721	18,99	1,2994	0,02501
62	0,1419	1,2073	19,19	1,3357	0,02487
64	0,1545	1,2467	19,38	1,3770	0,02471
66	0,1680	1,2910	19,57	1,4241	0,02455
68	0,1826	1,3412	19,76	1,4782	0,02437
70	0,1981	1,3986	19,94	1,5418	0,02418
72	0,2146	1,4643	20,01	1,6132	0,02399
74	0,2324	1,5411	20,28	1,6986	0,02379
76	0,2514	1,6309	20,44	1,7994	0,02360
78	0,2717	1,7375	20,58	1,9199	0,02341
80	0,2933	1,8663	20,71	1,0664	0,02323
82	0,3162	2,0247	20,81	2,2477	0,02307
84	0,3406	2,2238	20,90	2,4767	0,02294
86	0,3666	2,4819	20,96	2,7739	0,02285
88	0,3942	2,8235	20,99	3,1708	0,02281
90	0,4235	3,3047	21,99	3,7304	0,02283
92	0,4545	4,029	20,94	4,574	0,02295
94	0,4873	5,238	20,84	5,987	0,02318
96	0,5221	7,662	20,69	8,820	0,02355
98	0,5588	14,939	20,47	17,338	0,02409
100	0,5977	∞	20,03	∞	0,02486

$$\varphi = \frac{p_p}{p_s}$$

gde su

p_p — parcijalni pritisak vodene pare u posmatranom vlažnom vazduhu,

p_s — parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu iste temperature.

Relativna vlažnost vazduha često se izražava i u procentima. Sem toga, očigledno je da se relativna vlažnost može sračunati i preko gustine vodene pare u posmatranom nezasićenom vlažnom vazduhu i gustine u zasićenom vlažnom vazduhu iste temperature:

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_s}$$

Prilikom hlađenja nezasićenog vlažnog vazduha apsolutna vlažnost x_p i parcijalni pritisak vodene pare p_p ostaju konstantni sve dok se ne dostigne temperatura koja odgovara temperaturi tačke rose (stanje zasićenja). Parcijalni pritisak vodene pare u dostignutoj tački rose odgovara pritisku zasićenja za temperaturu tačke rose t_R , pa se relativna vlažnost vazduha može izraziti i na sledeći način:

$$\varphi = p_s(t_R) / p_s(t)$$

Veza apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha i relativne vlažnosti je očigledna:

$$x_p = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

odnosno

$$\varphi = \frac{x_p p}{(0,622 + x_p) p_s}$$

Pored relativne vlažnosti, za definisanje udela vodene pare u nezasićenom vlažnom vazduhu, često se koristi i stepen zasićenja ψ , koji je definisan odnosom apsolutne vlažnosti u parnom stanju u vlažnom vazduhu (x_p) i apsolutne vlažnosti u parnom stanju u zasićenom vlažnom vazduhu (x_s) iste temperature:

$$\psi = \frac{x_p}{x_s} = \varphi \frac{p - p_s}{p - \varphi p_s}$$

Na nažim temperaturama ($\varphi < < p$) brojne vrednosti relativne vlažnosti i stepena zasićenja neznatno se razlikuju.

Za sračunavanje specifične entalpije vlažnog vazduha moraju se prethodno poznavati metode za sračunavanje entalpija pojedinih komponenata (suvi vazduh, vodena para, voda, led).

Suvi vazduh može se smatrati idealnim gasom i pošto se usvoji da je za $t = 0^\circ\text{C}$ vrednost $i_{sv} = 0$, dobija se za entalpiju suvog vazduha izraz:

$$i_{sv} = c_{psv} \int_0^t t, \text{ kJ/kg},$$

gde je

$$c_{psv} \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}, \text{ — srednja vrednost specifične}$$

toplote suvog vazduha pri konstantnom pritisku ($p = 1$ bar) u intervalu temperatura $0 \text{ — } t, ^\circ\text{C}$.

Tabela 4. Srednje vrednosti specifične toplote pri konstantnom pritisku ($p = 1$ bar) za suvi vazduh

$t, ^\circ\text{C}$,	—50	0	50	100	150
$c_{psv} \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}$	1,0055	1,0056	1,0064	1,0078	1,0099

Za uobičajeni interval temperatura ($-50^\circ\text{C} < t < 50^\circ\text{C}$) može se usvojiti konstantna vrednost

$$c_{psv} = 1,006, \text{ kJ/(kgK)},$$

odnosno

$$i_{sv} = c_{psv} t = 1,006t, \text{ kJ/kg}.$$

Za entalpiju pregrejane vodene pare važi:

$$i_p = r_o + c_{pp} \int_0^t t, \text{ kJ/kg},$$

gde su

$r_o = 2500$, kJ/kg, — toplota faze (isparavanja) vodene pare na temperaturi 0°C ,

$$c_{pp} \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}, \text{ — srednja vrednost specifične toplote}$$

wodene pare pri konstantnom pritisku ($p = 0$) u intervalu temperatura $0 \text{ — } t, ^\circ\text{C}$.

