



Technická univerzita vo Zvolene

Ladislav DZURENDA
Nencho DELIISKI

TEPELNÉ PROCESY V TECHNOLOGIÁCH SPRACOVANIA DREVA

2019

Autori:

prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD.

prof. Dr. Nencho Deliiski, DrSc.

TEPELNÉ PROCESY V TECHNOLOGIÁCH SPRACOVANIA DREVA

Vysokoškolská učebnica

Recenzenti:

prof. Ing. Anton Geffert, CSc. Technická univerzita vo Zvolene.

prof. RNDr. Milan Malcho, PhD. Žilinská univerzita v Žiline.

doc. Ing. Zdenek Kopecký, CSc. Mendelova univerzita v Brne.

II. prepracované vydanie z roku 2010 v rozsahu 283 strán, 15,88 AH, 16,06 VH

Vydavateľ: Technická univerzita vo Zvolene

Rok vydania: 2019

Grafická úprava textu: Silvia Nemcová

Grafická úprava obalky: Vydavateľstvo TU vo Zvolene

Technická redakcia: Vydavateľstvo TU vo Zvolene

Tlač: Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene

www.tuzvo.sk

© Technická univerzita vo Zvolene

© prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD.

Katedra obrábanie dreva, Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen

prof. Dr. Nencho Deliiski, DrSc.

Katedra drvoobrabotvashti maschini, Fakultet gorska promyschlenost,

Lesotekhnicheskii universitet, bul. „sv. Kliment Okhridski“ 10, 1756 Sofia, Bulgaria.

Schválené: Rektorem Technickej univerzity vo Zvolene dňa 4. 2. 2019, číslo EP 48/2019. Za odbornú úroveň tohto vysokoškolského učebného textu zodpovedajú autori a recenzenti. Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-228-3192-5

Všetky práva vyhradené. Žiadna časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľa.

Predslov

Vysokoškolská učebnica „*Termické procesy v technológiách spracovania dreva*“ je určená študentom inžinierskeho štúdia v študijnom odbore 5.2.42 Drevárstvo a doktorandom v študijnom programe 5.2.43 Technológia spracovania dreva, študujúcim na Drevárskej fakulty – Technickej univerzity vo Zvolene. Aktualizáciou najnovších poznatkov z oblasti termických procesov a tepelnej techniky v technológiách spracovania dreva oslovuje aj pracovníkom vo výskume a priemysle spracovania dreva.

Uspokojovanie potrieb v industriálnych a post-industriálnych spoločnostiach energiou a teplom je dnes nielen základnou otázkou mierového spolužitia ľudí na Zemi v 21. storočí, ale aj limitujúcim faktorom rozvoja ďalšej priemyselnej činnosti ľudstva. Účelné, hospodárne a efektívne využívanie energetických zdrojov sa stáva pre človeka prioritou najvyššej dôležitosti. Nie je tomu ináč ani v technológiách spracovania dreva v drevospracujúcom priemysle. Úspešne ich môže zvládnuť len odborník – technológ s príslušnými vedomosťami a zručnosťami, ktorý v spolupráci s energetikom podniku môže navrhnúť a úspešne využívať optimálne, riešenie termického či hydrotermického procesu v daných konkrétnych podmienkach výrobného procesu daného závodu.

Učebnica pozostáva z niekoľkých na seba nadväzujúcich tematických celkov. Prvý tematický celok popisuje drevo a jeho tepelné vlastnosti v suchom, vlhkom i zmrazenom stave. Uvádza a ozrejmjuje zákonitosti termokinetiky ako teoretickej časti stacionárnych i nestacionárnych prenosových javov tepla, bez ktorých nie je možné riešiť náročné úlohy termických a hydrotermických procesov v technologických procesoch spracovania dreva.

Druhý tematický celok pojednáva o výrobe a distribúcií tepla k jednotlivým tepelným spotrebičom v drevárskych závodoch. Charakterizuje teplonosné látky: vodu, vodnú paru, termooleje a vlhký vzduch, ako nosiče tepla v tepelných systémoch, tak aj ako technologický nástroj (prostriedok) pre realizáciu termických a hydrotermických procesov v technológiách spracovania dreva. Súčasťou uvedenej kapitoly je i popis a charakteristika spotrebičov tepla pre priamu i nepriamu spotrebu tepla v tepelných systémoch v drevospracujúcich závodoch a kombinátoch.

Tretí tematický celok sa zaoberá spotrebou tepla na realizáciu jednotlivých termických a hydrotermických procesov v technológiách spracovania dreva. Na základe metodológie tvorby technicko-zdôvodniteľných noriem (TZN) spotrieb tepla sú vypracované matematické modely objektívne nevyhnutných spotrieb tepla pre parenie dreva v pariacich autoklávoch, termickú úpravu dreva vo vodných bazénoch a sušenie reziva v komorových teplovzdušných sušiarňach reziva. Súčasťou predmetnej učebnice sú i pomôcky vo forme matematických modelov technických výpočtov normatívov spotrieb tepla v programe EXCEL formou výpočtových tabuliek.

V závere sa chceme poďakovať spolupracovníkom na Drevárskej fakulte Technickej univerzity vo Zvolene, ako i spolupracovníkom z Lesotechnického univerziteta Sofia, ktorí dobrou radou, či skutkom prispeli k vypracovaniu a vydaniu predmetnej publikácie. Aj touto cestou chceme vyjadriť svoje poďakovanie recenzentom: prof. Ing. Antonovi Geffertovi, CSc., prof. RNDr. Milanovi Malchovi, PhD. a doc. Ing. Zdenkovi Kopeckému, CSc. za cenné rady a podnetné pripomienky uvedené v recenzných posudkoch. V nie poslednom rade naše poďakovanie patrí i pani Silvii Nemcovej za prepísanie textu a grafickú úpravu učebnice.

