

# Novi dijagram za proračun toplinskih promjena drva

Prof. ing. František Setnička

Drevarska fakulta VSLD, Zvolen (ČSSR)

Prispjelo 19. listopada 1979.

Prihvaćeno 18. prosinca 1980.

UDK 634.0.812.14

Izvorni znanstveni rad

## Sažetak

U brojnim tehnološkim procesima mora se drvo zagrijavati ili hladiti. Proračun topline, koja se pri tome dovodi ili odvodi, katkada je dosta naporan. U članku se navodi metoda proračuna i potrebne karakteristične vrijednosti. Predlaže se novi dijagram pomoću kojeg se daje predočiti izmjena stanja drva, a toplinske jednadžbe i količina topline odrediti grafički.

Ključne riječi: toplinski odnosi pri zagrijavanju drva — »h, w« dijagram toplinskog stanja drva

## NEW DIAGRAM FOR CALCULATION OF THERMAL CHANGES IN THE WOOD

### Summary

In a number of technological processes the wood has to be heated or cooled. Sometime it is rather difficult to make calculation of heat which is brought in or taken away. The article describes the method of calculation and the necessary characteristic values.

A new diagram has been suggested by means of which it is possible to show the change of wood condition and to determine graphically the thermal equations and amount of heat.

Key words: thermal relations in wood heating — »h, w« diagram of thermal condition of wood

### 1. UVOD

Vlažno drvo sastoji se od (apsolutne) suhe tvari ( $m_d$ ) i vode ( $W$ ), a njegova relativna vlažnost

$$w = \frac{W}{m_d}$$

daje omjer sadržaja vode prema suhoj tvari. Pri izmjenama topline i pri toplinskim proračunima

vlažno drvo promatra se kao smjesa suhog drva i vode.

Udio suhog drva u smjesi tvari 1 kg vlažnog drva jest

$$\frac{1}{1+w},$$

a udio vode

$$\frac{w}{1+w}.$$

## 2. SPECIFIČNA TOPLINA DRVA

Srednja specifična toplina vlažnog drva za temperature iznad 0°C određuje se prema pravilu smjese iz odnosa

$$[c_{d,w}]_0 = \frac{1}{1+w} [c_d]_0 + \frac{w}{1+w} [c_w]_0 \quad (1)$$

Za taj proračun moramo poznavati srednju specifičnu toplinu suhoga drva i vode.

Specifična toplina suhoga drva u ovisnosti o temperaturi najčešće se određuje prema obrascu DUNLAP-a [1], podešeno mjernim jedinicama SI:

$$c_d = 1,114 + 0,00486 t \text{ [KJ/kg K}^0] \quad (2),$$

a njena srednja vrijednost za raspon temperature 0—t:

$$[c_d]_0 = 1,114 + 0,00243 t \quad (3)$$

Specifične topline suhoga drva, prema izrazu (2) i (3), izračunane su u tabl. I.

STVARNA I SREDNJA SPECIFIČNA TOPLINA SUHOGA DRVA PREMA IZRAZU (2) i (3)

Tablica I

Temperatura t °C	Specifična toplina		Temperatura t °C	Specifična toplina	
	Stvarna c <sub>d</sub> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Srednja [c <sub>d</sub> ] <sub>0</sub> <sup>t</sup> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		Stvarna c <sub>d</sub> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Srednja [c <sub>d</sub> ] <sub>0</sub> <sup>t</sup> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
-30	0,968	1,041	90	1,551	1,332
-20	1,017	1,065	100	1,599	1,357
-10	1,065	1,090	110	1,648	1,381
0	1,114	1,114	120	1,697	1,405
10	1,162	1,138	130	1,745	1,429
20	1,211	1,162	140	1,794	1,454
30	1,259	1,187	150	1,842	1,478
40	1,308	1,208	160	1,891	1,502
50	1,357	1,235	170	1,939	1,527
60	1,405	1,260	180	1,988	1,551
70	1,454	1,284	190	2,037	1,575
80	1,502	1,308	200	2,085	1,599

Srednja specifična toplina vode između temperature 0°C i 300°C ustanovljena je iz entalpije vode  $h_w = [c_w]_0 t$ , pri čemu je  $h_w = h'$  bila uzeta iz tabela pare za vodu u točki vrenja (vrelištu) [4].