Tabela 5. Srednje vrednosti specifične toplote pri konstantnom pritisku ($p = 0$) za vodenu paru

$t, ^\circ\text{C}$,	—50	0	50	100	150
$c_{pp} \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}$,	1,855	1,858	1,864	1,872	1,881

Zauobičajeni interval temperatura ($-50^\circ\text{C} < t < 50^\circ\text{C}$) može se usvojiti konstantna vrednost

$$c_{pp} = 1,86, \text{ kJ/(kgK)},$$

odnosno

$$i_p = r_o + C_{pp} t = 2500 + 1,86t, \text{ kJ/kg}.$$

Za entalpiju vode važi:

$$i_t = c_t \int_0^t t, \text{ kJ/kg},$$

gde je

$$c_t \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}, \text{ — srednja vrednost specifične toplote vode}$$

u intervalu temperatura $0 \text{ — } t, ^\circ\text{C}$.

Tabela 6. Srednje vrednosti specifične toplote vode

$t, ^\circ\text{C}$,	0	20	40	60	80
$c_t \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}$,	4,218	4,195	4,187	4,185	4,186

Prema tome i za specifičnu toplotu vode može se usvojiti konstantna vrednost

$$c_t = 4,19, \text{ kJ/(kgK)},$$

odnosno

$$i_t = c_t t = 4,19t, \text{ kJ/kg}.$$

Za entalpiju leda važi:

$$i_\xi = r_\xi + c_\xi \int_0^t t, \text{ kJ/kg},$$

gde su

$r_\xi = -333,4$, kJ/kg, — toplota faze (topljenja) leda na 0°C ,

$c_\xi \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}$, — srednja vrednost specifične toplote leda u intervalu temperatura $0 \text{ — } t, ^\circ\text{C}$.

Tabela 7. Srednje vrednosti specifične toplote leda

$t, ^\circ\text{C}$,	—50	—40	—30	—20	—10	0
$c_\xi \int_0^t, \text{ kJ/(kgK)}$	1,924	1,961	1,997	2,034	2,071	2,108

Prema tome i za specifičnu toplotu leda može se usvojiti konstantna vrednost

$$C_{\text{e}} = 2,05, \text{ kJ/(kgK)},$$

cdnosno

$$i_{\text{e}} = r_{\text{e}} + c_{\text{e}} t = -333,4 + 2,05t, \text{ kJ/kg}.$$

Specifična entalpija vlažnog vazduha može se sada jednostavno odrediti kao zbir proizvoda količina komponenata i specifičnih entalpija pojedinih komponenata.

Entalpija $(1+x)$ kilograma nezasićenog vlažnog vazduha, kada se vlaga nalazi samo u parnom stanju (homogena mešavina suvog vazduha i pregrejane vodene pare), biće:

$$i_{1+x} = 1 \cdot i_{\text{sv}} + X_p i_p,$$

$$i_{1+x} = C_{\text{psv}}t + X_p(C_{\text{pp}}t + r_o),$$

$$i_{1+x} = 1,006t + X_p(1,86t + 2500), \text{ kJ/(1+x) kg v.v.}$$

Entalpija $(1+x)$ kilograma suvazasićenog vlažnog vazduha, kada se vlaga nalazi samo u parnom stanju (homogena mešavina suvog vazduha i suvazasićene vodene pare), biće:

$$i_{1+x} = C_{\text{psv}}t + X_s(C_{\text{pp}}t + r_o),$$

$$i_{1+x} = 1,006t + x_s(1,86t + 2500), \text{ kJ/(1+x) kg v.v.}$$

Entalpija $(1+x)$ kilograma zamagljenog vlažnog vazduha, kada se vlaga nalazi u parnom i tečnom stanju (heterogena mešavina suvog vazduha, suvazasićene vodene pare i kapljica vode), biće:

$$i_{1+x} = C_{\text{psv}}t + x_s(C_{\text{pp}}t + r_o) + x_t i_t$$

$$i_{1+x} = 1,006t + x_s(1,86t + 2500) + x_t 4,19t, \text{ kJ/(1+x) kg v.v.}$$

Entalpija $(1+x)$ kilograma ledeno-zamagljenog vlažnog vazduha, kada se vlaga nalazi u parnom, tečnom i čvrstom stanju (heterogena mešavina suvog vazduha, suvazasićene vodene pare, kapljica vode i čestica leda), biće:

$$i_{1+x} = C_{\text{psv}}t + x_s(C_{\text{pp}}t + r_o) + x_t i_t + x(C_{\text{e}}t + r_{\text{e}}).$$

$$i_{1+x} = 1,006t + X_s(1,86t + 2500) + x_t 4,19t +$$

$$+ x_{\text{e}}(2,05t - 333,4), \text{ kJ/(1+x) kg v.v.}$$

Prema ranije prikazanom načinu definisanja specifičnih veličina stanja, specifične entalpije i_{1+x} vlažnog vazduha mogu se izraziti i u dimenzijama, kJ/kg s.v.

