

Molijerov h-x dijagram

Mr Drago Goli, dipl. inž.,
IMF, Avtomatika, 61000 Ljubljana,
Jožeta Jame 16

Cilj ovog članka nije upoznavanje stručnjaka iz oblasti klimatizacije sa fizikalnim tumačenjima Molijerovog h-x dijagrama za homogenu smešu suvog vazduha i vodene pare, već sa polaznim tačkama potrebnim za razvoj savremenog računarskog slovno-brojčanog programa, koji bi bio sastavni deo grafičkog ekspertnog računarskog sistema.

Uvod

Na tržištu ima mnogo računarskih programa za Molijerov h-x dijagram, ali je malo onih koji bi omogućili:

- višesmerno uporedno izračunavanje jednačina,
- sprečavanje nemogućih i nelogičnih podataka već u fazi unošenja podataka,
- dijagnostičiranje grešaka pri unošenju i u toku izvođenja numeričkog izračunavanja jednačina,
- nadgradnju i udruživanje sa grafičkim računarskim programima.

Određivanje stanja vlažnog vazduha

Stanje vlažnog vazduha može se odrediti sa najmanje dve nezavisne veličine, koje na datom atmosferskom pritisku biramo za opštu inženjersku praksu među veličinama t , t_m , t_r , h , x , φ , ρ i p_p . Oznake imaju sledeća značenja:

- t — temperatura suvog termometra u °C,
- t_m — temperatura vlažnog termometra u °C,
- t_r — temperatura rošenja vazduha u °C,
- h — specifična entalpija vazduha u kJ/kg,
- x — apsolutna vlažnost vazduha u g/kg,
- φ — relativna vlažnost vazduha u % r. v,
- ρ — gustina vazduha u kg/m³ i
- p_p — parcijalni pritisak vodene pare u kPa.

Veličine su prikazane i na slici 1. Nazivamo ih bazom podataka. Ova baza u našem slučaju omogućava odabiranje dveju proizvoljnih veličina kao ulaznih podataka, gde su svi ostali podaci izlazni. Možemo da odaberemo 28 ovakvih dvojnika, što odgovara broju kombinacija od

osam elemenata po dva zajedno, a stvarno ih ima samo 25, pošto su veličine t_r , x i p_p međusobno zavisne.

Za ovakav način unošenja ulaznih podataka mora postojati računarski program visoko modularnog stepena, što znači 25 potprograma, odnosno 25 različitih istovremeno numeričkih proračuna matematičkog modela, čiji su nazivi prikazani u tabeli 1.

Postoji nekoliko ovakvih veličina vlažnog vazduha, koje nisu pogodne za uključivanje u bazu podataka, pošto bi samo povećale broj kombina-cijskih mogućnosti pri unošenju podataka. Kao samo ulazni podatak je ovakva veličina: p_{atm} — atmosferski pritisak u kPa.

Kao isključivo izlazni podaci su veličine:

- p — parcijalni pritisak vazduha u kPa,
- h_p — entalpija vodene pare u kJ/kg,
- h_v — entalpija vode ili leda u kJ/kg i
- p'_p — parcijalni pritisak vodene pare zasićenog vazduha u kPa.

Matematički model

Povezivanje pojedinih veličina vlažnog vazduha zasniva se na tri osnovna načela:

- zakonu o idealnom gasu,
- Daltonovom zakonu o smeši idealnih gasova i
- Prvom zakonu termodinamike.

Tabela 1.

