

Vlažan vazduh (III)

D.Voronjec i Đ.Kozić

7. MERENJE VLAŽNOSTI VAZDUHA (HIGROMETRIJA)

Pri određivanju stanja vlažnog vazduha, pored temperature i ukupnog pritiska mešavine, potrebno je poznavati i sastav mešavine, odnosno vlažnost vazduha. Sastav mešavine najčešće se određuje preko neke od veličina stanja vlažnog vazduha, kao što su: temperatura vlažnog termometra (temperatura granice hlađenja), temperatura tačke rose ili relativna vlažnost vazduha. Kada je poznata jedna od ovih veličina stanja, kao i temperatura i ukupan pritisak mešavine, moguće je pomoću tabela i dijagrama odrediti ostale veličine stanja vlažnog vazduha.

Za određivanje veličina stanja koje karakterišu vlažnost vazduha, postoji veliki broj postupaka i metoda, jer još uvek ne postoji higrometar koji bi objedinio sve pozitivne osobine kao što su osetljivost, tačnost, stabilnost, brzo reagovanje, dugotrajnost, jednostavno rukovanje i održavanje a i istovremeno imao relativno nisku cenu. Svi razvijeni postupci imaju izraženu po neku od ovih osobina, što ih čini pogodnim za merenje pri određenim uslovima.

Pri izboru metoda za merenje vlažnosti vazduha postoje određene teškoće koje su povezane sa raznovršnošću uređaja i načina upotrebe davača (često nedovoljno definisanim, usled nepoznavanja uloge svih uticajnih parametara) i potrebom za pravilnom interpretacijom rezultata merenja.

Ovde će biti opisani samo oni aktuelni higrometri koji imaju širu primenu u tehničkoj praksi. Za obavljanje što tačnijih merenja neophodno je poznavanje principa njihovog rada kao i njihovih mogućnosti i ograničenja.

7.1. Merenje vlažnosti vazduha psihrometrom

Psihrometerski metod merenja vlažnosti vazduha zasniva se na merenju, u struji vazduha, razlike temperature suvog termometra (stvarne temperature vlažnog vazduha) i temperature vlažnog termometra (temperature okvašene površine sa koje voda isparava u nezasićeni vlažan vazduh). Pri tome se koristi efekat snižavanja temperature vlažne površine pri isparavanju (otud i naziv od grčkog *psihros* — hladan).

Upotrebljeni termometri mogu biti obični termometri sa živom ili električni termometri, ali moraju imati iste dimenzije i inerciju. Jedan od termometara ima osetljivi deo nakvašen destilovanom vodom, najčešće preko komada tkanine — fitilja i periodično se vlaži ili je, u slučaju kontinualnog merenja, spojen sa posudom u kojoj se nalazi voda.

Isparavanje sa površine vlažnog termometra je utoliko intenzivnije (i utoliko će biti niža temperatura vlažnog termometra t_{vt} , ukoliko je parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu manji od pritiska zasićenja vodene pare u vlažnom vazduhu manji od pritiska zasićenja vodene pare pri datoj temperaturi po suvom termometru t_{st} . Na osnovu razlike $t_{st} - t_{vt}$, takozvane psihrometerske razlike, može se

odrediti parcijalni pritisak vodene pare, odnosno, relativna vlažnost vazduha.

Pri čisto konvektivnoj razmeni toplote i materije, u adijabatskom sistemu koji se sastoji od velike količine vlažnog vazduha datog stanja i male količine vode (tj. takvog odnosa količina vazduha i vode da se stanje osnovne količine vazduha praktično ne menja tokom procesa), vlažni termometar bi imao temperaturu granice hlađenja t_H .

U stvarnim uslovima, međutim, pri strujanju vazduha oko vlažnog termometra neizbežno dolazi do formiranja graničnog sloja, kroz koji se prostiranje toplote i materije vrši molekularnim putem (provođenje toplote kondukcijom i molekularna difuzija vodene pare). Osim toga, zbog konačnih dimenzija okvašenog dela vlažnog termometra, vlažan vazduh sa ovog dela odlazi, ipak, nezasićen. Kako se, takođe, ne može u potpunosti eliminisati neadijabatičnost procesa (razmena toplote sa okolinom zračenjem i kondukcijom preko tela termometra i fitilja za snabdevanje vodom), temperatura t_{vt} će se razlikovati od t_H .

Ovo je ujedno i osnovni problem psihrometerskog metoda: kako, na osnovu očitavanja temperature vlažnog termometra t_{vt} odrediti granicu hlađenja t_H .

Ovaj se problem može postaviti i rešavati na dva načina: preko psihrometerske konstante A ili preko Lewisovog broja Le .

Na osnovu materijalnog i toplotnog bilansa isparavanja vode sa površine vlažnog termometra i nekih uvedenih pretpostavki, dolazi se do jednostavne veze između parcijalnog pritiska vodene pare i psihrometerske razlike temperatura, u obliku takozvane psihrometerske jednačine:

$$P_p = P_s(t_{vt}) - A_p(t_{st} - t_{vt})$$

u kojoj veličina A predstavlja psihrometersku konstantu. Njena vrednost u najopštijem slučaju zavisi od geometrijskog oblika i dimenzija osetljivog dela vlažnog termometra i od strujnog i temperaturnog polja u blizini okvašene površine. Preko vrednosti psihrometerske konstante može se izvršiti korekcija izmerene razlike $t_{st} - t_{vt}$ u odnosu na razliku temperatura $t_{st} - t_H$.