autori

OBSAH

1 Štruktúra a vlastnosti dreva	9
1.1 Anatomická stavba dreva a jeho chemické zloženie	9
1.2 Fyzikálne vlastnosti – hustota a vlhkosť dreva	13
1.3 Zmrznuté drevo	22
2 Tepelné vlastnosti dreva	24
2.1 Špecifická tepelná kapacita dreva	24
2.2 Tepelná vodivosť dreva	30
2.3 Teplotná vodivosť dreva	35
2.4 Koeficient pomernej pohltivosti tepelného žiarenia	40
3 Prenos tepla	41
3.1 Prenos tepla vedením	41
3.1.1 <i>Stacionárne vedenie tepla rovinnou stenou</i>	45
3.1.2 <i>Stacionárne vedenie tepla valcovou stenou</i>	47
3.2 Prenos tepla prúdením	54
3.2.1 <i>Faktory vplývajúce na koeficient prestupu tepla α</i>	55
3.2.2 <i>Výpočet koeficienta prestupu tepla</i>	59
3.2.3 <i>Výpočet koeficienta prestupu tepla z empirických vzťahov</i>	59
3.2.4 <i>Výpočet koeficienta prestupu tepla z kritériálnych rovníc</i>	66
3.2.4.1 <i>Prenos tepla voľnou konvekciou v neobmedzenom priestore</i>	70
3.2.4.2 <i>Prenos tepla pri nútenom prúdení</i>	71
3.2.4.3 <i>Prenos tepla pri zmene skupenstva – pri blanovej kondenzácii pár</i>	74
3.3 Prenos tepla sálaním – radiáciou	82
3.3.1 <i>Základné zákony prenosu tepla sálaním</i>	85
3.3.2 <i>Technické aplikácie prenosu tepla sálaním</i>	91
3.4 Prechod tepla	98
3.4.1 <i>Prechod tepla rovinnou stenou</i>	98
3.4.2 <i>Prechod tepla valcovou stenou</i>	101
3.4.3 <i>Prechod tepla pri premenlivých teplotách tekutín</i>	104
3.4.4 <i>Prechod tepla stenou z tekutiny do pôdy</i>	107
3.4.5 <i>Tepelná izolácia potrubí a valcových plôch</i>	108
3.5 Kombinovaný prenos tepla prúdením a sálaním	119
4 Nestacionárne vedenie tepla	123
4.1 Diferenciálna rovnica vedenia tepla	123
4.2 Podmienky jednoznačnosti	126
4.3 Nestacionárne jednorozmerné vedenie tepla v rovinatej doske	129
4.4 Nestacionárne jednorozmerné vedenie tepla vo valci	144

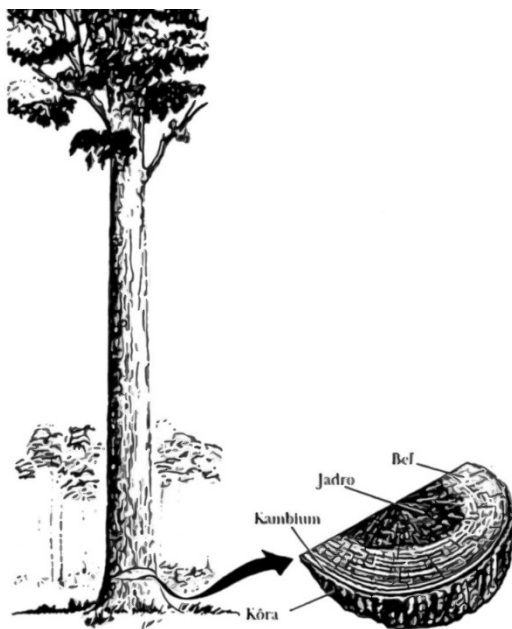
4.5	Nestacionárne dvoj a trojrozmerné vedenie tepla v telesách	151
4.6	Nestacionárne vedenie tepla v procese rozmrazovania zmrznutého dreva a výpočet doby rozmrazovania	157
4.7	Matematické modely pre riešenie nestacionárnych procesov termickej úpravy sortimentov dreva	162
4.8	Počítačové riešenie modelov tepelnej úpravy dreva	163
5	Tepelné systémy	173
5.1.1	<i>Parná výhrevňa</i>	175
5.1.2	<i>Horúcovodná výhrevňa</i>	175
5.1.3	<i>Tepláreň</i>	177
5.1.4	<i>Tepláreň s parnou turbínou</i>	177
5.1.5	<i>Teplárenský systém ORC</i>	179
5.2	Teplonosné tekutiny	181
5.2.1	<i>Vodná para</i>	182
5.2.2	<i>Voda</i>	183
5.2.3	<i>Termooleje</i>	185
5.2.4	<i>Vlhký vzduch</i>	185
5.3	Tepelné spotrebiče	191
5.3.1	<i>Defibrátory – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s priamym ohrevom dreva (štíepky) sýtou vodnou parou</i>	191
5.3.2	<i>Pariace zvony – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva nasýteným vlhkým vzduchom</i>	194
5.3.3	<i>Pariace autoklávy – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva sýtou vodnou parou</i>	195
5.3.4	<i>Zvlhčovacie komory vláknitých materiálov – tepelno-technologická charakteristika zvlhčovania vláknitých materiálov (T-DVD)</i>	198
5.3.5	<i>Pariace jamy – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva nasýteným vlhkým vzduchom</i>	199
5.3.6	<i>Bazény pre termickú úpravu dreva – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva teplou vodou</i>	201
5.3.7	<i>Lisovacie platne – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva lisovacími platňami</i>	202
5.3.8	<i>Sušiarne – tepelno-technologická charakteristika spotrebiča tepla s ohrevom dreva vlhkým vzduchom</i>	205
6	Normatívy spotrieb tepla a elektrickej energie v technológiách spracovania dreva	216
7	Matematické modely TZN spotreby tepla v termických a hydrotermických procesov obrábania dreva	221
7.1	Model TZN pre spotrebu tepla na parenie dreva v tlakových autoklávoch	221

7.2	Model TZN pre spotrebu tepla na termickú úpravu dreva v bazénoch	229
7.3	Model TZN pre spotrebu tepla na sušenia reziva v komorových sušiarňach	240
8	Prílohy	253
Tab. 1	Hustoty dreva niektorých drevín	254
Tab. 2	Tepelné vlastnosti vybratých materiálov	255
Tab. 3	Koeficient pomernej sálavosti sivých telies - technických materiálov ϵ	256
Tab. 4	Fyzikálne parametre vody na dolnej medznej krivke, $x = 0$	257
Tab. 5	Fyzikálne parametre sýtej vodnej pary na hornej medznej krivke, $x = 1$	258
Tab. 6	Stavové veličiny vriacej vody a sýtej vodnej pary v závislosti na teplote	259
Tab. 7	Stavové veličiny vriacej vody a sýtej vodnej pary v závislosti na tlaku	260
Tab. 8	Stavové veličiny vody a prehriatej vodnej pary v závislosti na tlaku	262
Tab. 9	Fyzikálne parametre suchého vzduchu pri tlaku 101325 Pa	263
Tab. 10	Fyzikálne parametre nasýtenej vodnej pary a vlhkého vzduchu v závislosti na teplote	264
Tab. 11	Relatívna vlhkosť vzduchu v závislosti na teplote suchého teplomera a psychrometrickej diferencie	267
Graf 1	Mollierov diagram h-s vodnej pary	268
Graf. 2	Diagram h- φ_x vlhkého vzduchu pri atmosférickom tlaku	269
9	Slovensko – anglicko – ruský slovník odborných termínov	270
10	Literatúra	277
11	Programy EXCEL pre výpočet normatívov spotrieb tepla technologických spotrebičov v technológiách spracovania dreva	

1 ŠTRUKTÚRA A VLASTNOSTI DREVA

1.1 Anatomická stavba dreva a jeho chemické zloženie

Drevo je biopolymér rastlinného pôvodu vytváraný geneticky zakódovaným systémom fotosyntetických a následných biochemických reakcií v kambiálnej časti drevnatých a krovinatých rastlín obr. 1.1.



