

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 37

LJUBLJANA, JANUAR-MAREC 1991

ŠTEVILKA 1-3

UDK 613.162:681.542.4:681.5.08-53.08/.09

Analiza merilne negotovosti pri določanju vlažnosti zraka po psihrometrski metodi

IVO BAJSIĆ – JANKO PEROVNIK

0. UVOD

Meritve in nadzor vlažnosti plinov ter trdnih snovi imajo pomembno vlogo na različnih področjih znanosti, npr. v fiziki, kemiji, biologiji, medicini ter mnogih vejah procesne tehnike, mikroelektroniki, reaktorski tehniki in podobno.

Praktično ni industrijskega procesa oziroma veje gospodarstva ali področja znanosti, kjer ne bi bilo treba meriti vlažnosti.

Kljub tako široki uporabnosti procesne merilne tehnike je na področju merjenja vlažnosti še mnogo nedorečenega.

V strokovni literaturi [1], [2] itn. je mogoče zaslediti več ko štirideset različnih načel in postopkov merjenja vlažnosti plinov in trdnih snovi. Zaradi tega je zahtevna tudi sama izbira ustrezne merilne opreme in postopka merjenja. Zahtevno je tudi umerjanje in nadzor oziroma pregled tovrstne merilne opreme. Z merilno tehničnega vidika pa je odločujoča njena merilna negotovost.

Pri merjenju vlažnosti zraka v praksi še vedno prevladuje psihrometrija. Na splošno lahko ugotovimo, da so sodobna merilna zaznavala in merilniki vlažnosti zasnovani glede na najnovejše izdelovalne tehnologije mikroelektronike in prenosa signala z uporabo optičnih vlaken. Kljub temu pa je eno od žgočih in še vedno odprtih vprašanj zanesljivo in učinkovito umerjanje takšne merilne opreme.

Zato smo zasnovali računalniško nadzorovan merilni sistem za umerjanje merilnikov vlažnosti. Merilno negotovost tako zasnovanega sistema pa smo analizirali po obravnavanem modelu, ki je podan v tem prispevku.

1. OZNAČBE IN INDEKSI

1.1 Označbe

- A — psihrometrška konstanta,
- c — specifična toplota,
- M — konstanta,
- M — molska masa, statistična meja pogreškov,
- p — tlak,
- r_0 — uparjalna toplota vode pri 0 °C,
- t — temperatura,
- u — spremenljivka,
- x — vlažnost,
- φ — relativna vlažnost.

1.2 Indeksi

- A — psihrometrška konstanta,
- i — sumacijski indeks,
- m — mokri,
- nas — nasičen,
- o — okolica,
- p — izobaren,
- p_{nas} — tlak nasičenosti,
- p_o — tlak okolice,
- r — sumacijski indeks,
- s — suhi,
- sz — suh zrak,
- t — temperatura,
- v — voda,
- vp — vodna para,
- z — poljubna vrednost,
- φ — relativna vlažnost.

2. PRIKAZ PROBLEMA

2.1 Pregled stanja na področju merjenja vlažnosti zraka s psihrometrom

Delovanje psihrometra, ki temelji na zniževanju temperature mokre površine ob izhlapevanju vode, je že zelo dolgo znano (Richman, l. 1750) [3]. Leta 1825 je August skonstruiral psihrometer, na katerem je voda z mokre površine izhlapevala v razmerah naravne konvekcije; izhlapevanje s prisilno konvekcijo pa je leta 1831 izkoristil Belli za svoj psihrometer. Assmann je leta 1886 skonstruiral aspiracijski psihrometer, ki se brez večjih sprememb uporablja še danes. Vsi do sedaj omenjeni psihometri imajo za merjenje temperatur vgrajene živosrebrne termometre.

Leta 1933 je J. H. Arnold [4], [5] objavil teorijo psihrometra, v kateri je združil Augustovo konveksijsko in Maxwellovo difuzijsko teorijo. V primeru analognih mehanizmov prenosa toplote in snovi (izhlapevanje vode v zrak v določenih okoliščinah) dobimo z uporabo vseh treh omenjenih teorij enake rezultate. Arnoldovo teorijo pa lahko uporabimo tudi pri popisu hlapenja drugih snovi (npr. metilnega alkohola, toluena) v zrak.

