$$\cot \xi = \frac{4\,\Theta^2}{\sin 2\,\omega} \cdot$$

$$\cdot \frac{\sqrt{\Theta^4 + (1 - 2\,\Theta^2)\cos^2\omega}}{\sqrt{\Theta^4 + (1 + 2\,\Theta^2)\cos^2\omega} - \sqrt{\Theta^4 + (1 - 2\,\Theta^2)\cos^2\omega}} +$$

$$+ 2\,\frac{\Theta^2 - \cos^2\omega}{\sin 2\,\omega}$$

Strukturni kot je potem:

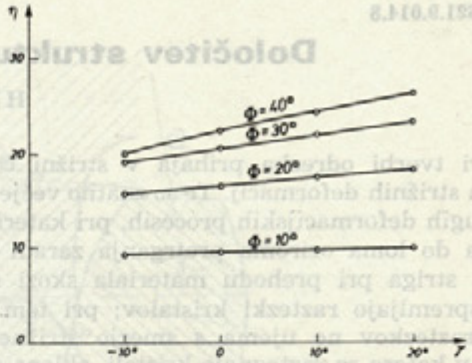
$$\psi = \eta + \xi$$

Nekatere vrednosti strukturnega kota ψ za razne cepilne kote γ in kote strižne cone Φ so zbrane v razpredelnici 1 in prikazane v diagramu na sliki 3.

Razpredelnica 1. *Teoretične vrednosti za strukturni kot*

γ \ φ	10°	20°	30°	40°
— 10°	9° 10′	15° 31′	18° 56′	20° 0′
0°	9° 27′	16° 22′	20° 27′	22° 17′
10°	9° 43′	17° 11′	21° 50′	24° 15′
20°	10° 0′	18° 2′	23° 10′	26° 5′

Številčne vrednosti, dobljene po zgornjih izvajanjih, so precej blizu vrednostim po lit. [1], vendar so od njih nekaj večje. Dejanske vrednosti, ki bi jih dobili z meritvami, bodo gotovo teoretičnim vrednostim zelo blizu (kolikor so natančne meritve sploh izvedljive), ker so z modelom po sliki 2 bile privzete samo naslednje poenostavitve :



Slika 3

1. Vsi premiki delcev potekajo izključno v strižni coni, za katero se predpostavlja, da je omejena na ravnino.

2. Ni upoštevano zastajanje materiala odrezka pred rezalnim robom in zaradi trenja na cepilni ploskvi.

Če bi upoštevali še to, da oba zgornja pogoja nista strogo izpolnjena, bi se strukturni kot verjetno še za nekaj malega povečal in je zato opisani način določitve strukturnega kota najbrž bližji dejanskim vrednostim kakor po načinu, opisanem v lit [1].

LITERATURA

[1] M. Kronenberg: Grundzüge der Zerspanungslehre I, Springer-Verlag, 1954.

[2] G. Vieregge: Zerspanung der Eisenwerkstoffe, Verlag Stahleisen, 1970.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Hinko Muren, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

UDK 518.5:681.3:536.71

Izračun termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare z elektronskim računalnikom

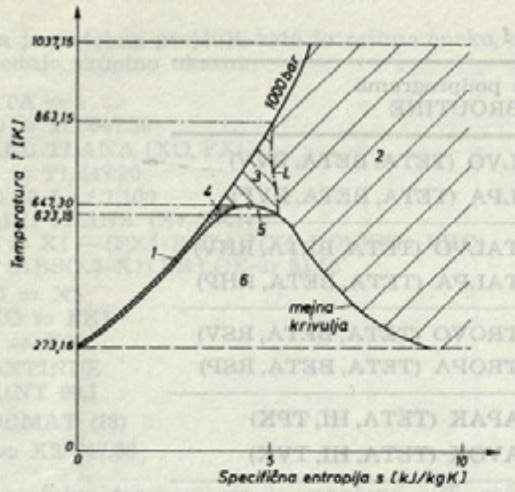
MIRKO OPARA

1. IZBIRA ENAČB

Z naraščajočo uporabo računalnikov v znanosti in tehniki se je večala potreba po določitvi enačb za izračun termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare, ki bi bile primerne za izdelavo tehničnih preračunov. V pomnilnik računalnika namreč ni mogoče zapisati celih parnih tabel, ker bi ga z njimi zasedli preveč; raba enačb, po katerih so bile izračunane tabele, pa bi bila za vsakdanjo rabo združena s predolgimi računskimi časi. Številni poskusi za določitev primernih enačb so imeli različna izhodišča in različen namen, zato so predlagane enačbe veljale samo na omejenih območjih agregatnih stanj in so med seboj povezovale različne veličine stanja. Njihova veljavnost ni bila splošno priznana.