Srednja specifična toplina vode za temperature ispod 0°C nije se mogla ustanoviti iz literature, nego je bila očitana iz krivulje

$[c_w]_0 = c(t)$  toka specifične topline, koja je bila produžena do područja negativnih temperature. Rezultat je uveden u tabl. II. Treba upozoriti da se voda u drvu iznad 100°C i ispod 0°C, ako treba biti u tekućem stanju, mora nalaziti pod tlakom.

SREDNJA SPECIFIČNA TOPLINA VODE

Tablica II

Temperatura t °C	[c <sub>w</sub> ] <sub>0</sub> <sup>t</sup> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Temperatura t °C	[c <sub>w</sub> ] <sub>0</sub> <sup>t</sup> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Temperatura t °C	[c <sub>w</sub> ] <sub>0</sub> <sup>t</sup> kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
-30	4,252	50	4,186	130	4,203
-20	4,241	60	4,185	140	4,208
-10	4,229	70	4,185	150	4,215
0	4,218	80	4,187	160	4,221
10	4,204	90	4,189	170	4,231
20	4,195	100	4,191	180	4,240
30	4,190	110	4,194	190	4,251
40	4,188	120	4,197	200	4,262

Poznato je da se voda u drvu nalazi u staničnim šupljinama (slobodna voda) i u staničnim stijenkama (higroskopska, vezana voda). Granicu čini točka zasićenja vlakanaca pri vlazi drva od oko  $w_s \cong 0,30$ . Iznad točke zasićenja vlakanaca vlagu drva sačinjavaju slobodna i vezana voda, a ispod točke zasićenja vlakanaca drvo sadrži samo vezanu vodu. Između temperature 0°C do 100°C slobodna i vezana voda u drvu, pri atmosferskom tlaku, vlada se približno veoma jednoliko. Kod temperatura iznad 100°C mora drvo biti smješteno u prostoru s višim tlakom, da se voda ne ispari. Kod temperatura ispod 0°C voda se u drvu ili djelomično ili posve smrzne već prema visini temperature.

Obično se toplinski odnosi rješavaju tako da se cijela vlaga drva uzme kao da je led, koji se privedenom toplinom najprije mora zagrijati a potom rastaliti. Taj način proračuna nije ispravan, budući da se u smrznutom drvu tek pri temperaturi od -80°C cijela voda nalazi u obliku leda (ledena rešetka). Pri višim temperaturama nalazi se vlaga drva kako u obliku vode (naravno u sitnim kapilarama, gdje je pod tlakom) tako i leda. Budući da se pri preradi drva ne pojavljuju ekstremno niske temperature (najniže temperature, pri kojima se drvo privodi tehnološkom procesu, određene su atmosferskim uvjetima), pri toplinskim promjenama moramo vlagu drva razmatrati dvofazno, kao tekućinu i kao led. Važno je poznavati udio vlažnosti, koji je u tekućoj i krutoj fazi.

ODNOS  $w_1/w$  VLAGE DRVA U OBLIKU LEDA (2)

Tablica III

Vlaga W	temperatura drva u °C				
	-2	-5	-10	-20	-30
0,2	-	-	-	0,075	0,220
0,3	-	0,093	0,217	0,384	0,480
0,4	0,250	0,320	0,413	0,538	0,610
0,5	0,400	0,456	0,530	0,630	0,688
0,6	0,520	0,547	0,609	0,692	0,739
0,7	0,585	0,611	0,665	0,736	0,776
0,8	0,625	0,660	0,706	0,769	0,805
0,9	0,675	0,698	0,740	0,795	0,826
1,0	0,710	0,728	0,766	0,815	0,843

Čudinov, B. V. i Stepanov, V. I. [2] istraživali su drvo pri temperaturama ispod 0°C, a iz rezultata pokusa sastavili tabl. III, u kojoj je naveden udio leda od cjelokupne vlage u smrznutom drvu.

Taj udio nije naveden pri temperaturi bliskoj 0°C i pri nižoj vlažnosti, jer vlaga u drvu nije čista voda, koja se smrzava pri 0°C, nego otopina koja se smrzava pri nižim temperaturama.

Tabl. III pokazuje da udio smrznute vode u drvu raste sa sniženjem temperature i s porastom vlage. Rezultat se daje matematski izraziti, ako vlagu u obliku leda označimo s  $w_1$ , prema odnosu:

$$\frac{w_1}{w} = 1 - \frac{12 + 18 \cdot 0,0567 \cdot (t + 2)}{w} \quad (4)$$

Ako smrznuto drvo ugrijavamo na temperaturu iznad 0°C, to moramo — ako se radi o vlazi — uzeti u obzir ne samo vodu nego također i led, koji se pri 0°C (ili pri malo nižoj temperaturi) otapa.