Na prvem mednarodnem simpoziju, posvečenem merjenju in nadzoru vlažnosti v znanosti in industriji leta 1963 (International Symposium on Humidity and Moisture, Washington, D.C.) sta J.C. Davis in P.R. Achenbach [6] predstavila raziskave merjenja vlažnosti zraka s psihrometrom, ki je imel tempera-

turna zaznavala iz termoelementov (baker-konstantan). Leta 1985 je bil v Washingtonu drugi mednarodni simpozij o merjenju in kontroli vlažnosti v znanosti in industriji (International Symposium on Humidity and Moisture, Washington, D.C.). Med drugim so na njem K. Shiba, M. Ueda in M. Haraguchi [7] predstavili natančen termoelektrični psihrometer. Ta psihrometer ima temperaturna zaznavala iz termoelementov (krom-aluminij) in je izdelan tako, da zadošča za natančno merjenje psihrometske razlike temperatur že zelo majhna hitrost zraka (okrog 0,3 m/s). Na tem kongresu so A.C. Kent, H.N. Rosen, J.L. Higginbotham in G. Girod [8] predstavili psihrometer za določanje vlažnosti zraka, ki je bil testiran za temperature zraka do 154 °C (temperature mokrega termometra do 75 °C). Po napovedih pa naj bi bilo mogoče z njim meriti vlažnost zraka do temperature suhega termometra 200 °C. Za merjenje temperatur so uporabili uporovna zaznavala iz platine.

2.2 Fizikalni model psihometrične metode

Obstajajo različne oblike psihrometrov, ki pa so vsi sestavljeni iz dveh temperaturnih zaznaval. Z enim merimo dejansko temperaturo zraka (temperaturo suhega termometra), z drugim pa temperaturo mokrega termometra (temperaturo popolno omočene površine, s katere izhlapeva voda). Izhlapevanje vode s površine mokrega termometra je tem intenzivnejše, čim večja je razlika med delnim tlakom vodne pare v zraku in tlakom nasičenosti pri dani temperaturi zraka in tlaku okolice (s tem bo tudi psihrometska razlika temperatur večja). Z ustrezno konstrukcijsko izvedbo je treba zagotoviti, da je izhlapevanje vode v vsakem primeru dovolj intenzivno, da se temperatura mokrega termometra čim bolj približa temperaturi meje hlajenja. Zato se v večini primerov uporabljajo psihometri s čim manjšimi temperaturnimi zaznavali in s prisilnim obtokom zraka okrog omočene površine.

2.3 Osnovni matematični model

Iz razlike temperatur med suhim in mokrim termometrom ($t_s - t_m$) lahko ob poznavanju tlaka okolice p_o in psihrometske konstante A z uporabo psihrometske enačbe določimo delni tlak vodne pare p_{vp} ter relativno vlažnost zraka φ .

$$p_{vp}(p_o, t_s, x) = p_{nas}(t_m) - A p_o (t_s - t_m) \quad (1)$$

in

$$\varphi = \frac{p_{vp}(p_o, t_s, x)}{p_{nas}(t_s)} \quad (2).$$

Pri tem pomenita x - vlažnost zraka in p_{nas} - tlak nasičenosti.

Vrednost psihrometske konstante je v splošnem primeru odvisna od termodinamičnih in transportnih lastnosti zraka, vodne pare in vode, od geometrijskih oblik in dimenzij zaznavalnega dela mokrega termometra in od tokovnega ter temperaturnega polja v bližini omočene površine.

Z razvojem poznavanja snovnih lastnosti zraka, vodne pare in vode so se tudi vrednosti psihrometske konstante spreminjale. Tu navajamo nekatere od njih:

E.F. August: $A = 0,0007783$ [9],

A. Sprung: $A = 0,0006622$ [9], [10],

W.M. Hofmann; $A = 0,0006424$ [11],

W. Ferrel: $A = 0,0006606 \left[1 + \frac{t_m}{872,778} \right]$ [12], [13], [14], (3),

W.H. Carrier pa je zapisal psihrometro enačbo [13]:

$$p_{vp}(p_o, t_s, x) = p_{nas}(t_m) - \frac{1,8(t_s - t_m)}{2800 - 1,3(t_m 1,8 + 32)} [p_o - p_{nas}(t_m)] \quad (4).$$

Z nadaljnjim razvojem psihometrije so vrednosti 2800 in 1,3 v enačbi (4) zamenjali z 2830 in 1,44.

Vse zgoraj zapisane vrednosti psihrometske konstante imajo za osnovo predpostavke o neodvisnosti snovnih lastnosti zraka, vodne pare in vode od temperature. To predpostavko pa lahko uporabimo samo v manjšem temperaturnem območju.