Na šesti mednarodni konferenci o lastnostih vode in vodne pare, ki je bila leta 1963 v New Yorku, so izbrali skupino strokovnjakov, ki naj bi izdelala enačbe za izračun termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare, da bi bile primerne za rabo na računalnikih. Skupina se je imenovala: »International Formulation Committe« (IFC). Sestavljali so jo zastopniki naslednjih držav: Češkoslovaške, Japonske, Velike Britanije, ZDA, ZSSR in Zvezne republike Nemčije. Skupina je izdelala sistem enačb za izračun lastnosti vode in vodne pare, ki so ga leta 1968 sprejeli člani šeste mednarodne konference in ga priznali za mednarodno veljavnega. Ta sistem enačb je znan z nazivom »The 1967 IFC Formulation for Industrial Use«. Osnovan je na kanoničnih funkcijah. Vsak enostaven termodinamični sistem je določen z eno samo kanonično funkcijo, npr.: s prosto entalpijo kot funkcijo tlaka in temperature ali s prosto energijo kot funkcijo volumna in temperature. Z odvajanjem kanonične funkcije po ustrezni spremenljivki (temperaturi, tlaku, volumnu) dobimo izraze za entalpijo, entropijo in ostale kalorične veličine stanja. S tem je avtomatično zajamčena termodinamična konsistenca vseh podatkov.

Delo »The 1967 IFC Formulation for Industrial Use« podaja lastnosti vode in vodne pare v obsegu tlakov od idealnega plinastega stanja pri tlaku 0 bar do 1000 bar in v obsegu temperatur od 273,16 K (0,01 °C) do 1073,15 K (800 °C). Celotni obseg je razdeljen na dva dela (sl. 1). Spodnji del sega na strani vode do izoterme 623,15 K (350 °C), na strani pare pa do krivulje L, zgornji del pa vključuje kritično točko in je omejen z izotermo 623,15 K, krivuljo L in izobaro 1000 bar. V spod-



Sl. 1. *Prikaz posameznih območij v diagramu T, s*

njem delu (območja 1, 6 in 2 na sl. 1) je za kanonično funkcijo izbrana prosta entalpija kot funkcija tlaka in temperature, v zgornjem delu (območja 3, 4 in 5 na sl. 1) pa prosta energija kot funkcija volumna in temperature. Zaradi tega so tudi ostale veličine stanja v spodnjem delu funkcije temperature in tlaka, v okolici kritične točke (zgornji del) pa funkcije temperature in volumna. Podani sta še odvisnost tlaka od temperature nasičenosti (mejna krivulja) in enačba za krivuljo L.

Enačbe med seboj povezujejo reducirane veličine stanja in so tako neodvisne od izbire sistema enot. Posamezne reducirane veličine so:

$\zeta = g/(p_{cl} v_{cl})$	reducirana prosta entalpija
$\psi = f/(p_{cl} v_{cl})$	reducirana prosta energija
$\varepsilon = h/(p_{cl} v_{cl})$	reducirana entalpija
$\sigma = s/(p_{cl} v_{cl}/T_{cl})$	reducirana entropija
$\Theta = T/T_{cl}$	reducirana temperatura
$\beta = p/p_{cl}$	reducirani tlak
$\chi = v/v_{cl}$	reducirani volumen

Vrednosti karakterističnih konstantnih veličin za vodo in vodno paro so v SI sistemu enot naslednje:

— kritična točka: $T_{cl} = 647{,}30$ K
$p_{cl} = 221{,}20$ bar
$v_{cl} = 0{,}00317$ m³/kg
$p_{cl} v_{cl} = 70{,}1204$ kJ/kg
$p_{cl} v_{cl}/T_{cl} = 0{,}1083275143$ kJ/kg K

— trojna točka: $T_{tl} = 273{,}16$ K
$p_{tl} = 0{,}006112$ bar

Z indeksom 1 so označene vse konstantne veličine, ki so jih udeleženci šeste mednarodne konference o lastnostih vode in vodne pare sprejeli za trenutno najboljše ocene stvarnih vrednosti.