Srednja specifična toplota leda, kao funkcija temperature, dobiva se iz odnosa [3]

$$[c_1]_t = 2,108 + 3,71 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,774 \cdot 10^{-6} \cdot t^2, \quad (5)$$

koji za temperature do -50°C daje vrijednosti

t	0	-10	-20	-30	-40	-50°C	-1K	-1
$[c_1]_t$	2,108	2,071	2,034	1,997	1,961	1,924	kJ. kg	

Specifična ukupna toplota otapanja leda je  $l = 333,4 \text{ kJkg}^{-1}$ .

Za početnu toplotu drva ispod 0°C moramo Formule (1) i (6) računski su razrađene u tjecaj vlažnosti drva u obliku leda na specifičnu toplotu, pa dobivamo

$$[c_{dw}]_t^0 = \frac{1}{1-w} [c_d]_t^0 + \frac{w \cdot w_1}{1-w} [c_w]_t^0 + \frac{w_1}{1-w} [c_i]_t^0 \quad (6)$$

Formule (1) i (6) računski su razrađene u tabl. IV.

SREDNJA SPECIFIČNA TOPLINA VLAŽNOG DRVA PREMA FORMULI (6)

Tablica IV

Temperatura $t_c$	$[c_{dw}]_t^0$ [kJkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] pri relativnoj vlaži w [kgkg <sup>-1</sup> ]										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
-30	1,041	1,322	1,482	1,532	1,555	1,555	1,618	1,640	1,663	1,677	1,694
-20	1,065	1,354	1,565	1,602	1,633	1,651	1,664	1,704	1,724	1,739	1,754
-10	1,090	1,371	1,605	1,658	1,736	1,757	1,791	1,814	1,826	1,851	1,858
0	1,114	1,395	1,621	1,630	2,000	2,150	2,278	2,391	2,495	2,583	2,666
10	1,138	1,417	1,648	1,845	2,013	2,168	2,288	2,400	2,503	2,589	2,671
20	1,162	1,438	1,667	1,861	2,028	2,174	2,283	2,410	2,512	2,597	2,679
30	1,187	1,460	1,687	1,879	2,044	2,189	2,313	2,423	2,524	2,608	2,689
40	1,208	1,479	1,704	1,895	2,059	2,202	2,326	2,434	2,534	2,618	2,699
50	1,235	1,502	1,726	1,915	2,077	2,220	2,342	2,449	2,546	2,631	2,711
60	1,260	1,525	1,746	1,933	2,094	2,235	2,355	2,462	2,560	2,642	2,721
70	1,284	1,548	1,767	1,953	2,112	2,252	2,372	2,478	2,575	2,657	2,735
80	1,308	1,570	1,787	1,972	2,130	2,269	2,388	2,492	2,590	2,670	2,748
90	1,332	1,592	1,807	1,991	2,147	2,285	2,403	2,507	2,604	2,684	2,761
100	1,357	1,614	1,829	2,010	2,166	2,303	2,420	2,523	2,619	2,698	2,774
110	1,381	1,637	1,849	2,030	2,184	2,320	2,436	2,538	2,633	2,712	2,788
120	1,405	1,658	1,870	2,049	2,202	2,336	2,452	2,554	2,648	2,729	2,801
130	1,429	1,681	1,891	2,069	2,221	2,355	2,469	2,570	2,664	2,741	2,816
140	1,454	1,704	1,912	2,089	2,240	2,373	2,487	2,587	2,680	2,757	2,831
150	1,478	1,727	1,933	2,109	2,259	2,392	2,504	2,604	2,697	2,773	2,847
160	1,502	1,749	1,954	2,129	2,278	2,410	2,522	2,621	2,713	2,788	2,862
170	1,527	1,773	1,977	2,150	2,299	2,430	2,541	2,639	2,731	2,806	2,879
180	1,551	1,795	1,998	2,171	2,316	2,448	2,559	2,657	2,748	2,822	2,896
190	1,575	1,818	2,020	2,192	2,338	2,456	2,579	2,676	2,765	2,841	2,913
200	1,599	1,841	2,042	2,213	2,358	2,488	2,596	2,694	2,785	2,859	2,921

Ukupna toplota za zagrijavanje vlažnoga drva u području temperatura koje su ispod 0°C izračunava se kao osjetna toplota koristeći specifičnu toplotu prema izrazu (6).