V delu [15] smo po modelu adiabskega ovlaževanja izpeljali enačbo za vrednost psihrometske konstante, v kateri so upošteevane odvisnosti snovnih lastnosti zraka, vodne pare in vode od temperature in tlaka okolice.

$$A = \frac{(M c_{p,sz} - c_{p,vp}) \left[\frac{p_{nas}}{p_o} \right]^2 + (c_{p,vp} - 2M c_{p,sz}) \frac{p_{nas}}{p_o} + M c_{p,sz}}{(M c_{p,sz} - c_{p,vp}) (t_s - t_m) \frac{p_{nas}}{p_o} + [u - M c_{p,sz} (t_s - t_m)]} \quad (5).$$

Za zapis enačbe (5) smo uporabili še skrajšana zapisa:

$$u = r_o + c_{p,vp}(t_s) t_s - c_{p,v}(t_m) t_m \quad (6)$$

in

$$M = \frac{M_{sz}}{M_{vp}} \quad (7).$$

V zgornjih enačbah pomenijo: $c_{p,sz}$, $c_{p,vp}$ in $c_{p,v}$ specifične toplote suhega zraka, vodne pare in vode pri konstantnem tlaku; r_o je uparjalna toplota

vode pri 0 °C; M_{sz} in M_{vp} pa sta molski masi suhega zraka in vodne pare. V enačbi (5) velja tlak nasičenosti pri temperaturi mokrega termometra, specifične toplote suhega zraka in vodne pare pa pri srednji temperaturi $0,5(t_s + t_m)$.

Za študij pojava smo zgradili matematični model, ki omogoča simuliranje merjenja vlažnosti zraka s psihrometrom, in to tako, da je pri merjenju temperatura mokrega termometra enaka temperaturi meje hlajenja.

2.4 Termodinamične in transportne lastnosti vlažnega zraka

Snovne lastnosti vlažnega zraka so odvisne od temperature, tlaka in vlažnosti.

V delu [16] smo za temperaturno območje od 0 °C do 95 °C pri standardnem barometriškem tlaku $p_o = 1,01325 \cdot 10^5$ Pa izdelali primerjalno analizo znanih modelov za določanje transportnih in termodinamičnih lastnosti vlažnega zraka. Po tej analizi smo tudi izbrali najustreznejše algoritme za izračun posameznih lastnosti vlažnega zraka.

3. ANALIZA MERILNE NEGOTOVOSTI

3.1 Enačba mej pogreškov relativne vlažnosti

Pri psihrometskem merjenju vlažnosti zraka je relativna vlažnost posredna funkcija treh neposredno merjenih veličin: temperature suhega termometra, temperature mokrega termometra in tlaka okolice. Poleg tega je odvisna še od psihrometske konstante in tlaka nasičenosti, ki sta tudi posredni funkciji. Meje pogreškov relativne vlažnosti smo izračunali za primer, da obravnavamo tlak nasičenosti in psihrometsko konstanto kot dve neodvisni veličini (nismo ju razvili po njunih funkcijskih odvisnostih od tlaka okolice in temperatur suhega ter mokrega termometra). S takšnim načinom lahko med drugim določimo vpliv natančnosti izračuna tlaka nasičenosti in psihrometske konstante na natančnost določitve relativne vlažnosti.

Uporabili smo kvadratični zakon o razširjanju pogreškov:

$$M_\varphi = \pm \left[\sum_{i=1}^r \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z_i} M_{z_i} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (8)$$

V enačbi (8) pomenijo M_φ – statistične meje pogreškov relativne vlažnosti, i – tekoči indeks, z – spremenljivko in M – meje pogreškov posameznih neposredno določenih veličin.

Za proučevanje mej pogreškov relativne vlažnosti smo združili enačbi (1) in (2):

$$\varphi = \frac{p_{nas,m} - A p_o (t_s - t_m)}{p_{nas,s}} \quad (9)$$

pri tem smo za tlak nasičenosti uporabili:

$$p_{nas,s} = p_{nas}(t_s) \quad (10)$$

$$p_{nas,m} = p_{nas}(t_m) \quad (11)$$

Posamezni parcialni odvodi v enačbi (8) imajo oblike:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial p_{nas,m}} = \frac{1}{p_{nas,s}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial p_{nas,s}} = \frac{A p_o (t_s - t_m) - p_{nas,m}}{(p_{nas,s})^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial A} = - \frac{p_o (t_s - t_m)}{p_{nas,s}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial p_o} = - \frac{A (t_s - t_m)}{p_{nas,s}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t_s} = - \frac{A p_o}{p_{nas,s}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t_m} = \frac{A p_o}{p_{nas,s}} \quad (17)$$