U Literaturi postoje različiti podaci o vrednosti psihrometerske konstante za tip aspiracionog psihrometra (slika 23). Po Sprungu, za brzine vazduha veće od 1,5 m/s, proizvod psihrometerske konstante i ukupnog pritiska vlažnog vazduha, u širokom intervalu temperatura, iznosi:

— za slučaj vode na navlaci vlažnog termometra

$$A_p \approx 0,5 \text{ Torr/K}$$

(za $p = 1 \text{ bar}$, $A \approx 6,6 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$)

— za slučaj leda na navlaci vlažnog termometra

$$A_p \approx 0,43 \text{ Torr/K}$$

(za $p = 1 \text{ bar}$, $A \approx 5,7 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$).

Poznata vrednost psihrometerske konstante omogućava da se na osnovu psihrometerske jednačine iz-

rade tablice, dijagrami i nomogrami. Pomoću njih, se, na osnovu temperature t_{st} i t_{vt} mogu odrediti parcijalni pritisak pare, relativna vlažnost, temperatura tačke rose i druge veličine stanja vlažnog vazduha. Jedan ovakav psihrometerski dijagram prikazan je u časopisu »KGH« br. 2/77.

Drugi način uzimanja u obzir odstupanja t_{vt} od t_H omogućava Lewisov zakon, iz koga neposredno sle-

$$\sigma C_{pg}$$

di da će u slučaju kada važi $\frac{\sigma C_{pg}}{\alpha} = 1$, biti $t_{vt} \equiv t_H$.

$$\sigma C_{pg}$$

Kako je faktor $\frac{\sigma C_{pg}}{\alpha}$ za vlažan vazduh približno jed-

nak jedinici, to je, naročito pri manjim vrednostima psihrometerske razlike temperatura, ovaj uslov praktično zadovoljen u slučaju kada je brzina strujanja vazduha dovoljno velika, kada je upotrebljen ekran za zaštitu od zračenja i kada je navlaka čista i potpuno okvašena. Takođe je bitno da se, u slučaju diskontinualnog merenja, pre očitavanja temperature vlažnog termometra a posle uključivanja cirkulacije vazduha, sačeka 4 do 5 minuta, kako bi zaista bilo postignuto ravnotežno stanje.

U tom slučaju, postupak za određivanje stanja vlažnog vazduha vrlo je jednostavan. Treba samo u i-x dijagramu za vlažan vazduh, za odgovarajući ukupan pritisak, izotermu t_{vt} , (određenu vlažnim termometrom) iz zamagljenog područja produžiti do preseka sa izotermom suvog termometra t_{st} , (slika 24). Tačka preseka određuje tada stanje vlažnog vazduha.

Psihrometerski metod predstavlja jedan od u praksi najrasprostranjenijih a, takođe, jedan od najviše proveravanih i proučavanih metoda za merenje vlažnosti vazduha. Dobro konstruisanim psihmetrima može se, pri temperaturama vazduha iznad 0°C , odrediti relativna vlažnost sa tačnošću $\pm 2\%$, dok za interval od -10°C do 80°C tačnost iznosi $\pm 3\%$.

Može se pokazati kolika mora biti potrebna tačnost merenja i očitavanja temperature kod psihmetra kada se želi, sa određenom tačnošću, da izmeri relativna vlažnost vazduha.

Integracijom diferencijalne jednačine Clausius—Clapeyrona, kojom se u prvom približenju aproksimira zavisnost pritiska zasićenja vodene pare od temperatura,

$$\frac{dp_s}{p_s} \approx \frac{r dT}{R_p T^2}$$

u granicama od T_{st} do T_{vt} , i zanemarujući zavisnost toplote isparavanja od temperature, dobija se:

$$p_s(t_{vt}) - p_s(t_{st}) \exp\left(\frac{r}{R_p} \frac{T_{vt} - T_{st}}{T_{vt} T_{st}}\right)$$

Razvijanjem u McLaurinov red u okolini tačke T_{st} (t_{st}) i zadržavajući se na prvom članu reda, dobići se:

$$p_s(t_{vt}) = p_s(t_{st}) + \frac{p_s(t_{st})r}{R_p T_{st}^2} (t_{vt} - t_{st})$$

a uvrštavanjem ove jednačine u psihrometersku jed-
načinu i deljenjem sa $p_s(t_{st})$ sledi:

$$\phi = 1 - \left(\frac{r}{R_p T_{st}^2} + \frac{A_p}{p_s(t_{st})} \right) (t_{st} - t_{vt})$$

Iz ovog izraza dobija se jednačina osetljivosti psihrometerskog metoda pri merenju relativne vlažnosti vazduha u obliku:

$$\frac{d(t_{st} - t_{vt})}{d\phi} = - \left(\frac{r}{R_p T_{st}^2} + \frac{A_p}{p_s(t_{st})} \right)^{-1}$$

Iz pretposlednje jednačine vidi se da sa porastom relativne vlažnosti ϕ , psihrometerska razlika postaje neznatna a poslednja jednačina pokazuje da se, sa opadanjem temperature vazduha, povećava osetljivost psihrometerskog metoda na grešku pri određivanju razlike $t_{st} - t_{vt}$.

