

Prilog određivanju vlažnosti vazduha psihrometrom

I. Demirdžić, P. Kaluđerčić *

UVOD

Vlažnost vazduha je jedan od atributa čovjekove okoline koji ima bitan uticaj na tu okolinu: na klimu, na biljni i životinjski svijet, na poljoprivredne i industrijske proizvode itd. Od specijalnog je interesa uticaj vlažnosti vazduha na osjećaj ugodnosti čovjeka. Rečenica: »To nije temperatura, to je vlažnost!« klasičan je izraz čovjekove spoznaje vlažnosti kao važnog faktora koji utiče na njegovu termičku ugodnost. [5], [9]

Zbog svog velikog značaja, mjerenje i regulacija vlažnosti našli su primjenu u različitim oblastima nauke i tehnike: u biologiji i medicini, poljoprivredi, regulaciji tehnoloških procesa, a specijalno u meteorologiji (čije podatke koristi hidrologija, okeanografija, avijacija, radiotehnika itd.) i u kondicioniranju vazduha u cilju klimatizacije prostorija u kojima žive i rade ljudi [9].

MJERENJE VLAŽNOSTI VAZDUHA

Stanje vlažnog vazduha određeno je pritiskom, temperaturom i vlažnošću, koja se najčešće definiše relativnom vlažnošću ili parcijalnim pritiskom vodene pare u vazduhu. Dok su metode i instrumenti za mjerenje pritiska i temperature danas dostigle visok nivo, prilikom mjerenja vlažnosti, a naročito prilikom mjerenja u regulacione svrhe još uvijek se nailazi na poteškoće, tako da transmitter vlažnosti spada u nepouzdanije elemente u tehničkoj praksi.

Za mjerenje vlažnosti danas se koriste instrumenti bazirani na različitim fizičkim zakonima i osobinama nekih organskih materija [3], [8]:

— higrometri koji koriste promjenu fizičke forme (najčešće dužine) nekih organskih materija (higrometar s dlakom),

— higrometri na bazi rošenja hladne površine (na primjer Lambrechtov kondenzacioni higrometar),

— higrometri na bazi snižavanja temperature mokre površine usljed ishlapljivanja (na primjer Augustov ili Assmanov psihrometar),

— higrometri na bazi promjene električne vodljivosti s promjenom vlažnosti (električni higrometri),

— higrometri na bazi adsorpcionih i apsorpcionih osobina različitih materijala (spektroskopski higrometri) itd.

Primjena pojave snižavanja temperature mokre površine usljed ishlapljivanja za mjerenje vlažnosti vazduha spominje se prvi put u 18. vijeku i postepeno dovodi do dobro poznatog psihrometra, koji je, čak i danas, najpraktičniji i najšire primjenjivan instrument za mjerenje vlažnosti vazduha. Postoje različiti oblici psihrometra, ali se svi oni u suštini sastoje od mjeraca temperature pokrivenog mokrom navlakom (mokri termometar) i sličnog mjeraca temperature bez mokre navlake (suhi termometar). U principu se preporučuje da se oba termometra ventiliraju i što je moguće bolje zaštite od uticaja radijacije iz okoline (slika 1).

Zajednička komisija za psihrometerske podatke i Svjetska meteorološka organizacija (The Joint Committee on Psychrometric Data and the World Meteorological Organization) preporučuju da se temperatura vlažnog termometra definiše kao rješenje $t_w(P_0, t_s, x)$ jednačine:

$$i[P_0, t_w, x'(P_0, t_w)] = i(P_0, t_s, x) + [x'(P_0, t_w) - x] i_w(P_0, t_w) \quad (1)$$

gdje je:

$i[P_0, t_w, x'(P_0, t_w)]$	— entalpija zasićenog vazduha pritiska P_0 i temperature t_w
$i(P_0, t_s, x)$	— entalpija vlažnog vazduha pritiska P_0 temperature t_s i sadržaja vlage x ,
$i_w(P_0, t_w)$	— entalpija vode pritiska P_0 i temperature t_w ,
$x'(P_0, t_w)$	— sadržaj vlage zasićenog vazduha pritiska P_0 i temperature t_w .