Če upoštevamo meje pogreškov posameznih veličin iz enačb (12) do (17), lahko za meje pogreškov relativne vlažnosti – po krajšem urejanju členov – zapišemo:

$$M_\varphi = \pm \left\{ \left[\frac{1}{(p_{nas,s})^2} + \left[\frac{A p_o (t_s - t_m) - p_{nas,m}}{(p_{nas,s})^2} \right]^2 \right] \times \right. \\ \times \left[M_{p_{nas}} \right]^2 + \left[\frac{-p_o (t_s - t_m)}{p_{nas,s}} M_A \right]^2 + \\ \left. + \left[\frac{-A (t_s - t_m)}{p_{nas,s}} M_{p_o} \right]^2 + 2 \left[\frac{p_o A}{p_{nas,s}} M_t \right]^2 \right\} \quad (18)$$

Pri tem smo predpostavili, da sta meji pogreškov za temperaturo mokrega in suhega termometra enaki in jo označili z M_t ; enako predpostavko smo naredili za meje pogreškov pri izračunavanju tlaka nasičenosti $M_{p_{nas}}$, ki znašajo:

$$M_{p_{nas}} = \pm 0,02 \% \quad (19)$$

Absolutne vrednosti mej pogreškov tlaka nasičenosti bomo za vsak določen primer izračunali pri srednji temperaturi.

Za merjenje tlaka okolice in temperatur predpostavimo :

$$M_{p_o} = \pm 0,1 \% \quad (20),$$

$$M_t = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21).$$

Za analizo vplivov posameznih veličin na meje pogreškov relativne vlažnosti smo izdelali računalniški program, izračunali vrednosti za nekaj primerov in rezultate vrisali v diagrame (slike 1 do 6). Vse slike veljajo pri standardnem barometriskem tlaku $1,01325 \cdot 10^5$ Pa. V delu [17] je delno prikazano, da pri višjih temperaturah zraka natančnost določitve psihrometske konstante zelo malo vpliva na natančnost izračuna relativne vlažnosti. Ker domnevamo, da je podobno tudi z drugimi veličinami, smo večino naslednjih analiz naredili pri nižjih temperaturah.

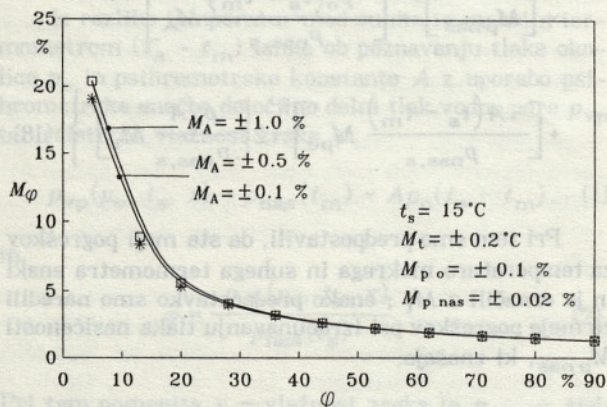
3.2 Vpliv mej pogreškov psihrometske konstante in tlaka nasičenosti

Za izračun tlaka nasičenosti priporočamo po [16] dva algoritma: prvi se najmanj razlikuje od referenčnih vrednosti, drugi pa je optimalen glede odstopkov in preprostosti zapisa. Meje pogreškov prvega smo že podali z enačbo (19), za drugega pa znašajo:

$$M_{p_{nas}} = \pm 0,15 \% \quad (22).$$

Na sliki 1 so prikazane odvisnosti mej pogreškov relativne vlažnosti glede na spreminjanje mej pogreškov psihrometske konstante: $M_A = \pm 0,1 \%$, $M_A = \pm 0,5 \%$, $M_A = \pm 1,0 \%$.