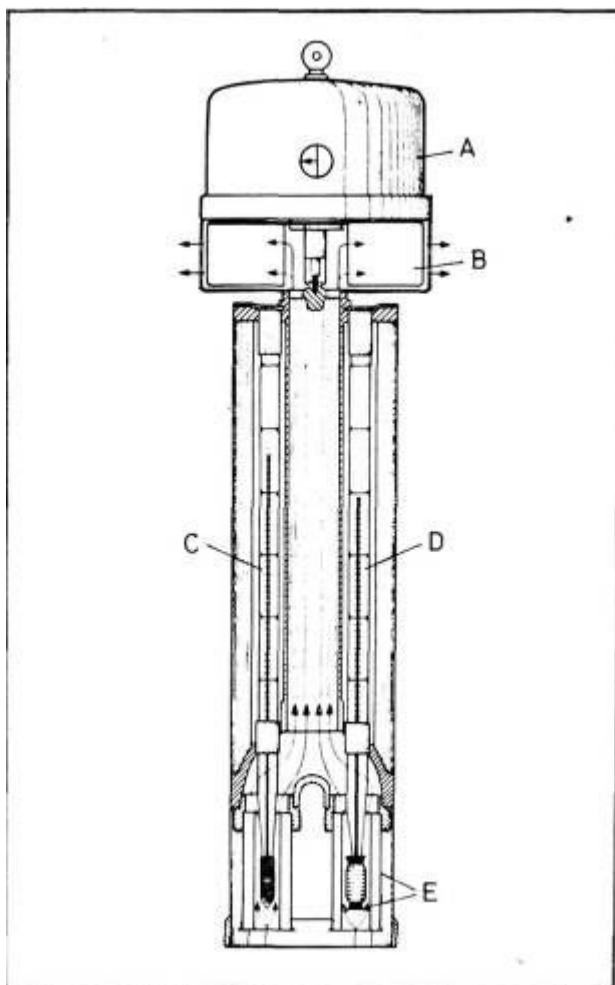
Na slici 25. grafički je prikazana, na osnovu jednačine osetljivosti, zavisnost potrebne tačnosti pri određivanju $t_{st} - t_{vt}$ u funkciji od željene tačnosti pri određivanju relativne vlažnosti ϕ , za ukupan pritisak $p = 755$ Torr. Isprekidana linija se odnosi na slučaj kada je vlažni termometar pokriven ledom. Može se uočiti da je na nižim temperaturama potrebna vrlo velika tačnost pri merenju temperature. Na primer, za $t_{st} = -27^\circ\text{C}$ potrebna tačnost određivanja razlike $t_{st} - t_{vt}$ iznosi svega 0.01°C , za dopuštenu grešku u određivanju relativne vlažnosti od 1% .

Iz razloga što se pritisak zasićenja vodene pare u odnosu na led razlikuje od pritiska zasićenja u odnosu na prehladenu vodu, potrebno je voditi računa o agregatnom stanju vode na navlaci vlažnog termometra.

Kada je vlažan termometar delimično okvašen vodom a delimično pokriven ledom, pri merenju vlažnosti vazduha postoji sledeća neodređenost: koja od bezbroj izoterma $t_H = 0^\circ\text{C}$ (slika 24) određuje stanje vlažnog vazduha?

U ovom slučaju može pomoći takozvani, »metod tri termometra«. Najpre se izmeri temperatura vazduha (po suvom termometru) a onda se vazduh zagreva do potrebne temperature pri kojoj će biti $t_H > 0^\circ\text{C}$ i normalno vrši merenje.

SI. 23. A — pogon ventilatora; B — ventilator; C — suvi termometar; D — vlažni termometar; E — dvos-
truki ekran za zaštitu od zračenja



7. 2. Higrometar tačke rose

Određivanje vlažnosti vazduha metodom tačke rose zasniva se na činjenici da se, pri ravnomernom hlađenju vlažnog vazduha, pri konstantnom ukupnom pritisku, parcijalni pritisci suvog vazduha i vodene pare ne menjaju u toku procesa hlađenja, sve do stanja zasićenja. Na ovaj način dostignuto stanje zasićenja naziva se tačkom rose i pri poznatom ukupnom pritisku u potpunosti je definisano temperaturom zasićenja — temperaturom tačke rose t_R .

Na osnovu poznate temperature tačke rose, korišćenjem tabela za vodenu paru, određuju se parcijalni pritisak vodene pare i ostale higrometrijske veličine. Na slici 26. šematski je prikazan automatski higrometar tačke rose (neautomatski higrometri tačke rose imaju uglavnom laboratorijski značaj).

Pri hlađenju metalnog ogledala koje je u kontaktu sa strujom vlažnog vazduha, pri određenoj temperaturi ogledala, pojavljuje se na površini ogledala kondenzat u obliku sitnih vodenih kapljica (ili inja). Uređaj koji detektuje pojavu rose deluje na sistem za regulaciju temperature površine ogledala tako da održava temperaturu ogledala (hlađenjem, odnosno, grejanjem) što bliže onoj vrednosti pri kojoj dolazi do pojave kondenzata. Srednja aritmetička vrednost temperatura ogledala koje odgovaraju pojavljivanju i iščezavanju kondenzata, usvaja se za temperaturu tačke rose posmatranog vlažnog vazduha.

Za hlađenje ogledala koriste se pogodni rashladni fluidi ili termoelektrično hlađenje na principu Peltierovog efekta. Za merenje temperature koriste se termoparovi, elektrootporni termometri ili termistori.

Na razliku termodinamički definisane i merene temperature tačke rose, utiču brojni faktori kao što su: postojanje temperaturnog gradijenta između osetljivog dela termometra i mesta gde se ostvaruje ravnoteža između parne i kondenzovane faze, progresivno prljanje površine ogledala, čime se menjaju uslovi kondenzacije, kao i svi ostali efekti usled razlike uslova kondenzacije na površini vode i površini čvrstog tela.

Na povećanje tačnosti može se uticati smanjenjem brzine hlađenja i periodičnim čišćenjem površine ogledala. Mora se, osim toga, pri svakom merenju utvrditi da li je kondenzat u čvrstom ili tečnom stanju.

Tačnost većine automatskih higrometara tačke rose iznosi $\pm 0,5^\circ\text{C}$, a uz posebno pažljivo merenje može se dostići i $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pri tome, tačnost je utoliko veća ukoliko je manja relativna vlažnost vazduha, odnosno ako je stanje vazduha dalje od stanja zasićenja. Vremenska konstanta iznosi 1 s za temperature iznad 0°C i oko 15 s za temperature ispod -50°C .