Po sklepu pete mednarodne konference o lastnostih vode in vodne pare leta 1956 v Londonu je bila za izhodišče merjenja entropije in proste energije izbrana kapljevita voda v trojni točki:

$$s_{ft} = 0 \quad \text{in} \quad f_{ft} = 0$$

Ker velja:

$$h = f + pv + Ts$$

je entalpija kapljevite vode v trojni točki praktično tudi enaka nič:

$$h_{ft} = 0{,}0006 \text{ kJ/kg}$$

2. SISTEM PODPROGRAMOV

Po sistemu enačb, ki so predložene v delu »The 1967 IFC Formulation for Industrial Use« smo v FORTRANu sestavili podprograme za izračun lastnosti vode in vodne pare. Podprogrami so tipa SUBROUTINE. V njih se pojavljajo samo reducirane veličine stanja. Zaradi enostavnosti ne bomo pri vsakem imenu veličine poudarjali, da mislimo reducirano veličino, ampak si to zapomnimo.

Pregled podprogramov in odvisnosti, ki jih podajajo, je razviden iz razpredelnice 1.

V razpredelnici je navedeno tudi območje veljavnosti posamezne funkcije oziroma podprograma. Številke pomenijo številko območja, kakor je prikazano na sl. 1.

Odvisnost tlaka nasičenosti od temperature velja za celoten obseg skupno s kritično točko.

Neodvisne spremenljivke so v podprogramih označene s:

TETA — reducirana temperatura,

BETA — reducirani tlak,

HI — reducirani volumen.

Enačbe oziroma podprogrami, ki veljajo za vodo, veljajo tudi za spodnjo mejno krivuljo; enačbe oziroma podprogrami za paro pa veljajo tudi za zgornjo mejno krivuljo.

V enačbah za izračun termodinamičnih lastnosti vode in vodne pare se pojavljajo številne konstante. Vse konstante so izpisane na ustreznih mestih v podprogramih z enako natančnostjo kakor v izvirniku (10 številk). Podprogrami so med seboj popolnoma neodvisni. Uporabljamo jih lahko ločeno razen podprogramov za območje 4 (voda nad izotermo 350 °C), katere lahko uporabljamo samo skupaj s podprogrami za območje 3. Pri računanju veličine stanja v območju 4 rabimo tudi podprograme za izračun enake veličine stanja v območju 3. Enačbe za izračun veličin stanja v območju 4 so namreč sestavljene tako, da je ustreznim enačbam za območje 3 dodanih nekaj členov (glej priložene podprograme!).

Enačba krivulje L, ki na strani pare razmejuje območji 2 in 3, je:

$$\beta_L(\Theta) = L_o + L_1\Theta + L_2\Theta^2$$

kjer so:

$$L_o = 15{,}743\,733\,27$$
$$L_1 = -34{,}170\,619\,78$$
$$L_2 = 19{,}313\,807\,07$$

Nad izotermo 350 °C in krivuljo L so vse veličine podane kot funkcije temperature in volumna. Če izberemo temperaturo in tlak za neodvisni spremenljivki tudi v tem področju, moramo s podprogramom TLAVOK oziroma TLAPAK najprej poiskati ustrezni volumen, ki ga nato vstavljamo v ostale podprograme. Poiskati je treba torej tisti volumen χ, pri katerem je za konstantno temperaturo Θ vrednost izračunanega tlaka $\beta(\chi)$ enaka izbranemu konstantnemu tlaku β:

$$\beta - \beta(\chi) = 0$$

Iščemo koren gornje enačbe. V primerih, ko računamo blizu mejne krivulje ali na njej, je v odvisnosti od tega, ali gre za zgornjo ali za spodnjo mejno krivuljo, smiselno izbirati začetni volumen v področju pare ali področju kapljevine (in ne v področju mokre pare). Za reševanje gornje enačbe moramo torej izbirati tako metodo, s kakršno se korenu enačbe približujemo z ene strani. Taka je npr.: Newtonova metoda, ki je za na-

Razpredelnica 1

Iskana veličina	Matematična odvisnost	Območje	Ime podprograma SUBROUTINE
volumen	$\chi = \chi(\Theta, \beta)$	1	VOLVO (TETA, BETA, RVV)
		2	VOLPA (TETA, BETA, RVP)
entalpija	$\varepsilon = \varepsilon(\Theta, \beta)$	1	ENTALVO (TETA, BETA, RHV)
		2	ENTALPA (TETA, BETA, RHP)
entropija	$\sigma = \sigma(\Theta, \beta)$	1	ENTROVO (TETA, BETA, RSV)
		2	ENTROPA (TETA, BETA, RSP)
tlak	$\beta = \beta(\Theta, \chi)$	3	TLAPAK (TETA, HI, TPK)
		4	TLAVOK (TETA, HI, TVK)
entalpija	$\varepsilon = \varepsilon(\Theta, \chi)$	3	TALPAK (TETA, HI, HPK)
		4	TALVOK (TETA, HI, HVK)
entropija	$\sigma = \sigma(\Theta, \chi)$	3	TROPAK (TETA, HI, SPK)
		4	TROVOK (TETA, HI, SVK)
tlak nasičenosti	$\beta = \beta(\Theta)$		TLANA (TETA, RPS)

tančno računanje korenov tudi najugodnejša. Obrazec ima splošno obliko:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