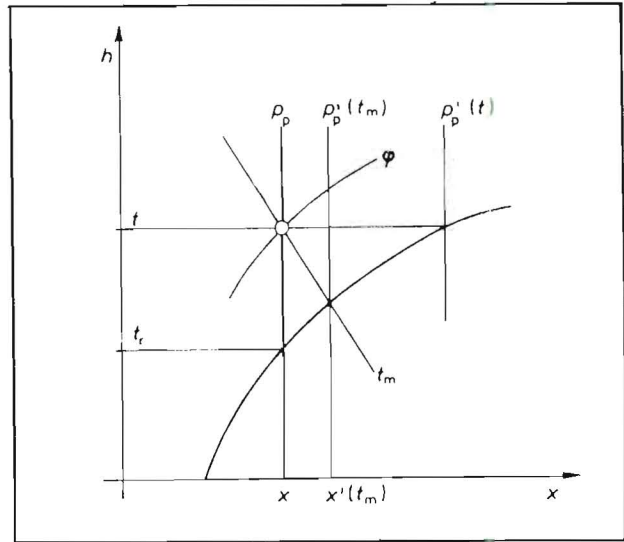
	t_m	t_r	h	x	φ	ρ	p_p
t	$t - t_m$	$t - t_r$	$t - h$	$t - x$	$t - \varphi$	$t - \rho$	$t - p_p$
t_m		$t_m - t_r$	$t_m - h$	$t_m - x$	$t_m - \varphi$	$t_m - \rho$	$t_m - p_p$
t_r			$t_r - h$		$t_r - \varphi$	$t_r - \rho$	
h				$h - x$	$h - \varphi$	$h - \rho$	$h - p_p$
x					$x - \varphi$	$x - \rho$	
φ						$\varphi - \rho$	$\varphi - p_p$
ρ							$\rho - p_p$

Na osnovu ovih načela izradićemo matematički model samo do onog stepena tačnosti, koji je potreban u inženjerskoj praksi u klimatizaciji. Znamo, naime, da apsolutni parcijalni pritisak vodene pare pri pretvaranju vlažnog vazduha retko prelazi 4 kPa. Takođe i gustina zasićene vodene pare već pri 50°C samo sa 0,5% odstupanja prati zakon idealnog gasa, a pri 20°C greška iznosi 0,07%. Slična je takođe entalpija. Tu je odstupanje pri 50°C samo 0,06%, a pri 20°C greška tj. odstupanje se gubi. Specifična toplota se u vrlo širokom rasponu, između 70°C i 125°C, skoro i ne menja.

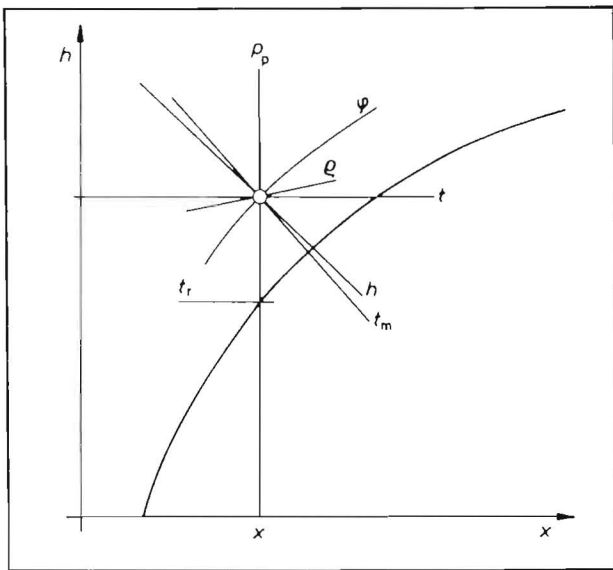
U produžetku sledi takav matematički model, da je svaka jednačina po potrebi modela izvedena sa više promenljivih, koje sadrži. Svakako redosled jednačina sa određenim ulaznim podaci-

Tabela 2.

Ulazni podatak	Jedinice	Dozvoljeno od	Područje do	Dozvoljeno 0	Dozvoljeno < 0
t	°C	-39	150	da	da
p_{atm}	kPa	7	345	ne	ne
φ	% r. v.	0	100	da	ne
x	kg/kg	~ 0	0,2	da	ne
t_m	°C	-39	150	da	da
h	kJ/kg	-38,8	706	da	da
ρ	kg/m ³	0,08	5,14	ne	ne
p_p	kPa	1,7	p_{atm}	ne	ne
t_r	°C	-39	150	da	da
p'_p	kPa	0,00187	256,73	ne	ne



SI. 2.