Za područje temperatura iznad 0°C, ukupna je toplota dana osjetnom toplotom, sa specifičnom toplotom prema izrazu (1). Ako se temperatura mijenja s negativnih vrijednosti na pozitivne, potrebno je osjetnu toplotu razmatrati odvojeno, i to za područje temperatura od početne vrijednosti do 0°C i isto tako za područje temperatura od 0°C do konačne vrijednosti. Osjetnoj toplini treba dodati ukupnu toplotu taljenja leda.

Za 1 kg vlažnoga drva ukupna toplota za  $t_1 < 0^\circ\text{C}$  i  $t_2 > 0^\circ\text{C}$  dana je formulom:

$$q_{dw} = \frac{1}{1-w} \{ (c_d)_t_1^0 + w (c_w)_t_1^0 \} t_1 - (c_d)_t_2^0 + (w-w_1) \{ (c_w)_t_2^0 + w_1 (c_i)_t_2^0 \} t_2 \quad (7)$$

Izraz  $[c_w]_{t_0}^{t_2} t_2 = h'_2$  i očitava se iz tablica za paru.

Navedeni proračun ukupne topline za zagrijavanje drva vrijedi samo onda kada se vlaga drva ne mijenja, tj. vlažnost se ne smanjuje sublimacijom ili isparivanjem, a niti se ne povisuje.

Pri promjenama vlažnosti ispod točke zasićenja vlaknaca, potrebno je još uzeti u obzir toplinu bubrenja koja predstavlja toplinu za svladavanje veza higroskopske vode u drvu. Za 1 kg suhoga drva Katz je izrazio toplinu bubrenja formulom koju je postavio Kollmann [1], a koja prevedena na mjerne jedinice SI glasi:

$$q_b = \frac{92,11 \cdot w}{0,07 + w}$$

Za promjenu vlažnosti između točke zasićenja vlaknaca ( $w_s = 0,30$ ) i konačne vlage ( $w$ ), jedinična toplina bubrenja dana je izrazom:

$$[q_b]_{w_s}^w \approx 0,30 = 74,68 - \frac{92,11 \cdot w}{0,07 + w} \quad (8)$$

Ona je izračunana u tabeli V. Masa suhoga drva ( $m_d$ ) izračunava se iz mase vlažnoga drva ( $m_{d,w}$ ) prema izrazu

$$m_d = \frac{m_{d,w}}{1 + w} \quad (9)$$

SPECIFIČNA TOPLINA ZA OSLOBADANJE VEZANE VODE PREMA FORMULI (8)

Tablica V

konačna vlaga drva $w$ kg/kg <sup>-1</sup>	$[q_b]_{w_s}^w = 0,30$ kJ/kg <sup>-1</sup>
0,00	74,68
0,05	36,26
0,10	20,50
0,15	11,86
0,20	6,46
0,25	2,71
0,30	0,00

### 3. ENTALPIJA VLAŽNOGA DRVA

Entalpija čvrstih i tekućih tvari, u kojima se zanemaruje promjena volumena s temperaturom, proračunava se kao umnožak specifične

topline, temperature i mase. Njena specifična vrijednost je  $h = [c]_{t_0}^{t_1}$ , pri čemu je za  $t = 0^\circ\text{C}$  specifična entalpija jednaka nuli. Entalpija je aditivna veličina i njenu vrijednost za smjesu dobivamo zbrajanjem entalpija pojedinih sastavnih komponenata.

Kada drvo pri obradi prolazi toplinskim procesima pri običnim temperaturama (npr. sušenje, vlaženje i sl.), njemu se suha tvar obično ne mijenja ili se mijenja tako neznatno da se takva promjena može zanemariti. Naprotiv tome, vlažnost se može bitno mijenjati. Svršihodno je primijeniti entalpiju, ali nikako ne na 1 kg vlažnoga drva, nego na jedinicu koja se odnosi na 1 kg suhoga drva, koje se pri procesima ne mijenja. Osnovna proračunska jedinica vlažnoga drva bit će dakle  $(1 + w)$  kg. Tu entalpiju označimo s  $h_{1+w}$  za razliku od specifične entalpije označena s  $h$ .