Ova definicija pretpostavlja proces ubrizgavanja vode pritiska P_0 i temperature t_w u struju vlažnog vazduha pritiska P_0 , temperature t_s i sadržaja vlage x dok se ne postigne adijabatsko zasićenje na pritisku P_0 i temperaturi t_w .

Pojednostavljenje ove jednačine uz pretpostavku da se vlažan vazduh ponaša kao idealan

* Ismet Demirdžić, dipl. maš. ing., prof. mat., saradnik *Energoinvesta* — ITEN-a, Sarajevo i asistent Mašinskog fakulteta u Sarajevu; prof. dr Pavle Kaluđerčić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Sarajevo, saradnik Instituta za fiziku, Sarajevo

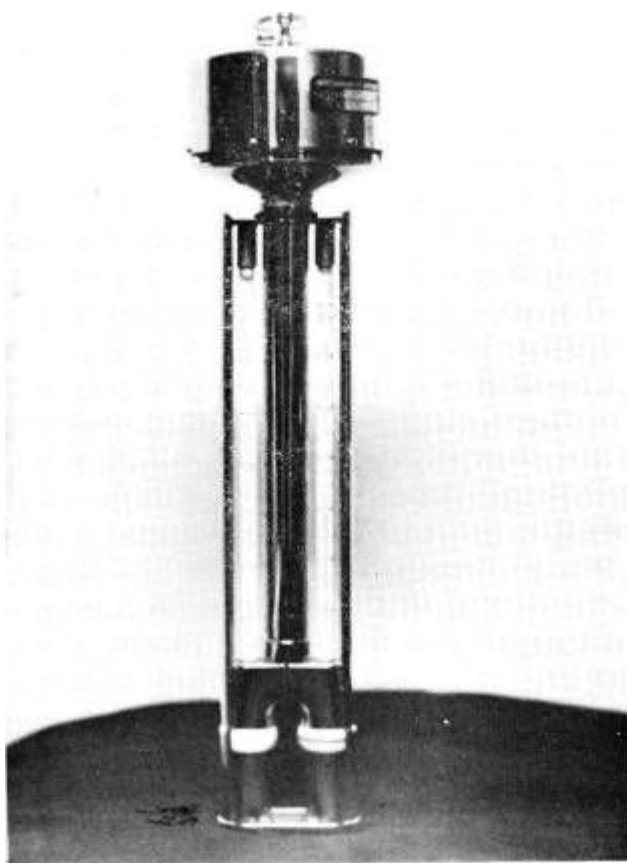
gas i uz zanemarivanje nekih sekundarnih efekata dovodi do tzv. psihrometerske jednačine [1], [3], [4], [10], [11]:

$$P = P'(t_w) - P_o A(t_s - t_w) \quad (2)$$

gdje je:

P — parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu,

Sl. 1. Psihrometar



$P'(t_w)$ — parcijalni pritisak zasićene vodene pare u vazduhu pri temperaturi t_{Av} ,

P_o — barometarski pritisak,

A — psihrometerska konstanta.

Vrijednosti parcijalnog pritiska zasićene vodene pare $P'(t_w)$ uzimaju se iz tablica za zasićenu vodenu paru (na primjer [6]), dok vrijednost psihrometerske konstante zavisi od konstrukcije psihrometra i kreće se oko $A = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ za vodu, odnosno $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ za led na navlaci mokrog termometra [1].

Na osnovu psihrometerske jednačine izrađene su različite psihrometerske tablice [1] koje, pored parcijalnog pritiska vodene pare, daju i relativnu vlažnost vazduha u zavisnosti od temperatura suhog t_s i vlažnog t_w termometra (ili u zavisnosti od temperature vlažnog termometra t_w i

psihrometerske razlike $t_s - t_w$) i barometarskog pritiska P_o , [11], [3]. Pored psihrometerskih tablica u upotrebi su i psihrometerski dijagrami, nomogrami i pomični nomogrami konstruisani na osnovu psihrometerske jednačine [1].