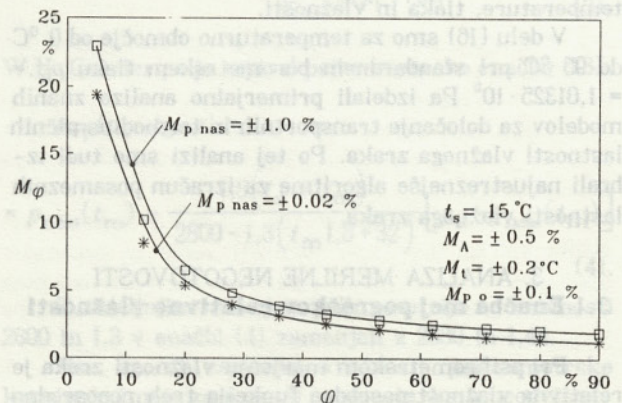
Krivulji za vrednosti M_φ se pri mejah pogreškov psihrometskih konstant $M_A = \pm 0,1 \%$ in $M_A = \pm 0,5 \%$ praktično ujemata in zato sta na sliki 1 vrisani samo krivulji za $M_A = \pm 0,1 \%$ in za $M_A = \pm 1,0$ odstotek.



Sl. 1. Vpliv mej pogreškov psihrometske konstante.

S slike 1 je razvidno, da meje pogreškov psihrometske konstante zelo malo vplivajo na meje pogreškov relativne vlažnosti (zato tudi ni potrebna nadaljnja analiza vpliva posameznih veličin na M_A). V obravnavanem primeru se obe krivulji pri $\varphi > 36,1 \%$ prekrivata. To pomeni, da je za izračun relativne vlažnosti za področje desno od $\varphi = 36,1 \%$ vseeno, ali uporabimo psihrometske konstante z mejami pogreškov $\pm 1,0 \%$ ali pa z $M_A = \pm 0,1 \%$. Za nadaljnje proučevanje smo predpostavili meje pogreškov psihrometske konstante $M_A = \pm 0,5$ odstotkov.

Krivulja vrednosti M_φ pri mejah pogreškov tlaka nasičenosti $M_{p_{nas}} = \pm 0,15 \%$ se praktično ujema s krivuljo M_φ pri $M_{p_{nas}} = \pm 0,02 \%$, zato na sliki 2 ni vrisana.



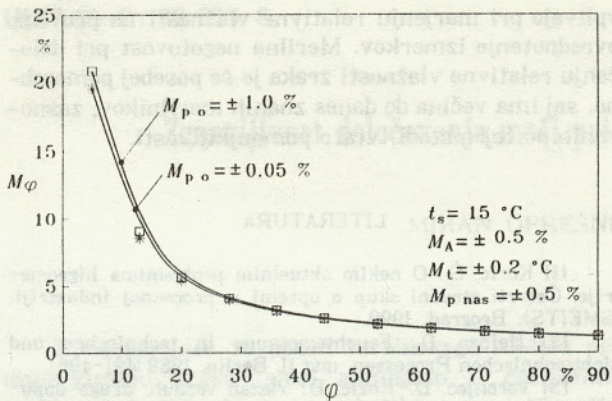
Sl. 2. Vpliv mej pogreškov tlaka nasičenosti.

Glede na sliko 2 ugotovimo, da so razlike med obema krivuljama na vsem območju relativnih vlažnosti približno enake. To pomeni, da imajo meje pogreškov tlaka nasičenosti na M_φ enak vpliv tako pri nižjih kakor tudi pri višjih vrednostih relativne vlažnosti (v nasprotju z M_A). Do hitrejšega naraščanja vpliva $M_{p_{nas}}$ na M_φ pride pri $M_{p_{nas}} > 0,5 \%$. Iz teh ugotovitev izhaja, da bi v primeru, ko bi želeli imeti čim preprostejši zapis psihrometske enačbe, lahko brez večjega odstopka uporabili za tlak nasičenosti algoritem, ki ga priporočamo za optimalnega glede preprostosti zapisa in natančnosti. Pri naslednjih analizah bomo upoštevali meje pogreškov tlaka nasičenosti, ki so določene z enačbo (22).

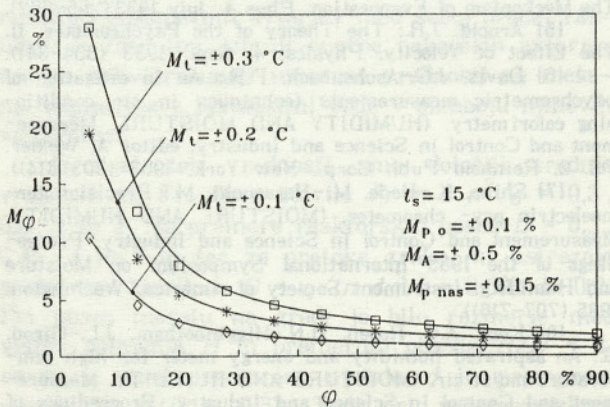
3.3 Vpliv mej pogreškov tlaka okolice in temperature

Za sliki 3 in 4 smo uporabili ugotovitve, ki izhajajo s slik 1 in 2 (vrednosti za $M_{p_{nas}}$ in M_A). Glede na predpostavljene vrednosti (enačbi (20) in (21)) smo meje pogreškov tlaka okolice in temperatur suhega oziroma mokrega termometra spreminjali v pozitivno in negativno smer.