Entalpija jedinice drva s vlagom  $w$ , koja se odnosi na 1 kg suhoga drva, kada primijenimo pravilo smjese, jest:

$$h_{1+w} = h_d + w h_w \quad (10)$$

gdje je  $h_d$  = specifična entalpija suhoga drva, a  $h_w$  je specifična entalpija vode. Specifična entalpija suhoga drva jest

$$h_d = [c_d]_{t_0}^t \quad (11)$$

Gdje se srednja specifična toplina suhoga drva prema izrazu (3) ustanovljava iz tabl. I. Entalpija vode, za temperature iznad  $0^\circ\text{C}$ , očitava se iz tablica pare za vodu pri temperaturi isparivanja.

Za izračunavanje entalpije vlažnog drva, s temperaturom iznad  $0^\circ$ , može se također primijeniti specifična toplina vlažnog drva prema izrazu (1)

$$h_{1,w} = [c_{d,w}]_{t_0}^t = (1+w) \left( \frac{1}{1+w} [c_d]_{t_0}^t + \frac{w}{1+w} [c_w]_{t_0}^t \right) = [c_d]_{t_0}^t + w [c_w]_{t_0}^t = h_d + w h_w$$

Entalpija vlažnog drva, u kojem je dio vlage u smrznutom stanju  $t < 0^\circ\text{C}$ , sadržava pored navedenih veličina još i toplinu za zagrijavanje i taljenje leda. Može se izraziti odnosom

$$h_{1,w} = ([c_d]_{t_0}^t + (w-w_1) [c_w]_{t_0}^t + w_1 ([c_i]_{t_0}^t - t)) + [c_d]_{t_0}^t + (w-w_1) h_w + w_1 ([c_i]_{t_0}^t - t) \quad (12)$$

a sastoji se iz specifične entalpije suhoga drva, entalpije dijela vode, entalpije i ukupne topline dijela leda u vlažnom drvu. Entalpija prema izrazu (12) je negativna. Za  $t = 0^\circ\text{C}$  i  $w_1 = 0$  ima nultu vrijednost, što je u skladu sa pretpostavkom; kada je  $w_1 > 0$ , drvo također pri  $t = 0^\circ\text{C}$  sadržava led, taj izraz daje vrijednost  $-w_1$ , a entalpija za tu temperaturu drva može teoretski imati dvije vrijednosti. Ali, kako tabl. III pokazuje,

ENTALPIJA ( $l \times w$ ) kg VLAŽNOG DRVA

Tablica VI

Tempe- ratura °C	Vlaga drva w [kg/kg]										
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
-30	-31,23	-43,99	-68,44	-107,77	-147,10	-186,43	-225,37	-264,70	-304,42	-343,36	-382,69
-20	-21,30	-29,78	-42,60	-80,09	-117,42	-154,83	-192,24	-229,64	-267,05	-304,46	-341,87
-10	-10,90	-15,13	-19,36	-43,89	-79,27	-114,68	-150,09	-185,50	-220,91	-256,32	-291,73
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	11,38	15,58	19,78	23,99	28,19	32,40	36,60	40,80	45,01	49,21	53,42
20	23,24	31,64	40,03	48,42	56,81	65,20	73,59	81,98	90,37	98,76	107,15
30	35,61	48,16	60,73	73,30	85,87	98,44	111,01	123,58	136,15	148,72	161,28
40	48,32	65,18	81,96	98,69	115,44	132,19	148,94	165,69	182,44	199,20	215,95
50	61,75	82,69	103,61	124,54	145,48	166,40	187,33	208,26	229,19	250,12	271,05
60	75,60	100,68	125,79	150,90	176,01	201,13	226,24	251,35	276,46	301,58	326,69
70	89,88	119,16	148,45	177,75	207,05	236,35	265,65	294,95	324,25	353,55	382,85
80	104,64	138,13	171,63	205,12	238,61	272,11	305,60	339,10	372,59	406,09	439,58
90	119,88	157,60	195,30	233,00	270,69	308,39	346,09	383,79	421,49	459,18	496,88
100	135,70	177,56	219,47	261,38	303,29	345,20	387,11	429,98	470,93	512,84	554,75
110	151,91	198,02	244,16	290,29	336,43	382,56	428,70	474,83	520,96	567,10	613,23
120	168,60	218,98	269,35	319,71	370,08	420,45	470,81	521,18	571,55	621,92	672,28
130	185,77	240,46	295,09	349,73	459,01	459,01	513,65	568,28	622,92	677,56	732,20
140	203,56	262,42	321,33	380,24	439,15	498,05	556,96	615,87	674,78	733,69	792,60
150	221,70	284,91	348,13	411,35	474,57	537,80	601,02	664,24	727,46	790,68	853,90
160	240,32	307,89	375,42	442,96	510,49	578,02	645,55	713,09	780,62	848,15	915,69
170	259,59	331,44	403,37	475,29	547,22	619,15	691,08	763,01	834,94	906,87	978,80
180	279,18	355,47	431,79	508,12	584,44	660,77	737,10	813,42	889,75	966,07	1042,40
190	299,25	380,03	460,79	541,55	622,32	703,08	783,84	864,61	945,37	1026,13	1106,90
200	319,80	405,11	490,36	575,60	660,85	746,09	831,33	916,57	1001,82	1087,06	1172,30