Obr. 1.1 Kmeň stromu a rozloženie dreva jadra, bele, kambia a kôry po priereze kmeňa

Drevná hmota je vnútornou zdrevnatenou časťou kmeňa a konárov stromu bez kôry a lyka. Predstavuje 70 – 93 % objemu stromu. Štruktúra dreva a jeho vlastnosti sa vyznačuje anizotropiou, nehomogénnosťou a špecifickosťou v závislosti na druhu dreviny, ale i na rastových podmienkach stromu akými je klíma, typ pôdy, svahovitosť terénu a pod.

Drevo ihličnatých drevín má pomerne jednoduchú morfológickú stavbu vybudovanú z tracheíd (cievic) jarného a letného dreva. Tracheidy plnia pevnostnú a vodivú funkciu. Druhou skupinou buniek sú parenchymatické bunky v množstve 5 až 13 % objemu dreva tvoriace pletivá stržňových lúčov. V dreve niektorých ihličnatých drevín, akými sú napríklad: smrek

obyčajný, borovica lesná, limba, či smrekovec opadavý sa vyskytuje zvláštny typ parenchymatických buniek – epiteliálne bunky vytvárajúce sieť horizontálnych a vertikálnych živičných kanálikov.

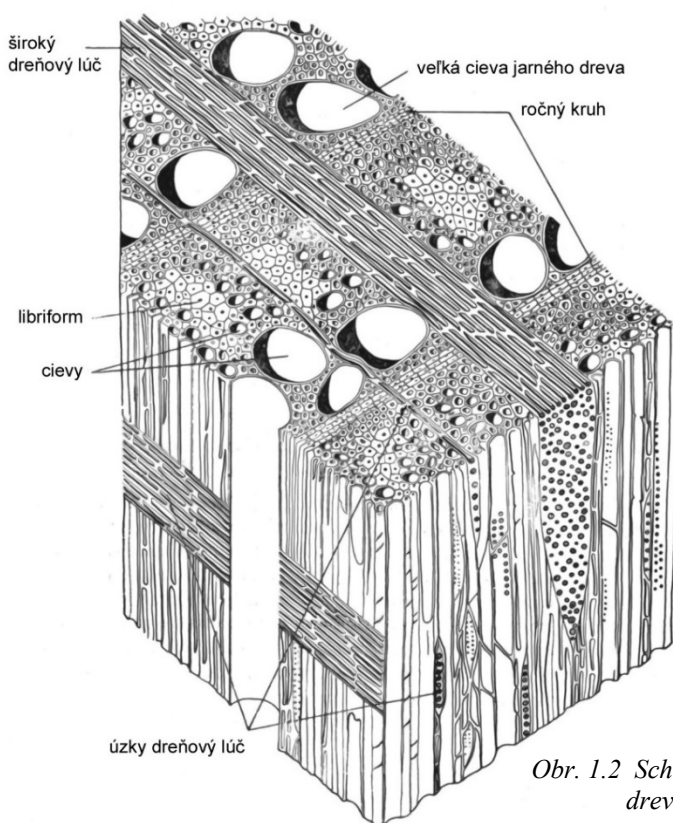
Drevo listnatých drevín – má v porovnaní s drevom ihličnatých drevín zložitejšiu štruktúru. Pozostáva z mechanických elementov (libriformných vlákien), vodivých elementov: tracheí (ciev), tracheíd (cievic) a zásobných elementov (parenchymatických buniek).

Pevnostnú funkciu v dreve listnatých drevín plnia predovšetkým hrubostenné sklerenchymatické bunky (libriformné vlákna) v objemovom zastúpení 36 – 76 %. Libriformné vlákna sú drevné bunky dlhé 0,3 až 2,2 mm a široké 5 až 30 μm . Ich prepojenosť (vzájomná, alebo s inými typmi buniek) je realizovaná prostredníctvom stenčením typu: bodiek, alebo dvojbodiek.

Vodivú funkciu v dreve listnatých drevín plnia cievy – tracheje v objemovom zastúpení 15 až 40 % a čiastočne aj cievovité a vláknité tracheidy. V dreve kruhovito-pórovitých listnatých drevín (dub, breza, jaseň) majú veľké cievy

v jarnom dreve priemer od 0,2 do 0,4 mm, zatiaľ čo malé cievy v letnom dreve iba priemer od 0,016 do 0,15 mm. Vodivá funkcia týchto bunkových elementov je významná tak pre transport živín v dreve počas života stromov, ako aj pre pohyb kvapalín v dreve v technologických procesoch sušenia, povrchovej úprave, či impregnácie dreva.

Podiel drevného parenchýmu v dreve listnatých drevín je vyšší než v dreve ihličnatých drevín. Súvisí to s tým, že drevo listnatých drevín potrebuje v jarnom období viac zásob na tvorbu novej asimilačnej plochy (listov). Zastúpenie buniek drevného parenchýmu v dreve listnatých drevín je od 8 do 35 %. Drevný parenchým listnatých drevín sa delí na parenchým stržňových lúčov (radiálny drevný parenchým) a axiálny drevný parenchým vytvárajúci vertikálne rady – reťazce parenchymatických buniek.



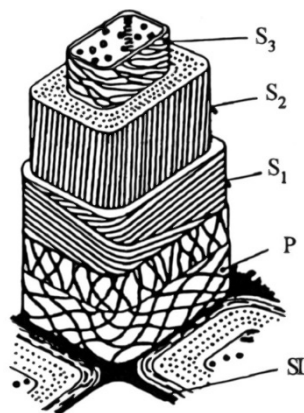
Na mikroskopickej snímke trojrozmerného elementu dreva na obr. 1.2 je zobrazená morfológická stavba dubového dreva.

Obr. 1.2 Schéma mikroskopickej štruktúry dreva dreviny dub, *Quercus petraea* L.

Jednotlivé stavebné elementy dreva (tracheje, tracheidy, libriformné vlákna, parenchymatické bunky) možno vo všeobecnosti charakterizovať ako uzavreté duté rúrky s kruhovým alebo eliptickým prierezom uložené rovnobežne s osou kmeňa. Jednotlivé bunky sú do kompaktného celku pospájané medzibunkovou silne lignifikovanou hmotou – strednou lamelou *SL* (obr. 1.3). Voľný vnútorný priestor buniek sa nazýva *lúmen*. Bunečné steny sú tvorené z vrstiev: primárnej vrstvy *P* a sekundárnej vrstvy bunečnej steny pozostávajúcej z troch vrstiev *S*₁, *S*₂ a *S*₃.