Razloge najčešćoj upotrebi psihrometra za mjerenje vlažnosti treba tražiti prije svega u relativno niskoj cijeni instrumenta, jednostavnom rukovanju i održavanju, nezavisnosti za bilo kakav izvor energije i zadovoljavajućoj tačnosti. Osnovni nedostaci psihrometra su komplikovana automatizacija i telemetrija, otežana upotreba i smanjena tačnost kod temperatura bliskih 0°C , zavisnost rezultata mjerenja od barometarskog pritiska i neophodnost preračunavanja očitanih podataka u željeni pokazatelj vlažnosti vazduha, uz upotrebu tablica za vodenu paru.

Ovaj posljednji nedostatak umanjen je donekle izradom psihrometerskih tablica, dijagrama i nomograma. Međutim, tačnost očitavanja relativne vlažnosti i parcijalnog pritiska vodene pare pomoću psihrometerskih dijagrama i nomograma ograničena je dimenzijama tih pomagala. S druge strane, psihrometerske tablice omogućuju postizanje željene tačnosti, ali su glomazne, nepregledne i nepraktične, a zahtijevaju i dodatne proračune korekcije na barometarski pritisak.

Ovaj nedostatak naročito dolazi do izražaja u slučaju kompjuterizacije proračuna koji uključuju podatke mjerenja vlažnosti pomoću psihrometra. U takvim slučajevima trebalo bi podatke iz tablica ubaciti u memoriju računara. Međutim, to zauzima mnogo prostora u memoriji, a pored toga zahtijeva interpolaciju između diskretnih vrijednosti datih u tablicama.

ODREĐIVANJE VLAŽNOSTI VAZDUHA POMOĆU PSIHROMETRA BEZ UPOTREBE PSIHROMETERSKIH TABLICA I DIJAGRAMA

Da bi se izbjegla upotreba tablica i dijagrama prilikom određivanja vlažnosti vazduha pomoću psihrometra, neophodno je izvesti analitičke izraze koji daju zavisnost relativne vlažnosti i parcijalnog pritiska vodene pare samo od barometarskog (pritiska i temperatura vlažnog i suhog termometra. Prilikom izvođenja tih analitičkih izraza pretpostavljeno je da je psihrometar tako konstruisan da je Luisov (Lewis) faktor za vlažan vazduh i turbulentno strujanje jednak jedinici, tj.

$$Le = \frac{\sigma c_{pv}}{\alpha} = 1 \quad (3)$$

gdje je:

σ — koeficijent ishlapljivanja, $\text{kg/m}^2\text{s}$

c_{pv} — specifična toplota vazduha, J/kg K

α — koeficijent prelaza toplote sa površine vode na vazduh, $\text{W/m}^2\text{K}$

a to je najčešći slučaj, naročito pri manjim razlikama između temperatura suhog i vlažnog termometra [2].

Tabela 1.