vlaga u drvu pri 0° C samo je u tekućem obliku, na posljednji slučaj ne moramo uvažiti, nego entalpiju vlažnog drva pri toj temperaturi možemo računati iz izraza (12) za  $w_1 = 0$ .

Za proračun entalpije smrznutog drva može se također primijeniti izraz (7) za temperature između  $t_1 = 0^\circ\text{C}$  i  $t_2 = t$

$$h_{1+w} = (1+w) q_{dw} + (1+w) [(c_{dw})_0^{t_2} t_2 - (c_{dw})_0^{t_1} t_1 + w_1]$$

gdje moramo ukupnu toplinu  $l$  staviti s negativnim predznakom, s obzirom na to da se entalpija odnosi na vodu. Kada dodamo za specifičnu toplinu vlažnoga drva izraz (6), to dobivamo

$$h_{1+w} = [(c_d)_0^{t_2} t_2 + (w-w_1)h_w + w_1[(c_d)_0^{t_2} - 1]]$$

što je isto kao kod izraza (12).

Toplina koja proizlazi iz promjene entalpije između stanja vlažnog drva 1 i 2 izračunava se jednostavno

$$Q_{12} = m_d [(h_{1+w})_2 - (h_{1+w})_1] \quad (13)$$

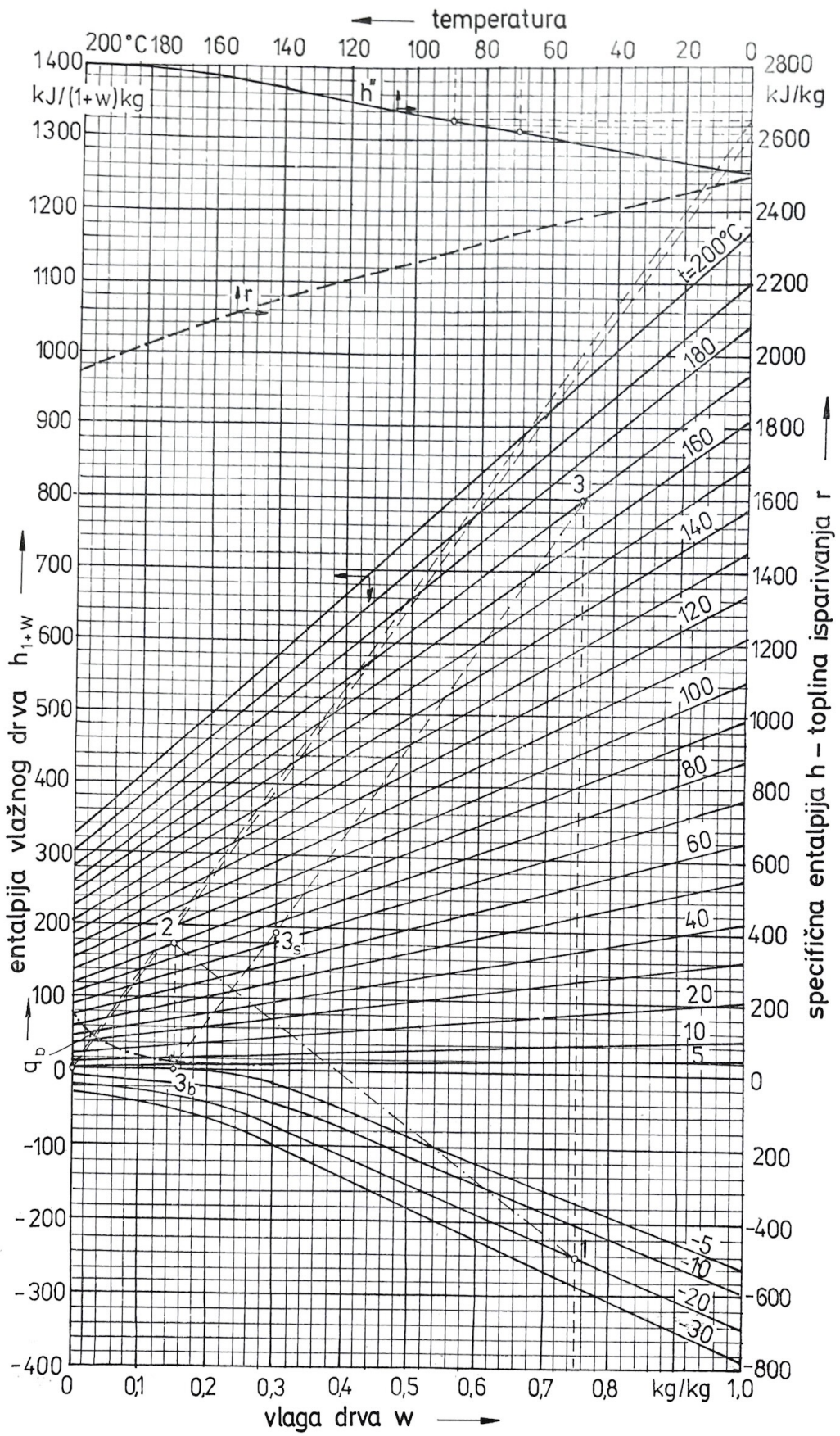
Ova toplina, pri procesima kod kojih se mijenja vlaga, obično se ne uzima u obzir. Poka-