Jednotlivé vrstvy sa vyznačujú tak odlišnou hrúbkou, chemickým zložením, ako i fyzikálno-mechanickými vlastnosťami. Submikroskopickú štruktúru a skladbu jednotlivých vrstiev bunkovej steny drevných elementov zobrazuje obr. 1.3.

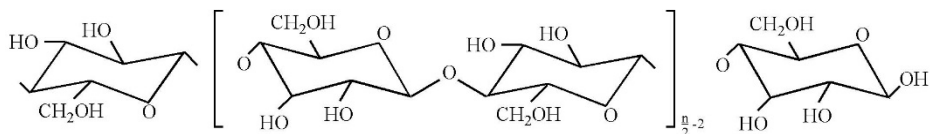
Základnou stavebnou jednotkou bunkových stien dreva sú **elementárne fibrily** t.j. zoskupenie 40 až 60 makromolekúl celulózy do zväzku s priemerom 3,5 až 10 nm a dĺžkou 30 až 80 nm. Zhluk 20 až 60 elementárnych fibríl s nepatrným podielom hemicelulóz a lignínu tvorí **makrofibrilu**. Z makrofibríl, hemicelulózových výplní a lignínových mikrovrstiev sú vytvorené **substančné lamely** – úzke doštičky, ktoré sú v jednotlivých vrstvách bunkovej steny ukladané pod iným sklonom voči osi bunky. Vzdialenosť medzi elementárnymi fibrilami o veľkosti 1 nm v makrofibrile sú označované ako **intermicelárne priestory**. Vzdialenosť medzi makrofibrilami v bunecnej stene o veľkosti 10 až 80 nm sa nazývajú **interfibrilárnym priestorom**. Interfibrilárne priestory vytvárajú v stenách drevných buniek bohato rozvetvenú sieť čiastočne vyplnené hemicelulózami, lignínom a pektínovými substanciami. Bunkové steny dreva sú do značnej miery priepustné pre plyny, polárne i nepolárne kvapaliny.



Obr. 1.3 Submikroskopická stavba bunkovej steny

Z chemického hľadiska bunecné stany jednotlivých stavebných elementov dreva sú tvorené z makromolekúl: celulózy, hemicelulóz, lignínu a nízkomolekulových – akcesorických látok nachádzajúcich sa najmä v lúmenoch buniek.

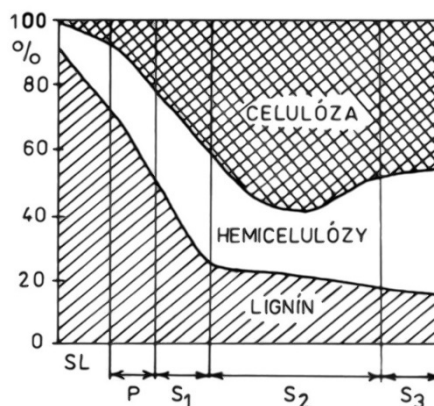
- **Celulóza** je základná chemická zložka dreva. Tvorí kostru bunkových stien. Podiel celulózy v drevnej hmote ihličnatých drevín je v rozpätí hodnôt 48 ÷ 56 %. V dreve listnatých drevín jej podiel je o niečo nižší, pohybuje sa v rozpätí hodnôt 46 ÷ 48 %. Z chemického hľadiska je celulóza polysacharid zložený z D-anhydroglukopyranózových jednotiek navzájom pospájaných (1→4)-β-D-glukozidickou väzbou obr. 1.4.



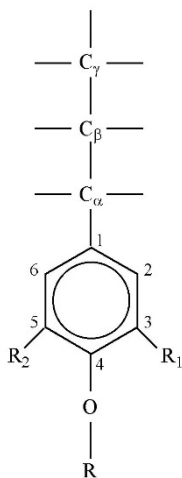
Obr. 1.4 Schéma makromolekuly celulózy

Zastúpenie celulózy v jednotlivých vrstvách bunecných stien listnatých drevín nie je rovnomerné (obr. 1.5). Najvyššia koncentrácia celulózy v bunecnej stene je v strednej vrstve S₂ sekundárnej steny.

Obr. 1.5 Podiely celulózy, hemicelulózy a lignínu vo vrstvách bunkovej steny dreva listnatých drevín, Blažej (1975)



- Hemicelulózy** sú málo vetvené heteropolysacharidy s nižším polymerizačným stupňom pozostávajúce z pentóz a hexóz: L-ramnóza, L-fukóza, L-arabínóza, D-xylóza, D-manóza, D-glukóza a D-galaktóza. Niektoré hemicelulózy obsahujú aj urónové kyseliny: 4-O-metyl- α -D-glukurónovú kyselinu a α -D-glukurónovú kyselinu. Hemicelulózy majú amorfnú formu a podobne ako lignín vyplňajú medzifibrilárne priestory bunkových stien. Najvyššia koncentrácia hemicelulózy v bunecnej stene je vo vrstve S_3 sekundárnej steny. V závislosti od dreveniny ich množstvo v dreve kolíše v rozpätí 20 až 30 %.
- Lignín** je tretím významným komponentom podieľajúcim sa na stavbe bunecnej steny drevených vlákien. V drevenej hmote jeho zastúpenie je od 20 do 30 %. Vyšší obsah lignínu má drevo ihličnatých drevín v rozpätí 25 – 30 %, než drevo listnatých drevín obsahujúce lignín v množstve od 20 – 25 %. Makromolekula lignínu má výrazne odlišnú štruktúru od štruktúry polysacharidov (celulózy a hemicelulózy). Možno ju charakterizovať ako trojdimenzionálny reťazovo rozvetvený amorfny polymér tvorený z fenylpropánových jednotiek s rôznou substitúciou na benzénovom jadre a postrannom reťazci obr. 1.6. Základné fenylpropánové jednotky sú v makromolekule lignínu navzájom pospájané väzbou dvoch uhlíkov „C–C“, alebo éterickou väzbou „C–O–C“. Najvyššia koncentrácia lignínu je v strednej lamele SL a primárnej stene P .



Obr. 1.6 Základná stavebná fenylpropánová jednotka lignínu

- $R \rightarrow -H$, alebo alkyl, aryl, acyl a iné
 $R_1 \rightarrow -OCH_3$, alebo (zriedka) $-H$
 $R_2 \rightarrow -OCH_3$, alebo $-H$, $-C$ (bifenyl, fenylkumaran, a i)

Akcesorické (sprievodné) látky sa nachádzajú hlavne v lúmenoch buniek. Sú anorganického a organického pôvodu. **Anorganické sprievodné látky** sú minerálne látky, ktoré boli vodou koreňovým systémom dopravené z pôdy do stromu počas jeho rastu. Sú nevyhnutné pre rast stromu. Ich zastúpenie v dreve je v rozpätí 0,4 – 0,7 % a v kôre o čosi vyššie 1 – 1,5 %. V objeme 1 m³ drevnej hmoty v závislosti na drevine a veku stromu sa nachádzajú v množstve cca 3 – 5 kg, *Simanov (1995)*. Z chemického hľadiska sú to uhličitaný a sírany: CaCO₃, MgCO₃, FeCO₃, CaSO₄, MgSO₄, komplexné kremičitaný hliníka, horčíka, vápnika, železa, sodíka a draslíka, malé množstvá alkalických kovov, fosforečnanov, halogénové minerály: NaCl, KCl a v stopových množstvách i prvky ťažkých kovov: Zn, Cu, Co, Ni, Cr, Pb, V, Cd. **Organické sprievodné látky** zahŕňujú skupinu viac ako 50 nízkomolekulových organických látok *Blažej a kol. (1975)*, ktoré boli extrahované z jednotlivých častí stromov – dreva, kôry, ihličia a listia. Z chemického hľadiska ich možno zaradiť medzi: sacharidy, fenoly, terpény, acyklické kyseliny, triesloviny, alkoholy a bielkoviny.