3. Dijagram $i-x$ za vlažan vazduh

Poslednja jednačina u prethodnom poglavlju predstavlja u suštini jednačinu stanja vlažnog vazduha. Pošto je vlažan vazduh mešavina dve komponente (suvi vazduh i vlaga), potrebno je paznavati tri veličine stanja da bi toplotno stanje vlažnog vazduha bilo potpuno određeno. Da bi se jednačina stanja vlažnog vazduha mogla predstaviti u ravanskom dijagramu, mora se jedna veličina stanja usvojiti konstantnom. Za konstantoi pritisak (obično $p = 1 \text{ bar} = \text{const.}$) najčešće je u upotrebi Mollierov $i-x$ dijagram stanja vlažnog vazduha. U tom dijagramu na ordinatu se nanose vrednosti specifične entalpije i_{1+x} vlažnog vazduha, a na apscisu vrednosti apsolutne vlažnosti x . Pošto je ovaj dijagram konstruisan za konstantan pritisak (obično $p = 1 \text{ bar} = \text{const.}$), moguće je u njemu vršiti grafičku analizu izobarskih procesa (ukupni pritisak vlažnog vazduha ostaje nepromenjen), kao i određivanje toplotnih bilansa tih procesa, jer se razlika specifičnih entalpija pojedinih stanja može jednostavno očitati.

Ako vlažan vazduh sadrži samo pregrejanu vodenu paru, biće:

$$i_{1+x} = C_{\text{psv}}t + x_p(C_{\text{pp}}t + r_o),$$

pa su izoterme ($t = \text{const.}$) u nezasićenom području prave linije, koje seku ordinatnu osu ($x = 0$) na odstojanju

$$i_{(x=0)} = C_{\text{psv}}t = 1,006t$$

od koordinatnog početka, a njihov nagib iznosi:

$$\left(\frac{\partial i_{1+x}}{\partial x_t}\right)_{t=\text{const.}} = c_{\text{pp}}t + r_o = 1,86t + 2500 = i_p(t).$$

Izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ polazi, dakle, iz koordinatnog početka i ima nagib

$$\left(\frac{\partial i_{1+x}}{\partial x_t}\right)_{t=0} = r_o = 2500$$

dok sve izoterme za $t > 0^\circ\text{C}$ imaju nešto veći nagib (za vrednost člana 1,86 t).

Usled velike vrednosti toplote faze (isparavanja) vodene pare, koja definiše nagib, izoterme vlažnog vazduha u nezasićenom području veoma su strme (sl. 1).

Pošto je područje nezasićenog vlažnog vazduha, koje se praktiono najčešće koristi, na ovaj način veoma suženo, za grafičku analizu pojedinih izobarskih procesa u dijagramu stanja za vlažan vazduh, danas se koristi skoro isključivo kosougli Mollierov $i-x$ dijagram. Koordinatna x -osa zaokrenuta je udesno i naniže, tako da je izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ nezasićenog vlažnog vazduha upravna na ordinatu (horizontalna). Izentalpa $i_{1+x} = 0$ (suvi vazduh i voda na 0°C) nagnuta je udesno i naniže za ugao čiji je tangens -2500 . Sve izentalpe ostaju i dalje paralelne međusobno i paralelne sa x -osom, linije konstantne apsolutne vlažnosti ostaju vertikalne, a razlike entalpija za pojedina stanja mogu se očitavati kao odsecci po vertikalni (sl. 2).

Konstrukcija izoterme vlažnog vazduha u nezasićenom području očigledna je prema skici na sl. 2.

Ove izotarme nezasićenog područja protežu se samo do vrednosti apsolutne vlažnosti $x = x_s(t)$, pošto iskorišćena jednačina važi samo za oblast u kojoj se vlaga nalazi samo u parnom stanju ($x < x_s$). Krajnje tačke izoterme nezasićenog područja, za određeni ukupni pritisak, leže na liniji rose (liniji zasićenja, graničnoj krivoj), koja odgovara vrednostima relativne vlažnosti $\phi = 1$ i razdvaja oblast nezasićenog vlažnog vazduha od područja magle (sl. 3). Izoterma ključanja vode za ukupni pritisak $i-x$ dijagrama seče graničnu krivu u beskonačnosti za $x=x_s=\infty$, pa je ona asimptota linije zasićenja. Za ukupni pritisak $p = 1 \text{ bar}$ asimptota linije zasićenja je izoterma $t = 99,64^\circ\text{C}$. Prema definiciji relativne vlažnosti mogu se konstruisati (tačka po tačka) i ostale linije konstantne relativne vlažnosti ($\phi = \text{const.}$). Linija $\phi = 0$ poklapa se sa ordinatnom osom ($x = 0$) i na njoj leže sva stanja suvog vazduha.