zatelji se odnose na toplinu isparivanja ili kondenzacije vode, i time se ograničava do određene mjere.

#### 4. $h, w$ — DIJAGRAM ZA RJESENJE TOPLINSKIH IZMJENA DRVA

U toplinskim procesima pri obradi mijenjaju se temperatura i vlaga drva. Određenjem entalpije početnog i konačnog stanja dobivamo samo dvije stavke toplinske bilance procesa. Dalje stavke jesu: toplina za isparenje vlage pri sušenju i kondenzaciji pare pri vlaženju, toplina bubrenja, gubici topline itd. Za analizu je pogodno grafičko prikazivanje procesa prikladnim dijagramom iz kojega bi se dale svrsishodno i brzo ustanoviti sve veličine toplinske bilance, a otpala bi i upotreba tablica. U tu je svrhu autor predložio dijagram koji odgovara tim uvjetima.

U  $h, w$  — dijagramu za vlažno drvo (sl. 1) nanosi se entalpija  $h_{1+w}$  na ordinatnu a vlaga na apscisnu os. Dijagram vrijedi za masu  $(1+w)$  kg vlažnog drva ili 1 kg suhog drva u vlažnom drvu i načinjen je raspon vlažnosti



Slika 1. —  $h, w$  — dijagram za određivanje toplinskih promjena drva.

$w = 0,0$  do  $1,0$  i raspon temperature od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $200^{\circ}\text{C}$ , koje su dovoljne za najveći broj slučajeva koji se pojavljuju u drvnj industriji.

Izoterma  $t = 0^{\circ}\text{C}$  leži na apscisnoj osi, a izoterme  $t > 0^{\circ}\text{C}$  jesu pravci, budući da je izraz (10) za  $t = \text{konst.}$  ( $h_d = \text{konst.}$ ,  $h_w = \text{konst.}$ ) linearan; njihov nagib raste s povišenjem temperature, budući da je parcijalna derivacija izraza (10)

$$\left(\frac{\delta h}{\delta w}\right)_{t = \text{konst.}} = h_w = [c_w]_0^1 t \quad (14)$$

ovisna o temperaturi: za  $w = 0$  proizlazi na ordinati  $h_d$ . U dijagramu su izoterme prikazane snopom kosih pravaca.