Krivulja za meje pogreškov M_φ pri $M_{p_o} = \pm 0,1 \%$ se prekriva s krivuljo M_φ pri $M_{p_o} = \pm 0,05 \%$, zato na sliki 3 ni vrisana.



Sl. 3. Vpliv mej pogreškov tlaka okolice.



Sl. 4. Vpliv mej pogreškov temperature.

Za meje pogreškov tlaka okolice lahko glede na sliko 3 ugotovimo podobno kakor za meje pogreškov psihrometrške konstante, da pri relativnih vlažnostih nad 35 odstotkov praktično ne vplivajo na M_φ . Tudi pri nižjih relativnih vlažnostih je njihov vpliv zelo majhen. To pomeni, da pri merjenju tlaka okolice nima pomena pretiravati z natančnostjo in da lahko predpostavljene meje pogreškov tlaka okolice (enačba (20)) povsem zadovoljujejo.

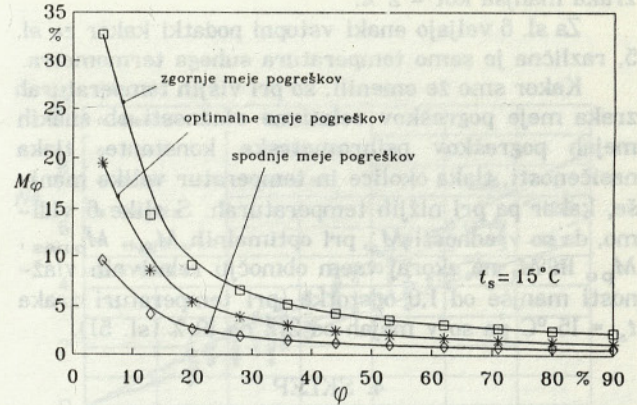
Kakor je bilo pričakovati, imajo na meje pogreškov relativne vlažnosti največji vpliv meje pogreškov temperature. S slike 4 je razvidno, da so spremembe M_φ skoraj linearno odvisne od spreminjanja M_t : če pri relativni vlažnosti $\varphi = 5,7\%$ povečamo M_t od $\pm 0,1\text{ °C}$ na $\pm 0,2\text{ °C}$ (za 100%), se M_φ povečajo od $\pm 10,2\%$ na $\pm 19,5\%$. Podobno velja za vse proučevano področje relativnih vlažnosti. Če primerjamo sliko 4 s slikami 1 do 3, vidimo, da M_φ pri spreminjanju M_A , $M_{p_{nas}}$, M_{p_o} samo malo nihajo okrog vrednosti za $M_t = \pm 0,2\text{ °C}$.

3.5 Vpliv temperature zraka

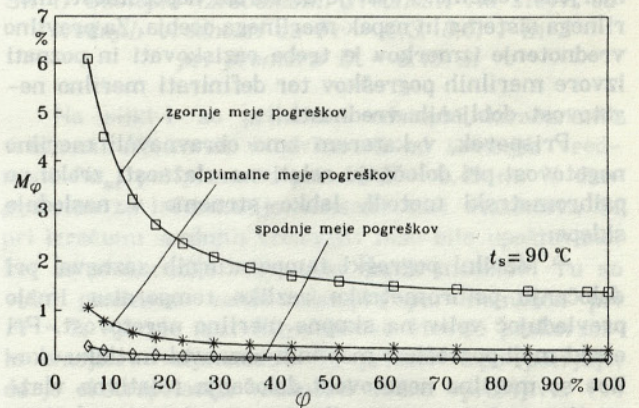
Na slikah 5 in 6 so narisane krivulje M_φ :

- za spodnje meje pogreškov: $M_{p_{nas}} = \pm 0,02\%$,
 $M_A = \pm 0,1\%$,
 $M_{p_o} = \pm 0,05\%$,
 $M_t = \pm 0,1\text{ °C}$,

- za optimalne meje pogreškov: $M_{p_{nas}} = \pm 0,15\%$,
 $M_A = \pm 0,5\%$,
 $M_{p_o} = \pm 0,1\%$,
 $M_t = \pm 0,2\text{ °C}$,
- za zgornje meje pogreškov: $M_{p_{nas}} = \pm 1,0\%$,
 $M_A = \pm 1,0\%$,
 $M_{p_o} = \pm 1,0\%$,
 $M_t = \pm 0,3\text{ °C}$.