1.2 Fyzikálne vlastnosti – hustota a vlhkosť dreva

Drevo ako technický materiál sa radí medzi: **kapilárno-pórovito-koloidné materiály** t.j. látky s kapilárno-pórovitou štruktúrou, pričom steny kapilár majú vlastnosti elastických obmedzene napúčajúcich gélov. Charakteristickým znakom týchto materiálov je skutočnosť, že v makrokapilárach (lúmenoch jednotlivých bunečných elementov), v mikrokapilárach bunečných stien a v mezifibrilárnych priestoroch v bunečných stenách sa nachádza menšie, či väčšie množstvo vody.

Podľa charakteru väzieb vody s drevom rozoznávame v dreve: **vodu adsorpčnú** nachádzajúcu sa na povrchu mikrofibril vo forme monomolekulárnej vrstvy, resp. dvoch, či troch vrstiev vody viažucej sa Van der Valsovými silami medzi voľnými OH skupinami lignín-sacharidickej matrice dreva a polárnymi molekulami vody, **vodu hygroskopickú** nachádzajúcu sa v mezifibrilárnych priestoroch a mikrokapilárach bunečných stien s polomerom $r < 10^{-7}$ m a **vodu voľnú** nachádzajúcu sa v makrokapilárach - lúmenoch buniek.

Drevo v absolútne suchom stave pozostáva z bunkových stien a vzduchu nachádzajúcom sa v mikrokapilárach bunečných stien a v lúmenoch buniek. Hmota bunkových stien dreva je označovaná pojmom **drevná substancia**. Hustota drevnej substancie je pomerne stála hodnota v intervale 1490 až 1590 kg.m⁻³, ktorá sa mení nepatrne v závislosti na chemickom zložení bunkových stien jednotlivých stavebných elementov dreva. Priemerná hodnota hustoty drevnej substancie je $\rho_{ds} = 1\,540$ kg.m⁻³.

Odlišnosť v anatomickej stavbe dreva a kvantitatívnom zastúpení jednotlivých morfológických elementov v dreve jednotlivých drevín sa premieta v hustote absolútne suchého dreva

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad (1.1)$$

kde: m_0 – hmotnosť dreva po vysušení na konštantnú hodnotu, kg;
 V_0 – objem dreva po vysušení na konštantnú hodnotu hmotnosti, m^3 .

Interval hustôt dreva jednotlivých drevín v absolútne suchom stave je značne široký. Za najľahšie drevo sa pokladá drevo dreviny balza (*Ochroma lagopus*) s hustotou v absolútne suchom stave $\rho_0 = 130 \text{ kg.m}^{-3}$. Najťažším drevom je drevo dreviny quajak (*Piratinera quaianensis*) s hustotou $\rho_0 = 1363 \text{ kg.m}^{-3}$. Drevo drevín rastúcich v miernom pásme je podľa hustoty dreva v suchom stave rozdeľované do troch skupín: ľahké drevo s hustotou $\rho_0 < 550 \text{ kg.m}^{-3}$, stredne ťažké drevo s hustotou $\rho_0 = 560 \div 750 \text{ kg.m}^{-3}$ a ťažké drevo s hustotou $\rho_0 > 760 \text{ kg.m}^{-3}$ (tabuľka 1.1).

Tabuľka 1.1 Rozdelenie dreva drevín rastúcich v miernom pásme podľa hustoty v absolútne suchom stave

Skupina	Hustota dreva v absolútne suchom stave ρ_0	Drevina
Ľahké drevo	$\rho_0 < 550 \text{ kg.m}^{-3}$	smrek, jedľa, duglaska, borovica, limba, smrekovec, topoľ, lipa, vŕba, osika, jelša, gaštan
Stredne ťažké drevo	$560 < \rho_0 < 750 \text{ kg.m}^{-3}$	javor, breza, buk, dub, jaseň, brest, agát
Ťažké drevo	$\rho_0 > 760 \text{ kg.m}^{-3}$	hrab

Na hustotu dreva má značný vplyv **vlhkosť dreva** t.j. kvantitatívny údaj vyjadrujúci podiel hmotnosti vody nachádzajúcej sa v jednotke dreva. V technológiách spracovania dreva je zaužívané vlhkosť dreva vyjadrovať prostredníctvom tzv. **absolútnej vlhkosti** W .

Absolútna vlhkosť dreva je definovaná ako podiel hmotnosti vody nachádzajúcej sa vo vzorke dreva k hmotnosti vzorky dreva v absolútne suchom stave.

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} 100, \quad (1.2)$$

kde: m_w – hmotnosť vlhkej vzorky dreva, kg;
 m_0 – hmotnosť vzorky dreva po vysušení na absolútne suchý stav, kg.

Vlhkosť dreva čerstvo zoťatého stromu je vždy vyššia než medza hygroskopickosti. Množstvo vody v dreve stromu sa mení v pomerne širokých medziach v závislosti od druhu dreviny, ročného obdobia a polohy v kmeni. Ihličnaté dreviny majú vlhkosť zrelého dreva a jadra podstatne nižšiu než vlhkosť bele. Listnaté dreviny nemajú tak výrazný rozdiel vlhkosti po priereze kmeňa. Priemerné hodnoty vlhkosti dreva jadra, resp. zrelého dreva a bele v čerstvo zoťatom strome pre niektoré dreviny uvádza tabuľka 1.2.