Može se i ovde pokazati kolika mora biti tačnost pri merenju temperature tačke rose kada se želi sa određenom tačnošću da odredi relativna vlažnost vazduha. Iz diferencijalne jednačine Clausius—Clapeyrona, u obliku:

$$\frac{dp_s}{p_s} \approx \frac{r dT}{R_p T^2}$$

i izraza za relativnu vlažnost vazduha:

$$\phi = \frac{p_p(t)}{p_s(t)} = \frac{p_s(t_R)}{p_s(t)}$$

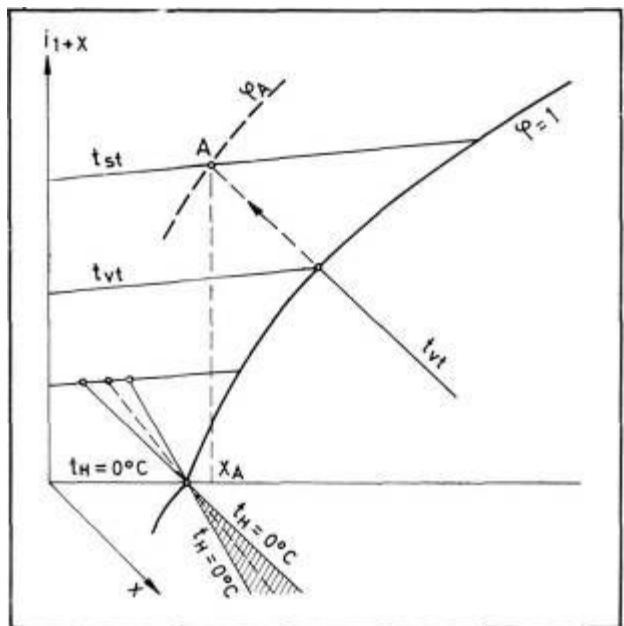
dobija se (pri $r \approx \text{const}$).

$$\ln \phi = \frac{r}{R_p} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

odakle sledi jednačina osetljivosti:

$$\frac{dT_R}{d\phi} = \frac{r}{R_p} \left(\frac{1}{T} - \frac{r}{R_p \ln \phi} \right)^{-1}$$

Sl. 24.



Uočava se da potrebna tačnost pri određivanju t_R , za datu dopuštenu grešku u određivanju ϕ , zavisi i od temperature vazduha i od vrednosti tražene relativne vlažnosti ϕ . Na slici 27. grafički je prikazana, na osnovu jednačine osetljivosti, zavisnost potrebne tačnosti određivanja t_R za dopuštenu grešku od 1% relativne vlažnosti, u funkciji od temperature vlažnog vazduha. Isprekidane linije i ovde važe za slučaj pojave inja na ogledalu.

Može se konstatovati da je, u poređenju sa psihrometarskim metodom, metod tačke rose znatno manje osetljiv na greške pri merenju temperature. Tako za isti primer temperature $t = -27^\circ\text{C}$, a za $\phi = 100\%$ (što predstavlja najnepovoljniji slučaj) potrebna tačnost određivanja t_R za $\Delta = \pm 1\%$ iznosi $0,1^\circ\text{C}$. Vidi se, takođe, da se dozvoljena greška u određivanju temperature tačke rose (leda) smanjuje pri većim vrednostima relativne vlažnosti vazduha.

Treba primetiti, međutim, da se prosto poređenje higrometra tačke rose sa psihrometrom ne može vršiti i iz razloga različite inercije ovih instrumenata.

Higrometri tačke rose mogu se koristiti u vrlo širokom dijapazonu temperatura, od -100°C , i niže pa sve do 350°C , pri ukupnom pritisku od 160 bar. Osnovni njihov nedostatak je složenost konstrukcije, povezana sa neophodnošću uređaja za hlađenje, grejanje, detekciju rose i regulaciju temperature, što se odražava i na cenu pribora.

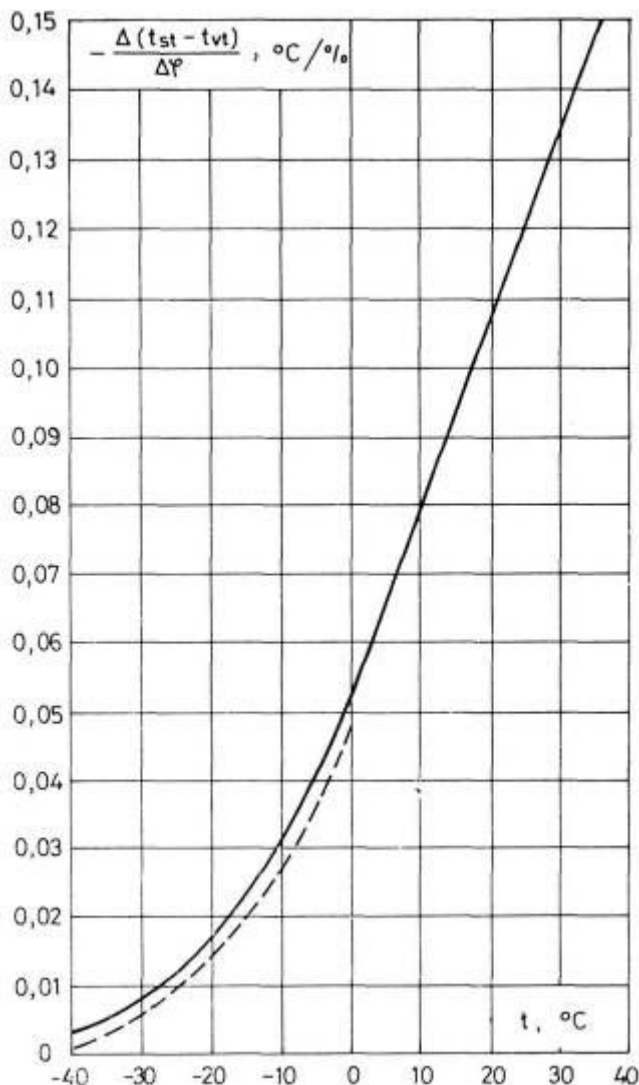
Međutim, osnovna prednost ovog higrometra nad ostalim su njegove dobre meteorološke karakteristike pri niskim temperaturama pri kojima su još uvek najveće teškoće prilikom merenja vlažnosti vazduha.