P ₀ = 1.00 BAR						
TS = 10.00 STEPENI CELZIJUSA						
TW ST.C.	FI %	FIT %	DFI %	P BAR	PT BAR	DP BAR
5.	45.29	44.56	.73	.00560	.00547	.00014
6.	55.53	54.97	.56	.00686	.00675	.00012
7.	66.12	65.70	.42	.00816	.00806	.00010
8.	77.08	76.77	.31	.00950	.00942	.00008
9.	88.43	88.20	.23	.01088	.01082	.00006
10.	100.18	100.00	.18	.01231	.01227	.00004
TS = 20.00 STEPENI CELZIJUSA						
TW ST.C.	FI %	FIT %	DFI %	P BAR	PT BAR	DP BAR
6.	1.68	1.05	.63	.00040	.00025	.00016
7.	7.16	6.69	.47	.00171	.00156	.00015
8.	12.83	12.50	.34	.00306	.00292	.00014
9.	18.71	18.50	.21	.00445	.00432	.00013
10.	24.80	24.70	.10	.00589	.00577	.00012
11.	31.11	31.10	.01	.00738	.00727	.00011
12.	37.66	37.72	-.06	.00892	.00881	.00010
13.	44.46	44.57	-.11	.01051	.01042	.00010
14.	51.53	51.67	-.13	.01216	.01207	.00009
15.	58.88	59.01	-.13	.01387	.01379	.00008
16.	66.52	66.62	-.10	.01565	.01557	.00008
17.	74.48	74.51	-.04	.01749	.01741	.00007
18.	82.76	82.69	.07	.01939	.01932	.00007
19.	91.38	91.18	.21	.02137	.02131	.00006
20.	100.37	100.00	.37	.02342	.02337	.00005
TS = 30.00 STEPENI CELZIJUSA						
TW ST.C.	FI %	FIT %	DFI %	P BAR	PT BAR	DP BAR
11.	1.93	1.81	.12	.00086	.00077	.00009
12.	5.44	5.46	-.02	.00241	.00231	.00009
13.	9.08	9.23	-.15	.00402	.00392	.00010
14.	12.87	13.14	-.27	.00568	.00557	.00011
15.	16.81	17.19	-.38	.00741	.00729	.00012
16.	20.90	21.38	-.48	.00919	.00907	.00013
17.	25.17	25.73	-.56	.01105	.01091	.00014
18.	29.61	30.23	-.62	.01297	.01282	.00015
19.	34.24	34.91	-.67	.01497	.01481	.00016
20.	39.06	39.77	-.71	.01704	.01687	.00018
21.	44.09	44.80	-.71	.01920	.01900	.00020
22.	49.34	50.03	-.69	.02143	.02122	.00021
23.	54.81	55.47	-.66	.02376	.02353	.00023
24.	60.53	61.12	-.59	.02617	.02592	.00025
25.	66.50	67.00	-.50	.02867	.02842	.00026
26.	72.73	73.08	-.36	.03128	.03100	.00028
27.	79.24	79.43	-.19	.03398	.03369	.00029
28.	86.04	86.02	.02	.03679	.03649	.00031
29.	93.15	92.87	.27	.03971	.03939	.00032
30.	100.57	100.00	.57	.04274	.04241	.00033

Inače, Luisov faktor se malo razlikuje od jedinice ($0,95 < Le < 1,05$), tako da se pretpostavka (3) može smatrati opravdanom [2], [3].

U slučaju $Le = 1$, na osnovu izmjerenih temperatura suhog i vlažnog termometra stanje vlažnog vazduha može se, za dati barometarski pritisak, odrediti pomoću i - x dijagrama na taj način što će se naći presjek izoterme suhog termometra t_s i produžetka izoterme vlažnog termometra t_w iz područja magle [2], [3] (slika 2).

U i - x dijagramu jednačina izoterme suhog termometra ima oblik:

$$i = c_{pv} t_s + [r(t_s) + c_{pp} t_s] x (P_o, t_s, t_w). \quad (4)$$

a jednačina izoterme vlažnog termometra:

$$i = C_{pv} t_w + [r(t_w) + (C_{pp} - C_{pv}) t_w] x' (P_o, t_w) + C_{pw} t_w x (P_o, t_s, t_w), \quad (5)$$

gdje je za interval temperature od 0 do 100°C:

$$C_{pv} = 1,00 \text{ kJ/kgK} \\ \text{— specifična toplota vazduha,} \\ C_{pp} = 1,86 \text{ kJ/kgK} \\ \text{— specifična toplota vodene pare,} \quad (6)$$

$$C_{pw} = 4,19 \text{ kJ/kg K} \\ \text{— specifična toplota vode,}$$

toplota isparavanja vode:

$$r(t) = 2500 - 2,39 \cdot t, \text{ kJ/kg} \quad (7)$$

pri čemu je t u °C.