Odvod funkcije (odvod tlaka po volumnu pri konstantni temperaturi) je v našem primeru zelo dolg in kompliciran. Zanj bi morali napisati nov podprogram. Odvod ali tangento v dani točki zaradi tega nadomeščamo s sekanto skozi dve točki, sl. 2.

$$f'(x) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

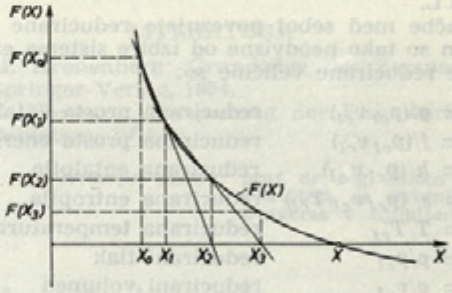
Novi približek je:

$$x_2 = x_1 - \frac{x_1 - x_0}{f(x_1) - f(x_0)} f(x_1)$$

Pri računanju po tem postopku moramo izbrati dve začetni vrednosti x_0 in x_1.

Naslednji izsek iz testnega programa prikazuje skupino ukazov, s katerimi izračunamo danemu tlaku in dani temperaturi ustrezni volumen v območju 3.

```
      TETA = ....
      BETA = ....
      XPO = VO/.00317
      CALL TLAPAK (TETA, XPO, FPO)
      XP1 = V1/.00317
      DO 65 K = 1,100
      CALL TLAPAK (TETA, XP1, FP1)
      XP2 = XP1 — (FP1-BETA)*(XP1-XPO)/(FP1-FPO)
      IF (ABS(XP2-XP1).LE.1.OE-7) 77,64
64    XPO = XP1
      FPO = FP1
      XP1 = XP2
65    CONTINUE
      PRINT 99,K
99    FORMAT (I8)
77    V = XP2*0.00317
```



Sl. 2. *Iskanje korena enačbe*

Vrednosti x_0 in x_1 sta v gornjem programu označeni z XPO in XP1, vrednosti ustreznega tlaka pa z FPO in FP1. Specifični volumen (ne reducirani) je označen z V, začetna približka pa z VO in V1.

Stavek DO 65 K = 1,100 je uporabljen samo zato, da z njim omejimo število iteracij na 100. Če je število iteracij 100, stroj to izpiše po ukazu PRINT 99,K. Dejansko število iteracij je normalno seveda znatno manjše. Na mejni krivulji blizu kritične točke, kjer so razmere najneugodnejše, je bilo število iteracij največ 5, če je bila začetna vrednost oddaljena za 1 °C. Tudi če so začetne vrednosti izbrane slabše, se število iteracij bistveno ne spremeni.

S popolnoma analogno skupino ukazov izračunamo danemu tlaku in dani temperaturi ustrezni volumen na strani vode v območju 4.

Na mejni krivulji je podana samo odvisnost tlaka od temperature nasičenosti. Pogostoma potrebujemo obratno funkcijo, to je odvisnost temperature od tlaka nasičenosti. Za izbran konstantni tlak β moramo torej poiskati tisto temperaturo, pri kateri je vrednost tlaka $\beta(\Theta)$, izračunanega po podprogramu TLANA, enaka izbranemu tlaku β (po podprogramu TLANA je $\beta(\Theta) =$ = RPS):

$$\beta - \beta(\Theta) = 0$$

Naloga je podobna prejšnji, zato jo rešimo enako, npr.: z naslednjo skupino ukazov:

```
      BETA = ....
      XO = TO/647.30
      CALL TLANA (XO, FXO)
      X1 = T1/647.30
      DO 10 I = 1,100
      CALL TLANA (X1, FX1)
      X2 = X1 — (FX1-BETA)*(X1-XO)/(FX1-FXO)
      IF (ABS(X2-X1).LE.1.OE-8) 51,52
52    XO = X1
      FXO = FX1
      X1 = X2
10    CONTINUE
      PRINT 99,I
99    FORMAT (I8)
51    T = X2*647.30
```

Absolutna temperatura je označena s T, začetna približka pa z TO in T1.