Izoterme za temperaturu  $t < 0^{\circ}\text{C}$  za stanja drva, u kojima vlaga nije definirana kao led, također su kosi pravci s negativnim nagibom danim u jednadžbi (14) do kojih dosiže negativna toplina. Međutim, kada drvo sadrži led, kojega se masa proračunava kao dio vlage iz jednadžbe (4)

$$w_1 = w - 12 - 180,0587 (t - 2) \quad (15)$$

koja je za  $t = \text{konst.}$  također linearna, izoterme su u tom području također pravci. Njihov nagib dobivamo prvom derivacijom izraza (12) koja daje

$$\left(\frac{\delta h}{\delta w}\right)_{t = \text{konst.}} = [c_w]_0^1 t - \left(\frac{\delta w_1}{\delta w}\right)_t [c_w]_0^1 t + \left(\frac{\delta w_1}{\delta w}\right)_t ([c_l]_0^1 t - 1)$$

$$\text{Iz jednadžbe (15) jest } \left(\frac{\delta w_1}{\delta w}\right)_{t = \text{konst.}} = 1$$

Nagib izoterme je također negativan

$$\left(\frac{\delta h}{\delta w}\right)_{t = \text{konst.}} = [c_l]_0^1 t - 1, \quad (16)$$

budući da je  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , a s temperaturom raste. Razlikuje se od nagiba izoterme prema izrazu (14), tako da izoterme područja ispod  $0^{\circ}\text{C}$  teoretski pokazuju prijelom. Na sl. 1. tok oba dijela izoterme prikazan je kontinuiranom krivuljom, što bolje odgovara stvarnim odnosima.

Za opću upotrebu dijagram je dopunjen na okomici na rubu mjerilom za specifičnu entalpiju ili toplinu isparivanja te mjerilom temperature na gornjem vodoravnom rubu. U tim

mjerilima dijagrama iznesene su: krivulja specifičnih entalpija ( $h''$ ) zasićene pare, krivulja topline isparivanja ( $r$ ) vode i konačno krivulja ( $q_1$ ) topline bubrenja u skali entalpije vlažnoga drva.

Kod upotrebe dijagrama treba najprije izračunati materijalnu i energetska bilancu procesa pa izabrane odnosno brojčane vrijednosti potražiti u dijagramu. Treba naglasiti da se te vrijednosti odnose samo na drvo, za koje vrijedi cijeli dijagram, a ne obuhvaća utjecaj odnosa sredine u kojoj se drvo nalazi. Kada ipak ocjenjujemo (prosudujemo) tehnološke uređaje, obično uspoređujemo uobičajene stvarne vrijednosti s teoretskim koje se odnose samo na drvo i proračunavamo efekat.

Dijagram pruža mogućnost točnog i brzog određivanja teorijskih vrijednosti. Korišćenje dijagramom bit će objašnjeno na daljnjim primjerima, koji se pojavljuju pri obradi drva u slijedećem članku.

## 5. ZAKLJUČAK

U članku se iznosi proračun topline pri toplinskim promjenama vlažnog drva. Daju se odnosi i vrijednosti za određivanje specifične topline suhoga drva, vode i leda za proračun osjetne topline. Za smrznuto drvo treba uzeti u obzir također i latentnu toplinu taljenja leda. Kako se u brojnim tehnološkim procesima materija suhog drva praktički ne mijenja, predlaže se da se odabere za osnovu izračunavanja jedinica vlažnog drva, koja obuhvaća 1 kg suhoga drva, veličina  $(1 + w)$  kg. Za tu jedinicu se uvode izrazi za proračun entalpije i izračunava njena vrijednost. Za olakšanje proračuna i zacrtanje slijeda predlaže se  $h, w$ -dijagram za vlažno drvo, iz kojega se dadu odrediti sve potrebne vrijednosti za ustanovljenje sadržaja topline pri tehnološkim procesima, ukoliko se to odnosi na drvo.

## LITERATURA

- [1] KOLLMAN, F. »Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe«, Vol. I. Berlin (Göttingen) Heidelberg, 1951.
- [2] ČUDINOV, B. V. — STEPANOV, V. I. — »Phasenzusammensetzung des Wassers in gefrorenem Holz«, Holztechnologie 9(1968), No. 1, S. 14/18.
- [3] BAER, H. D. »Mollier- i, x-Diagramme für feuchte Luft in SI-Einheiten, Berlin /Göttingen/ Heidelberg, 1961.
- [4] RAŽNJEVIĆ, K. »Tepelne tabulky a diagramy«, Bratislava 1969.

Preveo i recenzirao:  
Prof. Đuro Hamm, dipl. ing.