Sl. 5. Meje pogreškov relativne vlažnosti pri nižjih temperaturah zraka.



Sl. 6. Meje pogreškov relativne vlažnosti pri višjih temperaturah zraka.

Iz primerjave slik 4 in 5 vidimo, da je na sliki 5 zgornja krivulja višja in spodnja nižja kakor na sliki 4. Te razlike med M_φ so zaradi razlik med M_A , $M_{p_{nas}}$ in M_{p_o} . Razlike v M_φ , ki nastanejo zaradi spreminjanja M_t , so zelo majhne. Iz tega lahko znova sklepamo, da imajo na meje pogreškov relativne vlažnosti največji vpliv meje pogreškov temperature.

To domnevo smo v delu [18] ob določanju absolutne vlažnosti zraka v dvofaznem toku potrdili tudi s preizkusi. Za temperaturna merilna zaznavala smo uporabili verigo termoelementov NiCr - CuNi debeline 0,25 mm, tipa K z visokov stopnjo stabilnosti in linearnosti. Z vezavo termoelementnih zaznaval v verigo pa je doseženo večkratno povečanje občutljivosti izhodnega merilnega signala. Ob teh pogojih dosežena meja pogreškov pri določanju psihrometrške temperature razlike ni bila večja kot $\pm 0,2\text{ °C}$.

Za hitrosti toka zraka od 0,4 m/s do 4,0 m/s je znašala vrednost psihrometske konstante od $A = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ do $A = 6,24 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Merilna negotovost tako zasnovanega merilnega sistema je določena z umerjanjem po absolutni metodi na podlagi referenčnega spektroskopskega higrometra. V obravnavanem področju merjenih parametrov je bila skupna merilna negotovost pri določanju vlažnosti zraka manjša kot $\pm 2 \%$.

Za sl. 6 veljajo enaki vstopni podatki kakor za sl. 5, različna je samo temperatura suhega termometra.

Kakor smo že omenili, so pri višjih temperaturah zraka meje pogreškov relativne vlažnosti ob enakih mejah pogreškov psihrometske konstante, tlaka nasičenosti, tlaka okolice in temperatur veliko manjše, kakor pa pri nižjih temperaturah. S slike 6 vidimo, da so vrednosti M_{φ} pri optimalnih M_A , $M_{p_{nas}}$, M_{p_0} in M_t na skoraj vsem območju relativnih vlažnosti manjše od 1,0 odstotka (pri temperaturi zraka $t_s = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ pa so v mejah od 2 % do 19 % (sl. 5)).

4. SKLEP

Merilni pogreški so odstopki od prave vrednosti merjene veličine. Pojavijo se zaradi nepopolnosti merilnega sistema in napak merilnega osebja. Za pravilno vrednotenje izmerkov je treba raziskovati in poznati izvore merilnih pogreškov ter definirati merilno negotovost dobljenih vrednosti.

Prispevek, v katerem smo obravnavali merilno negotovost pri določanju relativne vlažnosti zraka po psihrometrijski metodi, lahko strnemo v naslednje sklepe:

– Merilni pogreški temperaturnih zaznaval pri določanju psihrometske razlike temperatur imajo prevladujoč vpliv na skupno merilno negotovost. Pri enaki meji pogreškov merilnih zaznaval in tlaku okolice se merilna negotovost določanja relativne vlažnosti povečuje z zmanjšanjem vrednosti relativne vlažnosti ter temperature suhega termometra.

– Vpliv mej pogreškov psihrometske konstante in tlaka nasičenosti je na meje pogreškov relativne vlažnosti zanemarljiv. Meje pogreškov psihrometske konstante torej ne povzročajo bistvenih pogreškov pri določanju relativne vlažnosti zraka. Razmere postanejo drugačne le v primeru, kadar imamo relativno majhne ali neustrezne hitrosti toka zraka ob mokrem termometru. Zato ne moremo uporabljati psihrometrov, ki ne delujejo pri za njih ustrezni hitrosti toka zraka.