3. SKLEP

Vse podprograme smo preskusili na računalniku CDC 3300. Rezultati se popolnoma ujemajo s tabelami: E. Schmidt: Properties of Water and Steam in SI-Units; Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1969. Navedene tabele so bile izračunane po istih enačbah in so zamenjale prejšnjo izdajo »VDI — Wasserdampftafeln« iz leta 1963.

Enačbe oziroma podprogrami so razmeroma enostavni, saj potrebuje omenjeni računalnik za sestavljanje vseh podprogramov skupaj s testnim programom dolžine 75 kartic samo 1 minuto in 38 sekund. Za izračun temperaturne in tlačne tabele za nasičeno vodno paro z volumnom, temperaturo, entropijo, uparjalno toploto in notranjo energijo na spodnji in zgornji mejni krivulji (skupaj 682 točk) pa je stroj potreboval 1 minuto in 40 sekund.

Avtorjev naslov:
mag. ing. Mirko Opara,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani

IZ PRAKSE ZA PRAKSO

UDK 621.833:531.717.2:519.2

Uporaba statističnih zakonov pri kontroli zobnikov

PEPO PUHAR

Dipl. ing. Evgenu Mareku ob 60-letnici

(Konec)

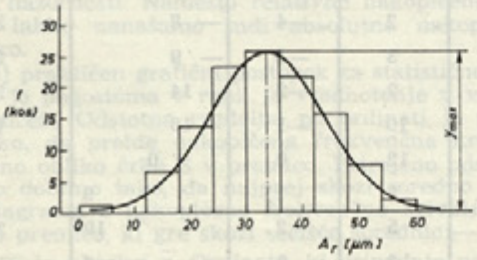
Grafično vrednotenje merilnih rezultatov

Pri statistični obdelavi podatkov je najprej priporočljiva grafična ponazoritev (v kakršnikoli obliki). Metoda je preprosta in — predvsem — nazorna. Njena pomanjkljivost pa je, da ni povsem brez osebnih vplivov.

Preprost način grafične ponazoritve je diagram pogostnosti. Takšen diagram razporeditve frekvenc imenujemo histogram (sl. 8).

Nad skupinskimi intervali razpona (abscisa x) — za naš zgled odstopkov krožnega teka zob A_r — narišemo stolpce (pravokotnike). Njihova višina ustreza absolutnim ali relativnim frekvencam v pripadajočih skupinskih intervalih (ordinata y).

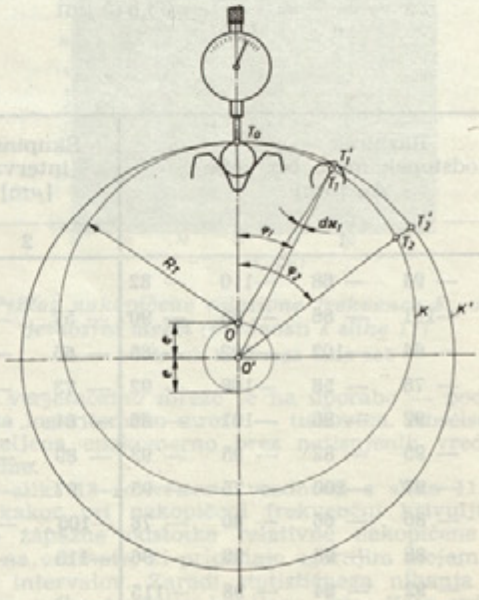
Odstopki krožnega teka zob A_r, zbrani v razpredelnici 1, so izmerjene vrednosti na 120 zobnikih z valjčkom in komparatorjem. Če zavrtimo zobnik okrog geometrične osi O, opiše točka T_0 krožnico K. Če izberemo novo os O' in okoli nje zavrtimo zobnik, opiše točka T_0 novo krožnico K'.



Sl. 8. *Histogram s konstruirano frekvenčno krivuljo (krivuljo pogostnosti)*

A_r — odstopek krožnega teka zob, f — frekvenca

Namesto vrtenja je preprosteje vzeti instrument z radialno premaknitvijo merilnega elementa (kroglice, valjčka ali prizme). Če po sliki 9 zavrtimo zobnik okrog O' za kot φ_I, je razdalja $\overline{T_I T_I'}$ delež po premaknitvi krožnic K in K'.



Sl. 9. *Merjenje krožnega teka zob A_r z valjčkom in komparatorjem*