7.3. Higrometar tačke rose sa litijum-hloridom

Kod ovog higrometra koristi se osobina zasićenih rastvora soli da je parcijalni pritisak vodene pare iznad njihove površine niži od pritiska zasićenja vodene pare nad površinom čiste vode, pri istoj temperaturi. Kriva 1 na slici 28. predstavlja zavisnost pritiska zasićenja (maksimalnog pritiska) vodene pare iznad ravne površine čiste vode od temperature, a kriva 2 se odnosi na istu zavisnost samo za zasićen rastvor neke soli.

Položaj krive 2 je uvek ispod krive 1. Slanije pare u nezasićenom vlažnom vazduhu, čija se vlažnost meri, određeno je odgovarajućom tačkom A, takođe ispod krive 1, odnosno tačkom B, ispod krive 2.

Sl. 25.



U slučaju kontakta nezasićenog vlažnog vazduha sa površinom rastvora, zasićeni rastvor soli, kome odgovara ravnotežna kriva 2, apsorbovaće vodenu paru iz vlažnog vazduha, pri čemu je stanje pare u vlažnom vazduhu prikazano tačkom A, zbog toga što je ravnotežni pritisak p^* , pri toj temperaturi, niži od pritiska p_0 . Međutim, zagrevanjem neke male količine rastvora u odnosu na veliku količinu vazduha do temperature t^* (proces pri $p = \text{const}$, od tačke A udesno), može se postići jednakost ova dva pritiska, odnosno, prestanak razmene materije (vlage) između rastvora i vazduha — stanje ravnoteže.

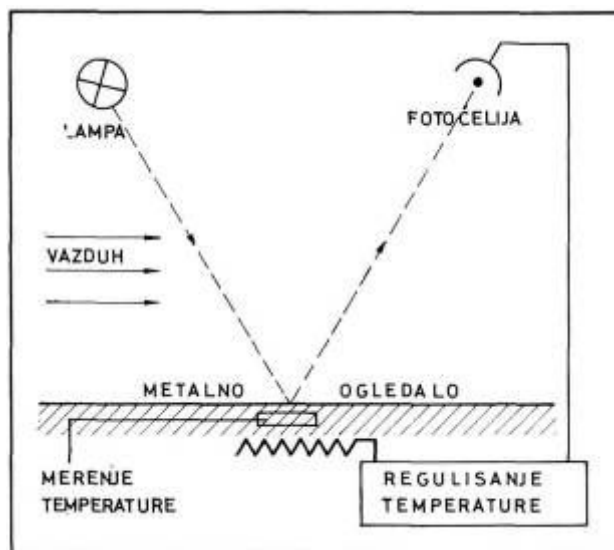
Ako je stanje pare vlažnog vazduha prikazano tačkom B, ravnoteža bi mogla da bude postignuta hlađenjem rastvora do odgovarajuće temperature (nije ucrtana na slici).

I u jednom i u drugom slučaju postoji određena temperatura (različita za ova dva slučaja) koja odgovara stanju ravnoteže, to jest, ravnotežna temperatura zasićenog rastvora (za stanje A je označena sa t^*), kojom je jednoznačno određen parcijalni pritisak vodene pare p_0 , odnosno temperatura lažne rose t_R .

Na taj način, određivanjem temperature t^* pri kojoj je zasićeni rastvor soli u ravnoteži sa vodenom parom iz vlažnog vazduha, moguće je odrediti vlažnost vazduha.

Ako se uvede ograničenje da se do ravnotežne temperature može doći samo zagrevanjem rastvora (znači otpada mogućnost hlađenja), onda radno područje predstavlja samo skup stanja vodene pare između krivih 1 i 2 i nije moguće odrediti vlažnost

Sl. 26.



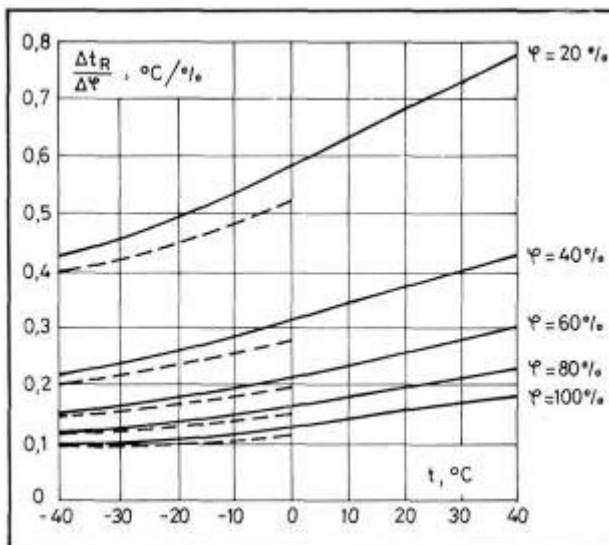
vazduha čije je stanje pare zadato na primer tačkom B, ispod krive 2.

Iz tog razloga poželjan je izbor takvog rastvora soli čiji je ravnotežni pritisak pare što je mogući niži, kako bi se što više proširila oblast između krivih 1 i 2. Najčešće se u ove svrhe koristi so litijum-hlorida $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (monohidrat), čiji ravnotežni pritisak pare na temperaturi od 20°C odgovara relativnoj vlažnosti vazduha od 12,4% (tabela 8); time je teorijski omogućeno merenje sa zagrevanjem rastvora u svim slučajevima kada je relativna vlažnost veća od ove vrednosti.