– Vpliva drugih pogreškov, npr. merilnega pogreška zaradi sevanja ter pogreška zaradi dovoda toplote na mokri termometer, nismo proučevali. Velikost vpliva teh pogreškov na skupno merilno negotovost je odvisna predvsem od tehnične izvedbe posameznega psihrometra.

Obravnavani model, podan v tem prispevku, omogoča raziskavo vpliva najpomembnejših dejavnikov, ki

vplivajo pri merjenju relativne vlažnosti na pravilno ovrednotenje izmerkov. Merilna negotovost pri določanju relativne vlažnosti zraka je še posebej pomembna, saj ima večina do danes znanih merilnikov, zasnovanih po tej metodi, vrsto pomanjkljivosti.

LITERATURA

[1] Kozić, Š.: O nekim aktualnim problemima higrometrije. Četvrti stručni skup o opremi u procesnoj industriji. (SMEITS). Beograd, 1990.

[2] Heinze, D.: Feuchtemessung in technischen und nichttechnischen Prozessen, msr II, Berlin, 1989 (491-495).

[3] Voronjec, D.-Kozic, Đ: Vlažan vazduh, drugo dopunjeno i prerađeno izdanje. Naučna knjiga, Beograd, 1990.

[4] Arnold, J.H.: The Theory of the Psychrometer. I. The Mechanism of Evaporation, Phys. 4, July 1933 (255-262).

[5] Arnold, J.H.: The Theory of the Psychrometer. II. The Effect of Velocity, Physics, 4, Sept. 1933 (334-341).

[6] Davis, J.C.-Aschenbach, P.R.: An investigation of psychrometric measurements techniques in air conditioning calorimetry. (HUMIDITY AND MOISTURE, Measurement and Control in Science and Industry, editor A. Wexler, Vol. 2, Reinhold Publ. Corp., New York, 1963 (303-314)).

[7] Shiba, K.-Ueda, M.-Haraguchi, M.: Precision thermoelectric psychrometer, (MOISTURE AND HUMIDITY, Measurement and Control in Science and Industry, Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity, Instrument Society of America, Washington, 1985 (707-716)).

[8] Kent, A.C.-Rosen, H.N.-Higginbotham, J.L.-Girod, G.: An aspirated humidity and energy meter for high temperature moist air. (MOISTURE AND HUMIDITY, Measurement and Control in Science and Industry, Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity, Instrument Society of America, Washington, 1985 (989-996)).

[9] Berlinger, P.: Psychrometrie, Verlag C.F.Müller, Karlsruhe, 1979.

[10] Mesch, F.: Meßtechnisches Praktikum für Maschinenbauer und Verfahrens Techniker, 2. Auflage, Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1977.

[11] Hofmann, W.M.: Auswertungsgenauigkeit psychrometrischer messungen, HLH 28, Nr.8/1977 (287-288).

[12] Carr-Brion, K.: Moisture sensors in process control, Elsevier Applied Science Publishers LTD, London, 1986.

[13] Davis, J.C.: Detailed discussion of the dry and wet bulb psychrometer, (ASHRAE BROCHURE ON PSYCHROMETRY American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, INC., New York, 1977).

[14] Harrison, L.P.: Some fundamental considerations regarding psychrometry, (HUMIDITY AND MOISTURE, Measurement and Control in Science and Industry, Ed. A. Wexler, Vol. 3, Reinhold Publ. Corp., New York, 1963 (71-104)).

[15] Perovnik, J.: Termodinamična analiza psihrometra, Diplomski naloga visokošolskega študija, FS v Ljubljani, 1990.

[16] Perovnik, J.: Analiza modelov za določanje termodinamičnih in transportnih lastnosti vlažnega zraka, Delo po razpisu odbora za Prešernove nagrade študentom, Lj. 1989.

[17] Bindon, H.H.: A critical review of tables and charts used in psychrometry, (HUMIDITY AND MOISTURE, Measurement and Control in Science and Industry, editor A. Wexler, Vol. 1, Reinhold Publ. Corp., New York, 1963 (3-16)).

[18] Bajsić, I.: Istraživanje fenomena indukcije u dvo-faznom toku, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerzitetu u Sarajevu, Sarajevo, 1990.

Naslov avtorjev: dr. Ivo Bajsić, dipl.inž.

Janko Perovnik, dipl.inž.

Fakulteta za strojništvo

Murnikova 2, Ljubljana

Prispelo: 15.11.1990 Recenzirano: 30.1.1991