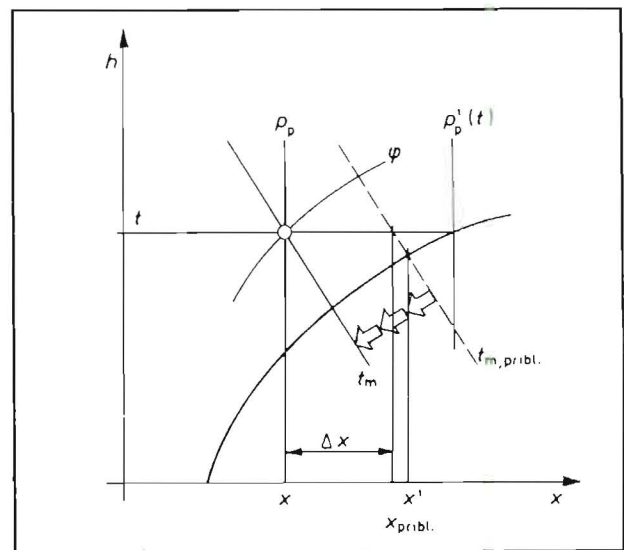


SI. 1.

ma, nije uvek analitički moguće rešiti. Ipak, za numeričke proračune nećemo dati rešenja, pošto su ona poznata. Osnovne osobine, koje se u suštini ne menjaju su unete sa numeričkom vrednošću.

Tabela 3.

Ulazni podatak	Jedinica	Logična verifikacija (dozvoljeno)	Jednačina	Konstatacija
t_m	°C	$t_m \leq t$		$t_m > t$
t_r	°C	$t_r \leq t$		$t_r > t$
t	°C	$t(p_p, \rho) < 150^\circ\text{C}$	8.3.	$t > 150^\circ\text{C}$
h	kJ/kg	$h < h(t, x'(t))$	7.1.	$h > h'$
h	kJ/kg	$h < h(x, t = 150^\circ\text{C})$	7.1.	$h \gg$
h	kJ/kg	$h < h(x(p_p), t = 150^\circ\text{C})$	2.1.	$h \gg$
ρ	kg/m ³	$\rho > \rho(t, p'_p(t))$	8.1.	$\rho < \rho'$
x	kg/kg	$x < x'(t)$	1.1.+2.1.	$x > x'$
p_p	kPa	$p_p < p'_p(t)$	1.1.	$p_p > p'_p$
φ	% r. v.	$\varphi > \varphi(x, t = 150^\circ\text{C})$		$\varphi \ll$
φ	% r. v.	$\varphi > \varphi(x(p_p), t = 150^\circ\text{C})$		$\varphi \ll$



SI. 3.

1.1. Parcijalni pritisak vodene pare zasićenog vazduha

$$t < 0 \quad p'_p = 3,61633\text{E}9 \exp(-6150,6/(t + 273,33))$$

$$t \geq 0 \quad p'_p = 1,40974\text{E}7 \exp(-3928,5/(t + 231,667))$$

1.2. Temperatura rošenja vazduha

$$p'_p < p'_p(t=0): t_1 = \frac{-6150,6}{\ln \frac{p'_p}{3,61633E9}} - 273,33$$

$$p'_p \cong p'_p(t=0): t_1 = \frac{-3928,5}{\ln \frac{p'_p}{1,40974E7}} - 231,667$$

Tabela 4.

Izračunavanje veličina	Nije dozvoljeno	Konstatacija	Oznaka jednačina
$p'_p(t) =$			1.1.
$p'_p(t_m) =$			1.1.
$x'(p_{atm}, p'_p(t_m)) =$	$= 0$ < 0	$x' = 0$ ili $p'_p = p_{atm}$ t_m suviše visok	2.1.
$h_p(t) =$			3.1.
$h_p(t_m) =$			3.1.
$h_v(t_m) =$			4.1.
$x(x'(t_m), t_m, t, h_p, h_v) =$	< 0 > 200	t_m suviše nizak x prevelik	5.1.
$p_p(x, p_{atm}) =$			2.2.
$\varphi(p_p, p'_p(t)) =$	> 100 $x = 0$	$t_m > t$ t_r neodređeno	6.1.
$p'_p(t_m = 0) =$			1.1b
$t_r(p_p) =$		1.2a ili 1.2b	
$x = x \cdot 1000$			
$h(t, x) =$			7.1.
$\rho(p_{atm}, p_p, t) =$			8.1.