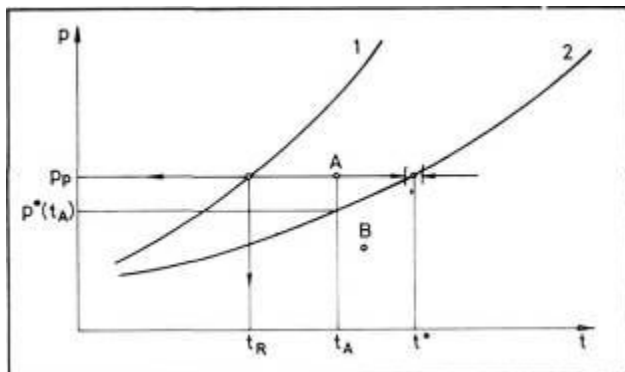
Davač higrometra na ovom principu sastoji se od tankog sloja higroskopske tkanine (na primer staklenog vlakna), omotane oko osetljivog dela otpornog termometra i natopljene rastvorom litijum hlorida. Oko higroskopske tkanine (slika 29) namotane su sa razmakom dve metalne elektrode, povezane sa izvorom naizmenične struje (da bi se izbegla polarizacija).

Kada je parcijalni pritisak pare u vazduhu veći od ravnotežnog pritiska rastvora litijum-hlorida za datu temperaturu, rastvor apsorbuje vodenu paru iz vazduha. Usled toga smanjuje se električni otpor između elektroda i povećava jačina struje. Ovo dovodi do povišenja temperature rastvora, odnosno i temperature termometra. Kada se parcijalni pritisak vodene pare na površini davača izjednači sa pritiskom pare u okolnom vazduhu (usled povišenja tempera-

Sl. 27.



Sl. 28.



ture), davač će imati temperaturu ravnoteže zasićenog rastvora (za stanje A to je t^*). Prekoračenje ove temperature dovodi do toga da pritisak vodene pare nad zasićenim rastvorom postaje veći od pritiska pare u okolnom vazduhu. Sa površine rastvora počinje isparavanje vode i obrazovanje kristala soli. Pri prelasku u čvrsto stanje soli električni otpor naglo raste, što izaziva smanjenje struje i snižavanje temperature davača. Snižavanje temperature davača produžice se sve dotle dok se, usled asorpcije vodene pare iz vazduha, provodljivost rastvora između elektroda ponovo ne poveća, što povlači za sobom povećanje struje i povišenje temperature davača.

Obavlja se, u stvari, oscilatorni proces regulacije temperature oko srednje vrednosti jednake ravnotežnoj temperaturi rastvora pri čemu je regulator — sama so litijum hlorida.

Na osnovu poznate ravnotežne temperature rastvora litijum-hlorida može se, na opisan način, kada su poznate zavisnosti ravnotežnog pritiska u funkciji temperature za zasićeni rastvor litijum hlorida i vode (krive 1 i 2), odrediti parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu p_p i temperatura tačke rose t_R .

S obzirom, da se stanje ravnoteže postiže grejanjem davača (što je lakše ostvariti nego hlađenje), ovaj higrometar je jednostavniji od higrometra tačke rose, kod koga se ravnoteža postiže hlađenjem i grejanjem metalnog ogledala. Međutim, korišćenjem ovog metoda ne može se odrediti vlažnost vazduha, praktično, ispod 20% relativne vlažnosti. Takođe postoji ograničenje sa strane temperature gasa, koja mora biti uvek manja od temperature ravnoteže zasićenog rastvora, ali ne ispod -30°C (krive 1 i 2, koje se odnose na vodu i zasićeni rastvor litijum-hlorida, seku se pri temperaturi od oko -36°C).

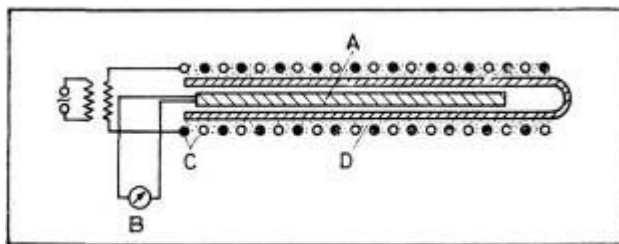
Oblast visokih temperatura manje je ograničena, mada iznad 100°C davači rade nestabilno. Obično se kao gornja granica usvaja temperatura tačke rose od 60°C , pri temperaturi vazduha ne višoj od 100°C .

U ovom području može se postići tačnost od $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (u određivanju tačke rose) pod uslovom da se obrati pažnja na čistoću davača i brzinu strujanja vazduha. Ako se pojavi sumnja da je davač zaprljan (što se održava na netačnom merenju), davač se može pažljivo oprati ili iskusvati i ponovo natopiti rastvorom litijum-hlorida.

Brzine strujanja vazduha oko davača ne smeju biti velike, ne veće od $0,5\text{ m/s}$, jer veće brzine dovode do povećanog hlađenja davača i narušavanja normalnog rada. Pri posebnoj konstrukciji oklopa davača moguća su i merenja pri većim brzinama vazduha.

Treba ukazati i na problem nejednoznačnosti merenja u izvesnim domenima temperatura (niže od ravnotežne temperature rastvora $19,1^\circ\text{C}$), povezanim sa promenama kristalohidratnog stanja litijum-hlorida (prelaz monohidrata $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ u dihidrat $\text{LiCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pri čemu davač može raditi na liniji monohidrata ili na liniji dihidrata. Ovo uslovljava donju granicu određenosti merenja temperature tačke rose $t_R \approx -10^\circ\text{C}$, pošto pri $t_R = -20^\circ\text{C}$ neodređenost pri mere-

Sl. 29. A — otporni termometar; B — pokazivač; C elektrode; D — litijum-hlorid



nju ravnotežne temperature rastvora iznosi $3,4^\circ\text{C}$ a pri $t_R = -30^\circ\text{C}$ i do $5,4^\circ\text{C}$. Druga zona neodređenosti merenja odgovara intervalu temperatura tačke rose $34 \leq t_R \leq 41^\circ\text{C}$.