Tabuľka 1.2 Vlhkosť dreva v čerstvo zoťatom strome, Sergovskij (1975)

Drevina	Absolútna vlhkosť dreva W [%]		
	Jadro, alebo zrelé drevo	Beľ	Priemer
Smrek obyčajný	30 ÷ 40	100 ÷ 120	60 ÷ 100
Borovica lesná	30 ÷ 40	100 ÷ 120	60 ÷ 100
Smrekovec opadavý	40 ÷ 50	100 ÷ 120	50 ÷ 70
Breza biela	60 ÷ 90	70 ÷ 90	65 ÷ 90
Jaseň štíhly	35 ÷ 40	35 ÷ 40	35 ÷ 40
Dub zimný	50 ÷ 80	70 ÷ 80	60 ÷ 80

Hygroskopicky viazaná voda je tá časť vody v dreve, ktorá sa nachádza v medzifibrilárnych priestoroch v bunečných stenách a v mikrokapilárach bunečných stien s polomerom $r < 10^{-7}$ m. V hmote bunečných stien je viazaná voda nachádzajúca sa v mikrokapilárach pútaná fyzikálno-chemickými väzbami. Pohlcovanie molekúl vody makrofibrilami vyvoláva zhrubnutie (napúčanie) bunečných stien. Opačným procesom je zosychanie t.j. znižovanie rozmerov dreva v dôsledku úbytku viazanej vody. Keďže hmota bunkových stien má vlastnosti obmedzene napúčajúcich koloidných látok obsah viazanej vody v nej je ohraničený maximálnou hodnotou. Stav, v ktorom drevo obsahuje maximálne množstvo viazanej vody a vôbec neobsahuje vodu voľnú sa nazýva **bodom nasýtenia vlákien** W_{BNV} . Hodnoty bodu nasýtenia vlákien dreva jednotlivých drevín uvádza tabuľka 1.2.

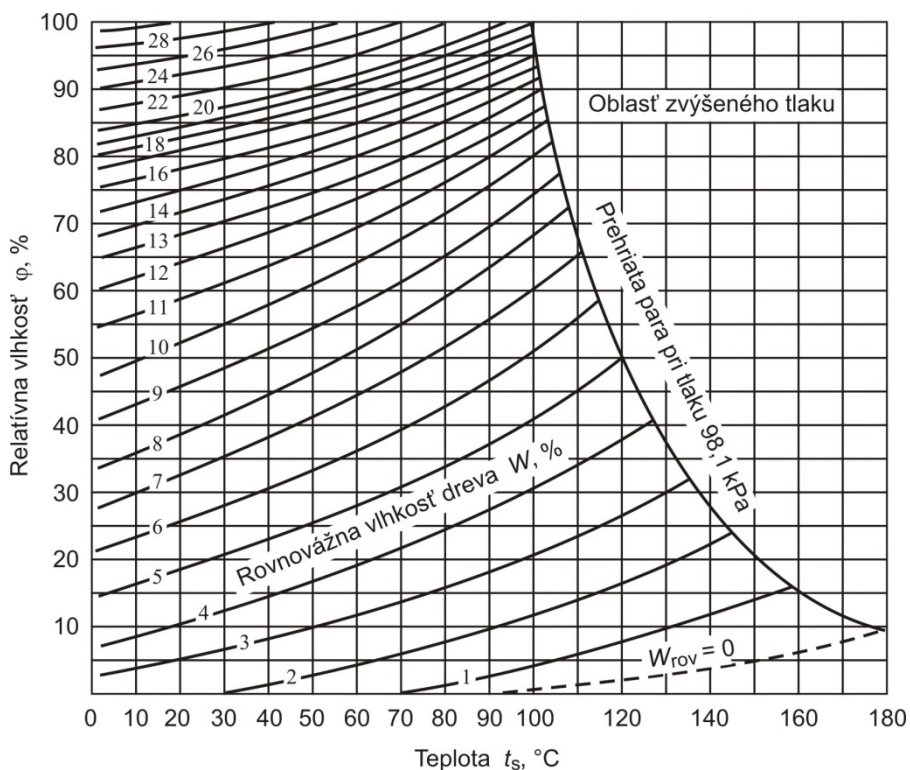
Tabuľka 1.3 Hodnoty bodu nasýtenia vlákien dreva jednotlivých drevín
R. Trendelenburg (1939)

Drevina	W_{BNV} , %
Agát biely - jadro	20
Dub zimný - jadro	22
Gaštan - jadro	22
Orech – jadro	24
Čerešňa – jadro	24
Jaseň štíhly	25
Smrekovec opadavý - jadro	26
Javor horský	28
Smrekovec opadavý - beľ	29
Dub zimný - beľ	29
Agát biely - beľ	30
Borovica lesná - jadro	30
Buk lesný	31
Hrab obyčajný	31
Smrek obyčajný	32
Breza biela	32
Jedla biela	34
Topoľ	35
Lipa veľkolistá	36 ÷ 40

Pre väčšinu drevín má absolútna vlhkosť dreva pri teplote $t = 20$ °C a relatívnej vlhkosti vzduchu $\varphi = 100$ % hodnotu približne $W_{BNV} \approx 30$ %. Pri zvyšovaní teploty sa bod nasýtenia vlákien znižuje, napr. pri teplote 100 °C a relatívnej vlhkosti

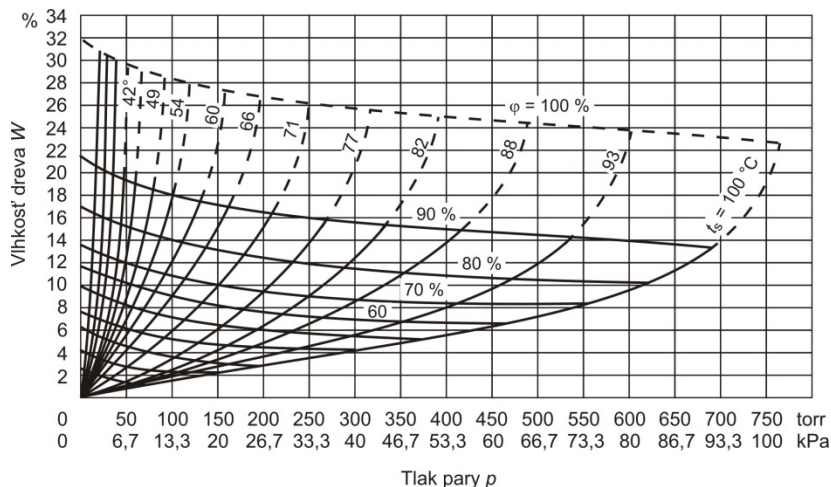
vzduchu $\varphi = 100 \%$ je jeho hodnota približne 20% . Vplyv teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu na vlhkosť stav dreva zobrazuje: **diagram rovnovážnej vlhkosti dreva $t - \varphi - W$** . Na obr. 1.7 je diagram rovnovážnej vlhkosti *N. N. Čulického*, zobrazujúci krivky rovnovážnej vlhkosti dreva pre rozpätie teplôt $t = 0 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$, relatívnu vlhkosť vzduchu $\varphi = 0 \div 100 \%$ a atmosférický tlak $p = 98,1 \text{ kPa}$.