2.1. Apsolutna vlažnost vazduha

$$x = 0,622 \frac{p_p}{p_{atm} - p_v}$$

2.2. Parcijalni pritisak vodene pare

$$p_p = p_{atm} \frac{x}{x + 0,622}$$

3.1. Entalpija vodene pare

$$h_p = 2501 + 1,863 t$$

4.1. Entalpija vode

$$t < 0 \quad h_v = -334 + 1,955 t$$

$$t \geq 0 \quad h_v = 4,1868 t$$

5.1. Apsolutna vlažnost vazduha

$$x = \frac{x'(t_m) [h_p(t_m) - h_v(t_m)] + 1,0048 (t_m - t)}{h_p(t) - h_v(t_m)}$$

6.1. Relativna vlažnost vazduha

$$\varphi = 100 p_p(t) / p'_p(t)$$

6.2. Parcijalni pritisak vodene pare

$$p_p(t) = p'_p(t) \varphi / 100$$

6.3. Parcijalni pritisak vodene pare zasićenog vazduha

$$p'_p(t) = p_p(t) 100 / \varphi$$

7.1. Entalpija vazduha

$$h = 1,0048 t + x (2501 + 1,863 t)$$

7.2. Apsolutna vlažnost vazduha

$$x = (h - 1,0048 t) / (2501 + 1,863 t)$$

7.3. Temperatura vazduha po suvom termometru

$$t = (h - 2501 x) / (1,0048 + 1,863 x)$$

8.1. Gustina vazduha

$$\rho = 1000 (p_{atm} - p_p) / [286,7 (t + 273,15)] - 1,32 \cdot p_p / (t + 273,15)$$

8.2. Parcijalni pritisak vodene pare

$$p_p = [(1000 p_{atm} - \rho 286,7 (t + 273,15))] / 1378,4444$$

8.3. Temperatura vazduha po suvom termometru

$$t = [(3,48797 p_{atm} - 4,80797 p_p) / \rho] - 273,15$$

Određivanje grešaka

Kao što smo već napomenuli, mora savremeni program računara biti pre svega u stanju da prenosi poruke i mora korisniku pružati mogućnosti provere ulaznih i izlaznih podataka, čak i među rezultate u toku samog modeliranja. Tako je u tabeli 2. prikazana provera ulaznih veličina, imajući u vidu dozvoljene granice, a u tabeli 3. se vidi deo logične provere s obzirom na međusobne zavisnosti ulaznih veličina. Provera u toku modeliranja je prikazana na primeru.

Potrebno je upozoriti i na to da faktor SHF nije upotrebljiv za ručna grafička rešenja u Mollièrovom h-x dijagramu, pošto je precizan samo u psihometrijskom dijagramu, koji se primenjuje u Americi. Za regulaciju uređaja za klimatizaciju oblast podataka nećemo oblikovati, jer je suviše obimna.

Primeri

Interesuje nas, kako na osnovu datih izraza izraditi pomenutih 25 potprograma. Pošto su načini više ili manje slični, pogledaćemo redosled izvođenja jednačina samo za dva potprograma. S obzirom na tabelu 1, veoma su pogodne relacije $t - t_m$ i $t - p_p$.

Na slici 2. je za potprogram $t - t_m$ prikazano nekoliko važnih veličina u Mollièrovom h-x dijagramu, a u tabeli 4. redosled izvođenja jednačina datog matematičkog modela, konstatacija i oznake jednačina. Jednačine su analitički rešive.

Na slici 3. je za potprogram $t - p_p$ isto tako prikazano nekoliko važnih veličina u Mollièro-

Sl. 4.