Međutim, s obzirom na intervale temperature i vlažnosti, ovaj higrometar je upravo u klimatizaciji našao veliku primenu posebno iz razloga što se odlično uklapa u kola automatske regulacije i upravljanja.

7.4. Direktno merenje relativne vlažnosti vazduha

7.4.1. Davači sa promenljivom impedansom

Osetljivi deo davača ovih tipova higrometara sačinjen je od higroskopne materije čije se električne osobine na, teorijski tačno definisan i povratan način, menjaju sa promenom relativne vlažnosti vazduha.

Najrasprostranjeniji među ovim davačima, zasnivaju se na promeni električnog otpora elektrolita — neke higroskopne soli (litijum-hlorida, barijum-fluorida, natrijum-hlorida i dr.), koja je sa nosiocem elektrolita (na primer polivinilacetatom) u obliku filma nanešena na podlogu od elektrolizolacionog materijala i postavljena između dve elektrode od plemenitog metala (higrometri Dunmoreovog tipa). Promena otpora određuje se obično pomoću otpornog mosta koji se napaja naizmeničnom strujom (da bi se izbegla polarizacija).

Davač sa oksidom aluminijuma zasniva se na promeni dielektrične konstante ovog oksida u funkciji relativne vlažnosti vazduha. Na aluminijumskoj osnovi davača, elektro-hemijskim postupkom, stvoren je tanak sloj aluminijum oksida preko koga je u vakumu napareno zlato; pri merenju vlažnosti aluminijumska osnova je jedna, a zlato druga elektroda. Vodena para iz vlažnog vazduha prolazi kroz napareni sloj zlata i skuplja se u poroznoj strukturi aluminijum oksida. Pri tome dolazi do promene impedanse (koja se registruje), proporcionalno količini vodone pare.

Glavne osobine ovih veoma rasprostranjenih davača su velika osetljivost, zanemarljiv uticaj pokazivanja od brzine strujanja vazduha i brzo vreme reagovanja. Tačnost koja se postiže kod većine higro-

Tabela 8.

Temperatura $^\circ\text{C}$	$\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	NaCl	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	KNO_3	K_2SO_4
0	14,7	35,0	60,6	74,9	83,7	97,6	109,1
-5	14,0	34,6	59,2	73,1	82,6	96,6	108,4
10	13,3	34,2	57,8	71,2	81,7	95,5	107,9
15	12,8	33,9	56,3	70,1	81,1	94,4	107,5
20	12,4	33,6	54,9	69,5	80,6	93,2	107,2
25	12,0	33,2	53,4	68,8	80,3	92,0	106,9
30	11,8	32,8	52,0	68,0	80,0	90,7	106,6
35	11,7	32,5	50,6	67,5	79,8	89,3	106,4
40	11,6	32,1	49,2	67,4	79,6	87,9	106,2
45	11,5	31,8	47,7	67,1	79,3	86,5	106,0
50	11,4	31,4	46,3	67,1	79,1	85,0	105,8

metara ovih tipova iznosi $\pm 1\%$ relativne vlažnosti sa malim temperaturnim koeficijentom (neznatnom osetljivošću na promenu temperature vlažnog vazduha) i malim histerezisom. Takođe je značajno i to što davači mogu biti veoma malih dimenzija pa se mogu koristiti za određivanje vlažnosti vazduha u malim zapreminama, kanalima malog preseka kao i za određivanje polja vlažnosti. Veoma su pogodni za korišćenje u električnim kolima pokazivanja i registrovanja, odnosno regulisanja ili upravljanja.

Potrebno je voditi računa da sa vremenom može doći do promene njihovih karakteristika, pa je potrebno vršiti kontrolna baždarenja.

7.4.2. Mehanički (deformacioni) higrometri

Kod davača ovih higrometara koriste se osobine raznih materija, prirodnog ili veštačkog porekla, da se izdužuju (skrćuju) ili deformišu sa promenom relativne vlažnosti vazduha. Najčešće upotrebljavani materijal je tehnološki pripremljena dlaka iz kose, ali se koriste i davaci načinjeni od membrane životinjskog porekla, sintetičkih vlakana, vune, hartije i dr.

Dobre osobine ovih higrometara su jednostavnost konstrukcije i niska cena. Osim toga, pogodni su za uključivanje u sisteme pneumatičke regulacije.

Njihovi glavni nedostaci su velika inercija, znatan histerezis i naročito promena karakteristika sa vremenom (na primer, pokazuju povećane vrednosti relativne vlažnosti posle dužeg stajanja pri niskim vlažnostima). Mogu se, međutim, jednostavno regenerisati držanjem u vazduhu čija je relativna vlažnost blizu 100%.

Za najrasprostranjeniji davač sa dlakom greška pri merenju iznosi $\pm 5\%$ u intervalu relativne vlažnosti 0—100% i pri temperaturama od -30°C do 60°C , dok inercija iznosi oko 15 min.

Valjanjem dlake (do eliptičnog poprečnog preseka sa odnosom poluosa elipse 4:1) povećava se osetljivost a smanjuju greška i inercija.

Postoje i drugi tipovi higrometara kao na primer, spektroskopski, pijezokvarčni, na principu promene boje, koronarnog praznjenja itd., ali oni u tehnici imaju užu primenu od napred proučenih higrometara.