Rovnovážnou vlhkosťou dreva sa označuje absolútna vlhkosť dreva pod bodom nasýtenia vlákien, pri ktorom procesy sorpcie (navlhčenie, napúčanie) a desorpcie (vysychanie, zosychanie) dreva sú pri stálej teplote a relatívnej vlhkosti plynného prostredia ustálené t.j. parciálny tlak vodnej pary na povrchu makrofibril v bunkových stenách je rovný parciálnemu tlaku vodnej pary okolitého vzduchu. Z diagramu na obr. 1.7 plynie, že rovnovážna vlhkosť dreva v prostredí vlhkého atmosférického vzduchu, pri teplote $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a relatívnej vlhkosti $\varphi = 65 \%$, je $W = 12 \%$. Inými slovami povedané, že drevo dlhodobo uložené v plynnom prostredí s danou teplotou a relatívnou vlhkosťou má a bude mať absolútnu vlhkosť dreva 12% .



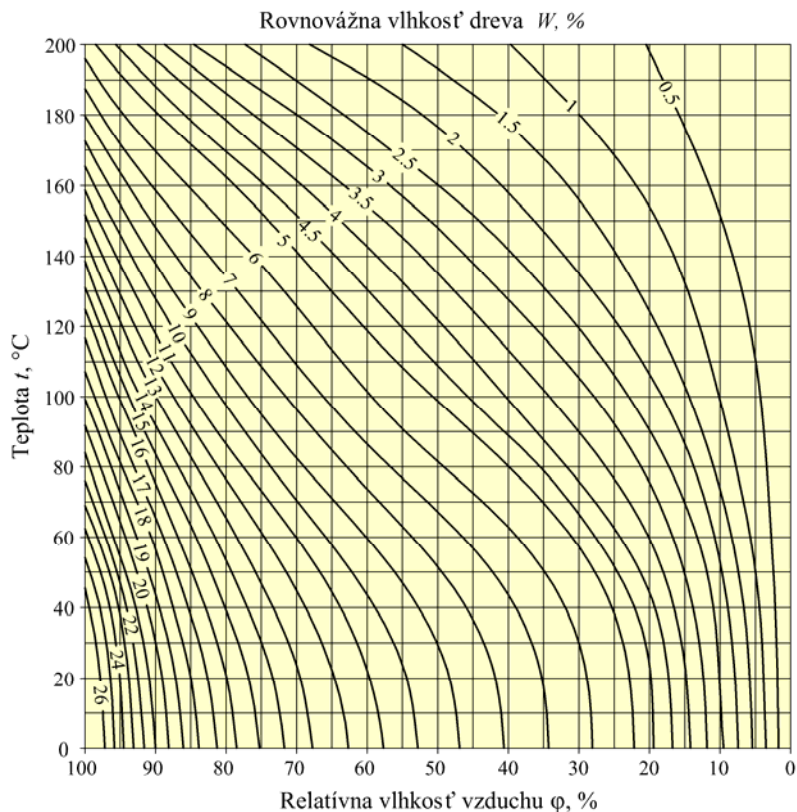
Obr. 1.7 Diagram rovnovážnej vlhkosti dreva $t - \varphi - W$

Na obr. 1.8 je diagram rovnovážnej vlhkosti dreva $p_p - W - t_s - \varphi$ (podľa Loughbourougha), uvádzajúci rovnovážnu vlhkosť dreva W v závislosti na tlaku vodných pár p_p a teplote vzduchu t_s .



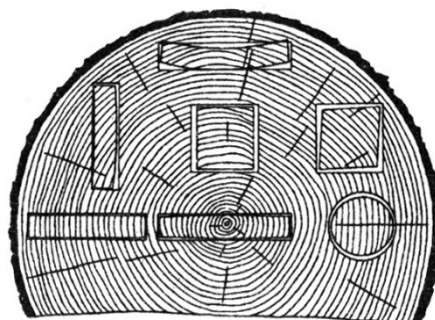
Obr. 1.8 Diagram rovnovážnej vlhkosti dreva $p_p - W - t_s - \phi$

Pre potreby technickej praxe je na obr. 1.9 zobrazený nomogram rovnovážnej vlhkosti dreva $t - \phi - W$ navrhnutý Deliiskim pre rozpätie teplôt $\Delta t = 0 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$, relatívnu vlhkosť vzduchu $\phi = 0 \div 100 \%$ a tlak $p \leq 1,5 \text{ MPa}$.



Obr. 1.9 Diagram rovnovážnej vlhkosti dreva pre rozpätie teplôt $t = 0 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ a relatívnu vlhkosť vzduchu $\phi = 0 \div 100 \%$

Zmeny rozmerov trojrozmerných telies dreva pri: **zosychaní**, resp. **napučíavaní**, vyvolané zmenou vlhkosti dreva pod bodom nasýtenia vlákien, nie sú rovnaké. Vplyvom anizotropie dreva najväčšie zmeny rozmerov dreva sú v tangenciálnom smere, približne 1,5 až 2 krát menšie sú v radiálnom smere a 15 až 40 krát menšie sú v pozdĺžnom smere. Uvedené skutočnosti sú príčinou tvarových zmien dreva (obr.1.10) a priečného šúverenia hranečných piliarskych výrobkov.



Obr. 1.10 Tvarové zmeny dreva pri zosychaní pod medzou hygroskopickosti

Mierou rozmerovej zmeny dreva pri zosychaní, resp. napučaní dreva v oblasti hygroskopicky viazanej vody je **koeficient zosychania**, resp. **koeficient napučania dreva**, ktorý udáva veľkosť relatívneho zoschnutia, resp. napučania dreva pri zmene vlhkosti dreva pod bodom nasýtenia vlákien o 1%.

$$k_i = \frac{\alpha_{\max i}}{W_{BNV}}, \quad (1.3)$$

kde: $\alpha_{\max i}$ – maximálna hodnota relatívneho zosychania dreva v danom smere, %;
 W_{BNV} – bod nasýtenia vlákien, %.

Hodnoty koeficientov lineárneho zosychania dreva v tangenciálnom a radiálnom smere, hodnoty koeficienta objemového zosychania dreva a redukovanej hustoty dreva uvádza tabuľka 1.4.

Tabuľka 1.4 Vybraté fyzikálne vlastnosti dreva podľa prác: Perelygin (1965), Regináč (1990), Požgaj a kol. (1997), Kurjatko a kol. (2010)

Drevina	Hustota dreva ρ_0 [kg.m ⁻³]	Koeficienty zosychania dreva			Redukovaná hustota ρ_r [kg.m ⁻³]
		tangenciálne [-]	radiálne [-]	objemové [-]	
Smrek	430	0,28	0,16	0,52	380
Jedľa	410	0,36	0,12	0,49	370
Borovica	510	0,32	0,19	0,52	430
Smrekovec	550	0,40	0,19	0,63	460
Buk	680	0,41	0,17	0,58	560
Dub	720	0,34	0,18	0,52	550
Jaseň	680	0,37	0,17	0,54	570
Javor	590	0,35	0,21	0,56	500
Hrab	790	0,41	0,21	0,62	650
Breza	610	0,34	0,27	0,64	520
Lipa	490	0,38	0,22	0,61	425
Osika	400	0,35	0,14	0,51	360
Jelša	510	0,29	0,14	0,44	440

Koeficienty zosychania, resp. napučania dreva sú určitými charakteristikami dreva. Koeficient objemového zosychania vyjadruje hutnosť stavby dreva t.j. množstvo drevnej substancie v jednotke jeho objemu. Čím viac drevnej substancie obsahuje drevo dreviny, tým väčšie je jej zosychanie. Obecne platí, že zosychanie je úmerné jeho hustote, avšak ako uvádza *Perelygin (1965)* aj táto závislosť má výnimky. Lipové drevo zosycha približne rovnako ako drevo brezy napriek tomu, že hustota lipového dreva je 1,2 krát menšia, než hustota brezového dreva.