01•LBL "PSIH"	56 XEQ 03	111 XEQ 05	166 +	221 -3928.5	276 XEQ "0"	331 FC? 55
02 SF 03	57 "TWb>"	112 RCL 08	167 RTN	222 X<>Y	277 RCL 07	332 GTD 05
03 "CF 03; 2 TWb"	58 X<0?	113•LBL 00	168•LBL 05	223 /	278 1 E3	333 FC? 21
04 PROMPT	59 PROMPT	114 XEQ 03	169 STD 08	224 E^X	279 ‡	334 GTD 05
05•LBL 0	60 XEQ 04	115 "PP>P"	170 RCL 06	225 1.40974 E7	280 FIX 2	335 XEQ "PRA"
06 0	61 "TWb<"	116 X<0?	171 /	226 ‡	281 "X, G/KG="	336 RTN
07 STD 00 06	62 X<0?	117 PROMPT	172 ‡	227 RTN	282 ARCL X	337•LBL 05
08 ADV	63 PROMPT	118 STD 07	173 X<>Y	228•LBL 00	283 XEQ "0"	338 PROMPT
09 101.325	64 STD 07	119 1.2	174 X<Y?	229 RDN	284 FIX 1	339 .END.
10 STD 01	65 1.2	120 "X>200"	175 PROMPT	230 273.33	285 "RY, %="	
11 FIX 3	66 "X>200"	121 X<=?	176 1 E2	231 +	286 ARCL 04	
12 "F, KPa"	67 X<Y?	122 PROMPT	177 ‡	232 -6150.6	287 XEQ "0"	
13 XEQ "IN"	68 PROMPT	123 FC? 03	178 STD 04	233 X<>Y	288 RCL 02	
14 "F="	69 RDN	124 GTD 18	179 RTN	234 /	289 1.0048	
15 ARCL 0:	70 RCL 01	125 80	180•LBL 08	235 E^X	290 ‡	
16 FC? 55	71 ‡	126 STD 09	181 FIX 1	236 3.61633 E9	291 0	
17 XEQ "0"	72 RCL 07	127 CF 02	182 "TWb, ET="	237 ‡	292 RCL 02	
18•LBL E	73 .622	128•LBL 01	183 ARCL 03	238 RTN	293 XEQ 06	
19 BEEP	74 +	129 RCL 09	184 XEQ "0"	239•LBL 03	294 FIX 2	
20 1	75 /	130 FC? 02	185•LBL 18	240 "XNAS OR PP=P"	295 RCL 07	
21 STD 00	76 "TWb>Tab"	131 CH5	186 RCL 08	241 .622	296 ‡	
22 ADV	77 XEQ 05	132 ST- 00	187 X<0?	242 X<>Y	297 +	
23 FIX 1	78 GTD 18	133 2	188 GTD 09	243 ‡	298 "H, KJ/KG="	
24 "Tdb, ST"	79•LBL C	134 ST/ 09	189 0	244 RCL 01	299 ARCL X	
25 XEQ "IN"	80 3	135 RCL 03	190 XEQ F	245 LASTX	300 XEQ "0"	
26 "F="	81 STD 00	136 XEQ F	191 X>Y?	246 -	301 RCL 02	
27 ARCL 02	82 FIX 1	137 XEQ 03	192 STD 00	247 X=0?	302 273.15	
28 FC? 55	83 "RY, %"	138 X<0?	193 RCL 08	248 PROMPT	303 +	
29 XEQ "0"	84 XEQ "IN"	139 GTD 01	194 1.40974 E7	249 /	304 286.7	
30 XEQ F	85 "F="	140 XEQ 04	195 /	250 RTN	305 ‡	
31 SF 27	86 ARCL X	141 RCL 07	196 LN	251•LBL 04	306 RCL 01	
32 STD 05	87 ADV	142 -	197 1/X	252 RCL 03	307 RCL 08	
33 FIX 3	88 FC? 55	143 X<0?	198 -3928.5	253 RCL 03	308 -	
34 "P"	89 XEQ "0"	144 SF 02	199 ‡	254 XEQ 06	309 /	
35 39	90 RCL 02	145 ABS	200 231.657	255 ‡	310 1/X	
36 XTOA	91 STD 03	146 1 E-5	201 -	256 RCL 03	311 1 E3	
37 "F, KPa="	92 XEQ F	147 X<Y?	202 GTD 11	257 RCL 02	312 ‡	
38 ARCL 06	93 X<>Y	148 GTD 01	203•LBL 00	258 -	313 "RD, KG/M3="	
39 XEQ "0"	94 %	149 GTD 08	204 RCL 08	259 1.0048	314 ARCL X	
40•LBL 22	95 STD 08	150•LBL 06	205 3.24506 E8	260 ‡	315 XEQ "0"	
41 "Wb T % P PP"	96 GTD 00	151 1.8631	206 /	261 +	316 GTD 8	
42 PROMPT	97•LBL E	152 ‡	207 LN	262 RCL 03	317•LBL "IN"	
43 GTD 22	98 RCL 02	153 2501	208 1/X	263 RCL 02	318 1	
44•LBL A	99 STD 03	154 +	209 -6150.6	264 XEQ 06	319 ST+ 00	
45 2	100 FIX 3	155 X<>Y	210 ‡	265 /	320 RCL IND 00	
46 STD 00	101 7	156 X<0?	211 273.33	266 RTN	321 "F="	
47 FIX 1	102 STD 00	157 XEQ 07	212 -	267•LBL 11	322 ARCL IND 00	
48 "TWb, ST"	103 "PP, KPa"	158 4.1888	213 GTD 11	268 FIX 1	323 "F?"	
49 XEQ "IN"	104 XEQ "IN"	159 ‡	214•LBL F	269 "Tdb, ST="	324 CF 21	
50 "F="	105 "F="	160 -	215 0	270 ARCL X	325 AVIEW	
51 ARCL X	106 ARCL X	161 RTN	216 X>Y?	271 XEQ "0"	326 SF 21	
52 ADV	107 ADV	162•LBL 07	217 GTD 00	272•LBL 09	327 STOP	
53 FC? 55	108 FC? 55	163 .467	218 RDN	273 FIX 3	328 STD IND 00	
54 XEQ "0"	109 XEQ "0"	164 ‡	219 231.667	274 "PP, KPa="	329 RTN	
55 XEQ F	110 "PP>PP/Tdb"165	-79.97556	220 +	275 ARCL 08	330•LBL "0"	