Zavisnost sadržaja vlage na liniji zasićenja od temperature i pritiska vazduha $x' (P_o, t)$ data je u literaturi tabelarno [6], [7]. Da bi se izbjegla upotreba tablica, izvršena je aproksimacija tabelarnih podataka za interval temperatura od 5 °C do 40 °C funkcijom:

$$x' (P_o, t) = \frac{1}{P_o} (A \cdot t^2 + B \cdot t + C) \cdot e^{Dt} \quad (8)$$

koja najbolje aproksimira datu eksperimentalnu zavisnost.

Koeficijenti A, B, C i D određeni su metodom najmanjih kvadrata i dobijene su vrijednosti:

$$A = -0,676241 \text{ E} - 06 \approx -0,0068 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \\ B = 0,250484 \text{ E} - 04 \approx 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ C = 0,389518 \text{ E} - 02 \approx 38,95 \cdot 10^{-4} \\ D = 0,640837 \text{ E} - 01 \approx 0,064 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

tako da izraz (8) dobija oblik:

$$x' (P_o, t) = \frac{10^{-4}}{P_o} (-0,0068 t^2 + 0,25 t + 38,95) e^{0,064 t} \quad (10)$$

Pri tome se barometarski pritisak mora uzimati u barima. Maksimalno odstupanje vrijednosti sadržaja vlage izračunatih pomoću formule (10) od eksperimentalnih (tabelarnih) podataka iznosi 0,8%.

Uvrštavajući (6), (7) i (10) u (4) i (5) dobija se sistem od dvije linearne jednačine s dvije nepoznate: i i $x (P_o, t_s, t_w)$

$$i = t_s + (2500 - 0,53 \cdot t_s) \cdot x (P_o, t_s, t_w), \\ i = t_w + (2500 - 4,72 \cdot t_w) \cdot \frac{10^{-4}}{P_o} (-0,0068 t_w^2 + 0,25 t_w + 38,95) e^{0,064 t_w} + 4,19 t_w x (P_o, t_s, t_w) \quad (11)$$

čijim se rješavanjem dobija:

$$x(P_o, t_s, t_w) = \frac{t_w - t_s (2500 - 4,72 t_w) \frac{10^{-4}}{P_o} (-0,0068 t_w^2 + 0,25 t_w + 38,95) e^{0,004 t_w}}{2500 - 0,53 t_s - 4,19 t_w} \quad (12)$$

Pošto se za interval temperatura od 5°C do 40°C sa greškom manjom od 1% može uzeti [2], [3], [7]:

$$\varphi = \Psi = \frac{x(P_o, t)}{x'(P_o, t)} \quad (13)$$

gdje je φ relativna vlažnost, a Ψ stepen zasićenja vazduha, to se tražena analitička zavisnost relativne vlažnosti vazduha od barometarskog pritiska i temperatura suhog i vlažnog termometra mogu napisati u obliku:

$$\varphi(P_o, t_s, t_w) = \frac{x(P_o, t_s, t_w)}{x'(P_o, t_s)} \quad (14)$$

gdje je $x(P_o, t_s, t_w)$ dato relacijom (12), a $x'(P_o, t_s)$ relacijom (10).

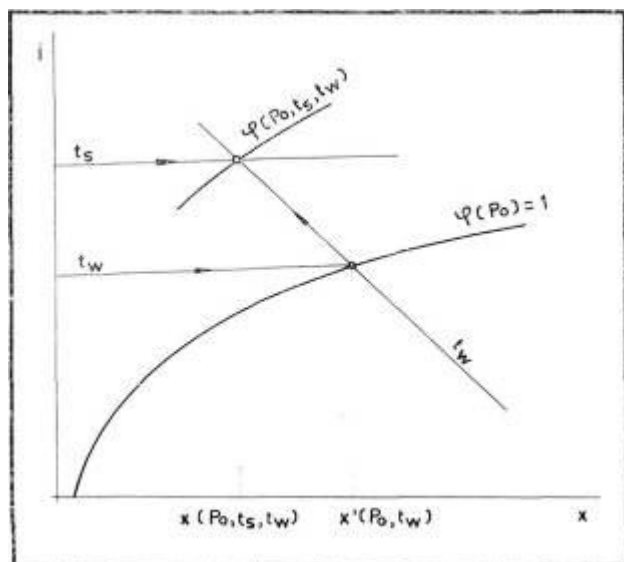
Zavisnost parcijalnog pritiska vodene pare od barometarskog pritiska i temperatura suhog i vlažnog termometra može se izračunati pomoću relacije [2], [3], [7]:

$$P(P_o, t_s, t_w) = \frac{x(P_o, t_s, t_w)}{0,622 + x(P_o, t_s, t_w)} \quad (15)$$

gdje je $x(P_o, t_s, t_w)$ dato relacijom (12).

Radi izračunavanja željenih podataka vlažnosti vazduha napravljen je program za računar, pomoću kojeg su na osnovu formula (14) i (15) za interval temperatura od 5°C do 40°C izračunate

Sl. 2. Određivanje stanja vlažnog vazduha u i-x dijagramu psihrometrom ($Le = 1$)



vrijednosti relativne vlažnosti i parcijalnog pritiska vodene pare, kao i njihovo odstupanje od vrijednosti datih u psihrometarskim tablicama. Analizom tih rezultata ustanovljeno je da je maksimalno odstupanje relativne vlažnosti:

$$\Delta\varphi_{\max} = |\varphi - \varphi_{\text{tab}}| = 0,0113 = 1,13\% \quad (16)$$

pri rasponu relativne vlažnosti od 0 do 1, odnosno od 0 do 100%, a maksimalno odstupanje parcijalnog pritiska vodene pare:

$$\Delta P_{\max} = |P - P_{\text{tab}}| = 0,00069 \text{ b} = 0,52 \text{ mm Hg} \quad (17)$$

pri rasponu parcijalnog pritiska vodene pare od 0 do 0,07045 b, odnosno od 0 do 52,8 mm Hg, što se za većinu tehničkih proračuna može smatrati zadovoljavajućom tačnošću.

Radi ilustracije, u tabeli 1 dati su rezultati proračuna relativne vlažnosti (FI) i parcijalnog pritiska vodene pare (P) pomoću formula (14) i (15) za tri vrijednosti temperatura suhog termometra, kao i podaci iz psihrometarskih tablica (FIT i PT) i apsolutno odstupanje izračunatih vrijednosti i vrijednosti datih u tablicama (DFI i DP).

ZAKLJUČAK

Dobijeni izrazi omogućuju da se sa zadovoljavajućom tačnošću odredi relativna vlažnost vazduha i parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu bez upotrebe psihrometarskih tablica ili dijagrama. Praktična vrijednost ovih izraza dobija na značaju ako se zna da već danas postoje džepni računari s mogućnošću programiranja manjih proračuna, koji omogućuju da se jednostavnim zadavanjem očitanih vrijednosti barometarskog pritiska i temperatura suhog i vlažnog termometra dobiju vrijednosti relativne vlažnosti i parcijalnog pritiska vodene pare.

Pored toga, dobijeni izrazi omogućuju jednostavniju i jeftiniju kompjuterizaciju složenih proračuna u kojima figuriše vlažnost vazduha, jer se na ovaj način izbjegava učitavanje tabelarnih podataka u memoriju računara. Oblast temperatura u kojoj vrijede dobijene formule s navedenom tačnošću (od 5°C do 40°C) zadovoljava potrebe grijanja i klimatizacije. Za druge namjene (meteorologija, različiti tehnološki procesi itd.), odnosno za druge oblasti temperatura trebalo bi dobijene izraze nešto modificirati.

LITERATURA

- [1] BINDON, H. H.: *A Critical Review of Tables and Charts used in Psychrometry*, Int. Symp. on Humidity and Moisture, Washington, 1963.

(Nastavak na str. 66)