7.5. Baždarenje higrometara

Napred razmotreni higrometri mogu se podeliti na dve grupe:

a) higrometre koji se zasnivaju na fizičkom principu koji omogućava direktno određivanje neke veličine stanja vlažnog vazduha (apsolutni metodi); to su na primer higrometar tačke rose ili psihrometar;

b) higrometre koji se zasnivaju na merenju promene neke osobine materije, koja je funkcionalno povezana sa vlažnošću vazduha (posredni metodi); to su, na primer, higrometar sa oksidom aluminijuma, otporni higrometar Dunmoreovog tipa, higrometar sa dlakom itd.

Pitanje bažđenja, koje se prirodno postavlja kada se radi o higrometrima grupe (b), može se rešiti primenom higromotara grupe (a). Međutim, čak i u slučaju kada su ovi drugi brižljivo konstruisani, pri čemu su temperatura tačke rose i temperatura granice hlađenja sa stanovišta termodinamike precizno definisani, uslovi merenja ne mogu u potpunosti da reprodukuju uslove postavljene definicijama. Iz tog razloga bažđenjem se eksperimentalno određuje, na primer, psihrometerska konstanta, naročito za posebne uslove, kao što su merenja pri visokim temperaturama, različitim brzinama itd.

Osim toga bažđenje se obično vrši u nekom intervalu između graničnih vrednosti vlažnosti odakle sledi da je neophodan uređaj koji omogućava određene promene vlažnosti (takozvani »generator vlažnosti«). Pored generatora vlažnosti, instalacija za bažđenje treba da ima termostatisiranu radnu komoru i neko sredstvo referencije vlažnosti (što može biti i sam generator vlažnosti).

Postoji nekoliko načina ostvarivanja ovakvih instalacija. Većina radi u otvorenom ciklusu sa dovođenjem vazduha do zasićenja i kasnijom promenom do željenog stanja nezasićenog vlažnog vazduha. To mogu biti metodi dva pritiska, dveju temperatura ili metod mešanja suvog vazduha sa zasićenim vazduhom, u različitim odnosima.

Zaslužuje pažnju jedan metod koji se može veoma jednostavno primeniti. To je metod zasićenih rastvora soli, čiji je princip rada pomenut pri opisu higrometra tačke rose sa Litijum-hloridom.

Prema tabeli 8, mogu se pomoću termostatisiranog suda i odgovarajućeg rastvora soli »proizvesti« neke, tačno određene, vrednosti relativne vlažnosti vazduha. Potrebno je samo da odnos površine rastvora prema korišćenoj zapremini termohigrostata bude što veći i da se primene hemijski čiste soli i destilovana voda. Takođe je poželjno kontinuirano mešanje rastvora i zatvorena cirkulacija vazduha, čime se povećava brzina dostizanja ravnotežnog stanja i sprečava nehomogenost temperaturnog polja i polja vlažnosti. Može se, u takvim uslovima, ostvariti tačnost od $\pm 1\%$ relativne vlažnosti. Ovaj metod se ne primenjuje za bažđenje pri temperaturama vazduha iznad 50°C , zbog nedovoljnih podataka o ravnotežnim parcijalnim pritiscima iznad rastvora zasićenih soli pri tim temperaturama.

Kao »primarni standard« pri laboratorijskom bažđenju higrometara koristi se gravimetrijski metod koji se sastoji u potpunom odvajanju (pomoću sistema isušivanja) suvog vazduha od vodene pare iz uzorka i posebnom merenju mase suvog vazduha i mase vodene pare. Ovaj metod smatra se danas za najprecizniji u higrometriji. Iako je princip metoda vrlo jednostavan, ostvarenje može biti veoma složeno i skupo ako se želi velika tačnost. Zbog toga se ovaj metod upotrebljava samo kao kontrolni metod za druge instalacije za bažđenje higrometara.

Kao zaključak, može se napomenuti da je, pored baždarnih krive, za pravilnu upotrebu davača potrebno poznavati i ostale karakteristike koje uzimaju u obzir razne uslove merenja (brzinu strujanja vazduha, promenu pritiska, prisustvo drugih gasova i para itd.).

Poznavanjem uslova merenja može se izvršiti potrebna korekcija baždarnih krive. Za specifične upotrebe davača potrebno je, sem toga, vršiti dinamička ispitivanja davača na brzinu odgovora, pa su u tim slučajevima i uređaji za bažđenje znatno složeniji.

LITERATURA

- [1] BOŠNJAKOVIĆ F.: *Nauka o toplini*, dio drugi, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [2] HAUSLER, W.: *Das Mollier i-x Diagramm für feuchte Luft und seine technischen Anwendungen*, Dresden-Leipzig, 1960.
- [3] BAEHR, H. D.: *Mollier i-x Diagramm für feuchte Luft*, Springer-Verlag, Berlin, 1961.
- [4] JUNKER, B.: *Klimaregelung, Grundlagen Praxis der Projektierung*, R. Oldenbourg-Verlag, München, 1974.
- [5] RECKNAGEL-SPRENGER: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, R. Oldenbourg-Verlag, München, 1974.
- [6] NESTERENKO, A. V.: *Osnovi termodinamičeskikh rasčotov ventilaciji i kondicionirovanija vazduha*, Moskva, 1965.
- [7] BERLINER, M.: *Izmerenija vlažnosti*, Energija, Moskva, 1973.
- [8] MERIGOUX, J. RAISSON, J.: *La situation actuelle de la mesure de l'humidité dans l'air*, Bulletin BNM, Paris, Juillet, 1976.
- [9] VEHAUC, A.: *Metodi određivanja polja vlažnosti vazduha u hladnjačama*, IBK — 1127, institut »Boris Kidrič«, Beograd, 1972.
- [10] MARKOSKI, MILE: *Metodi merenja vlažnosti vazduha*, (Rad ograničene cirkulacije), Beograd, 1974.
- [11] KOZIĆ, Đ. BEKAVAC, V.: *Priručnik za termodinamiku*, Mašinski fakultet, Beograd, 1976.