Ukoliko vlažan vazduh sem vodene pare sadrži vodu ili led ($x > x_s$), stanje takvog vlažnog vazduha nalazi se u $i-x$ dijagramu desno od linije zasićenja u području magle. Izoterme vlažnog vazduha u području magle takođe su prave linije, na liniji zasićenja spajaju se sa izotermama nezasićenog područja, ali imaju drugi nagib, koji iznosi:

$$\left(\frac{\partial i_{1+x}}{\partial x}\right)_t = c_t = i_t(t) = 4,19t, \text{ za } t \geq 0^\circ\text{C},$$

odnosno

$$\left(\frac{\partial i_{1+x}}{\partial x}\right)_t = r_{\text{e}} + c_{\text{e}}t = i_{\text{e}}(t) = -333,4 + 2,05t, \text{ za } t \leq 0^\circ\text{C}$$

Izoterme područja magle za $t > 0^\circ\text{C}$ imaju nešto veći nagib od izentalpi, pa su u kosougloj dijagramu položnije od izentalpi, dak su izoterme područja leda (ledene magle), za $t < 0^\circ\text{C}$, u istom dijagramu strmije od izentalpi (sl. 4).

Za $t = 0^{\circ}\text{C}$ postoje u području magle dve izoterme, od kojih jedna odgovara mokroj magli, a druga ledenoj magli. Površina u obliku klina, koju ograničavaju ove dve izoterme (sl. 4), definiše trofazno područje (izotermnu površinu) mešavine mokre i ledene magle. Neka tačka u tom području definiše stanje vlažnog vazduha u kome se nalaze u ravnoteži suvi vazduh, suvozasićena vodena para, voda i led na temperaturi od 0°C . Pošto se količina suvozasićene vodene pare ($x_{s(t=0^{\circ}\text{C})}$) može direktno pročitati u i-x dijagramu, količine vode (x_v) i leda (x_l) određuju se jednostavno korišćenjem pravila mešanja (zakona poluge).

Prilikom analize i proračuna mnogih izobarskih procesa sa vlažnim vazduhom potrebno je u i-x dijagramu grafički odrediti pravac promene (nagib):

$$\frac{\Delta i_{1+x}}{\Delta x} = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1}$$

Za određivanje ovog pravca koristi se unapred ucrtana skala na okviru i-x dijagrama (sl. 5). Kao pol za povlačenje pravca koristi se obično koordinatni početak dijagrama, tj. tačka sa koordinatama $i_{1+x} = 0$ i $x = 0$.

Iako je i-x dijagram konstruisan za neki određen pritisak (obično $p = 1 \text{ bar} = \text{const.}$), može se koristiti i za očitavanje nekih vrednosti pri nekom drugom ukupnom pritisku (p_1) vlažnog vazduha. Pošto entalpije idealnih gasova ne zavise od pritiska, prilikom promene ukupnog pritiska vlažnog vazduha izoterme nezasićenog područja ostaju nepromenjene. Međutim, menjaju se linije konstantne relativne vlažnosti, pa takođe i linija rošenja ($\phi = 1$). Prilikom promene ukupnog pritiska od p a na p_1 važiće odnos

$$\phi_1/\phi = p_1/p.$$

pa pročitana vrednost ϕ iz i-x dijagrama, koji je konstruisan za pritisak p , mora se pomnožiti odnosom p_1/p da bi se dobila vrednost realtivne vlažnosti ϕ , za ukupni pritisak p_1 . Pošto se prilikom promene ukupnog pritiska vlažnog vazduha menja položaj linije rošenja, a nagibi izoterma područja magle su nezavisni od pritiska, pomeraju se tada i izoterme područja magle, ali uvek paralelno sa svojim prvobitnim položajem.

Dijagram i-x za vlažan vazduh može se naći u mnogim knjigama i priručnicima, a kao posebni prilog štampan je i u časopisu »KGH« br. 1/77.

Sem Mollierovog i-x dijagrama za vlažan vazduh, postoje i razni drugi dijagrami i nomogrami, koji omogućavaju preglednu grafičku analizu pojedinih promena stanja. Opis jednog takvog nomograma, sa potrebnim uputstvima, objavljen je u časopisu »KGH« br. 2/74.

(Nastavak u idućem broju)