vom h-x dijagramu. Za ovaj potprogram nećemo prikazivati redosled izvođenja jednačina, ali je potrebno napomenuti da jednačine nisu analiti-

čki već numerički rešive (izračunavanje samo približno).

Listing program za džepni računar HP41CV je prikazan na slici 4.

Zaključak

Stručnjak za klimatizaciju i automatizaciju će biti iznenađen mogućnostima ovako zasnovanog programa za proračun veličina stanja vlažnog vazduha, pošto će moći na datom atmosferskom pritisku odnosno pri datoj nadmorskoj visini izvoditi analize, koje inače ne bi bile moguće.

Osnivači ekspertnih računarskih programskih sistema će moći program dopuniti do stepena kada će putem promene vlažnog vazduha moći za datu klimatizacionu zonu i date temperature i tolerancije vlažnosti u klimatizovanom prostoru automatizovati izbor klimatizacionog sklopa i uređaja za klimatizaciju. Tu će naići na novu oblast podataka i to:

- grejnu toplotu,
- rashladnu toplotu,
- toplotu za sušenje pri hlađenju,
- toplotu pri hemijskom sušenju,
- eksploataciju adijabatskog vodenog vlaženja,
- eksploataciju neadijabatskog vodenog vlaženja,
- entalpijsku razliku parnog vlaženja,
- koeficijent smera $\Delta h/\Delta x$,
- faktor SHF.

Literatura

- [1] GOLI, D.: *Avtomatizacija klimatizacijskih naprav*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1986.
-