Vplyv viazanej vody na hustotu vlhkého dreva pod bodom nasýtenia vlákien ($W \leq W_{\text{BNV}}$) popisuje *Požgaj a kol. (1997)* matematickým vzťahom:

$$\rho_w = \rho_0 \left(\frac{1+W}{1+0,933 \rho_0 W} \right) \quad , \quad (1.4)$$

kde: ρ_0 – hustota absolútne suchého dreva, g.cm^{-3} ;
 W – absolútna vlhkosť dreva ($W \leq W_{\text{BNV}}$), kg.kg^{-1} .

Deliiski (2003) zohľadňujúci vplyv vlhkosti a teploty na hustotu vlhkého dreva pod bodom nasýtenia vlákien uvádza vzťah:

$$\rho_w = \rho_r \frac{(1+W)}{1-9,3 \cdot 10^{-4} \rho_r (W_{\text{BNV}} - W)} \quad (1.5)$$

$$W_{\text{BNV}} = W_{\text{BNV}}^{20} - 0,001 \cdot (T - 293,15) \quad (1.6)$$

kde: ρ_r – redukovaná hustota dreva, kg.m^{-3} ;
 W – absolútna vlhkosť dreva ($W \leq W_{\text{BNV}}$), kg.kg^{-1} ;
 W_{BNV} – bod nasýtenia vlákien dreva pri teplote T , kg.kg^{-1} ;
 W_{BNV}^{20} – bod nasýtenia vlákien dreva pri teplote $T = 293,15 \text{ K}$, kg.kg^{-1} .

V technickej praxi pri sušení dreva, impregnácií a v odberateľsko-dodávateľských vzťahoch je množstvo drevnej substancie v jednotke objemu mokrého dreva nad medzou hygroskopickosti dreva vyjadrované redukovanou hustotou dreva.

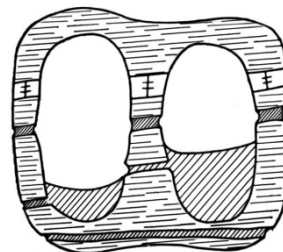
Redukovaná hustota dreva ρ_r je definovaná podielom hmotnosti dreva v absolútne suchom stave m_0 a jeho maximálneho objemu V_{max} na medzi hygroskopickosti dreva. Niektorí autori, ako: *Požgaj a kol. (1997)*, *Trebula (1989)*, *Kurjatko a kol. (2010)* používajú pojem **redukovaná hustota dreva v čerstvom stave $\rho_{r\check{c}}$** , ktorým označujú podiel hmotnosti sušiny vzorky dreva m_0 a jej objemu V_{max} v mokrom stave po zoľatí stromu.

$$\rho_r = \frac{m_0}{V_{\text{max}}} \quad , \quad (1.7)$$

kde: m_0 – hmotnosť dreva v absolútne suchom stave, kg ;
 V_{max} – objem dreva pri vlhkosti $W \geq W_{\text{BNV}}$, m^3 .

Hodnoty redukovanej hustoty dreva niektorých drevín rastúcich v severnom miernom pásme podľa prác: *Perelygin (1965)*, *Regináč (1990)*, *Požgaj a kol. (1997)*, *Kurjatko a kol. (2010)* uvádza tabuľka 1.4.

Voľná voda je tá časť celkovej vody, ktorá sa nachádza v makrokapilárach (lúmenoch buniek) a na povrchu dreva. Keďže, polomery lúmenov buniek sú väčšie než $r > 10^{-7}$ m, sily kapilárnej príťažlivosti sú zanedbateľné a voda voľná sa v dreve udržuje len mechanicky vzájomnou súdržnosťou molekúl vody a jej priľnavosťou na povrchu dreva. Množstvo voľnej vody v dreve je závislé na morfologickej stavbe dreva a miere zaplnenia lúmenov vodou. Maximálne množstvo vody vyjadrené formou maximálnej absolútnej vlhkosti dreva danej dreviny kvantifikuje prostredníctvom hodnoty bodu nasýtenia vlákien dreva a hustoty dreva v suchom stave matematický vzťah:



Obr. 1.11 Voda voľná v lúmenoch buniek

$$W_{\max} = W_{BNV} + \frac{1540 - \rho_0}{1540 \rho_0} \cdot 100, \quad (1.8)$$

kde: ρ_0 – hustota absolútne suchého dreva, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

W_{BNV} – medza hygroskopickosti dreva, %.

Závislosť zmeny hustoty mokrého dreva na zmene vlhkosti nad bodom nasýtenia vlákien prostredníctvom redukovanej hustoty vyjadruje matematický zápis:

$$\rho_w = \rho_r (1 + W) \quad (1.9)$$

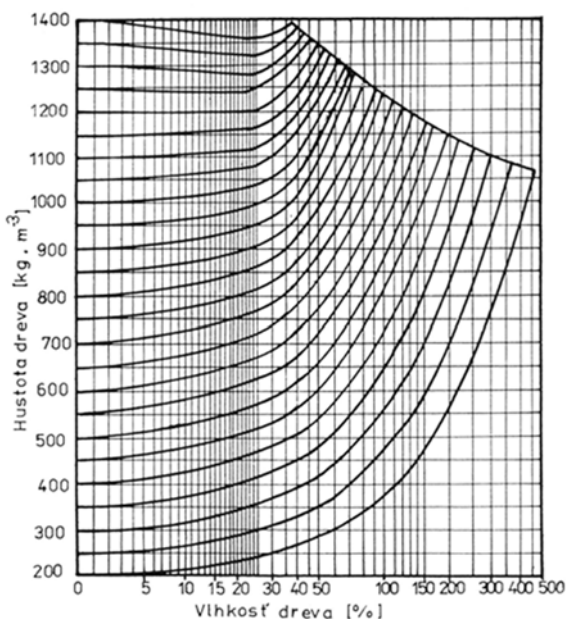
kde: ρ_r – redukovaná hustota

dreva, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

W – absolútna vlhkosť dreva

($w > w_{BNV}$), $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

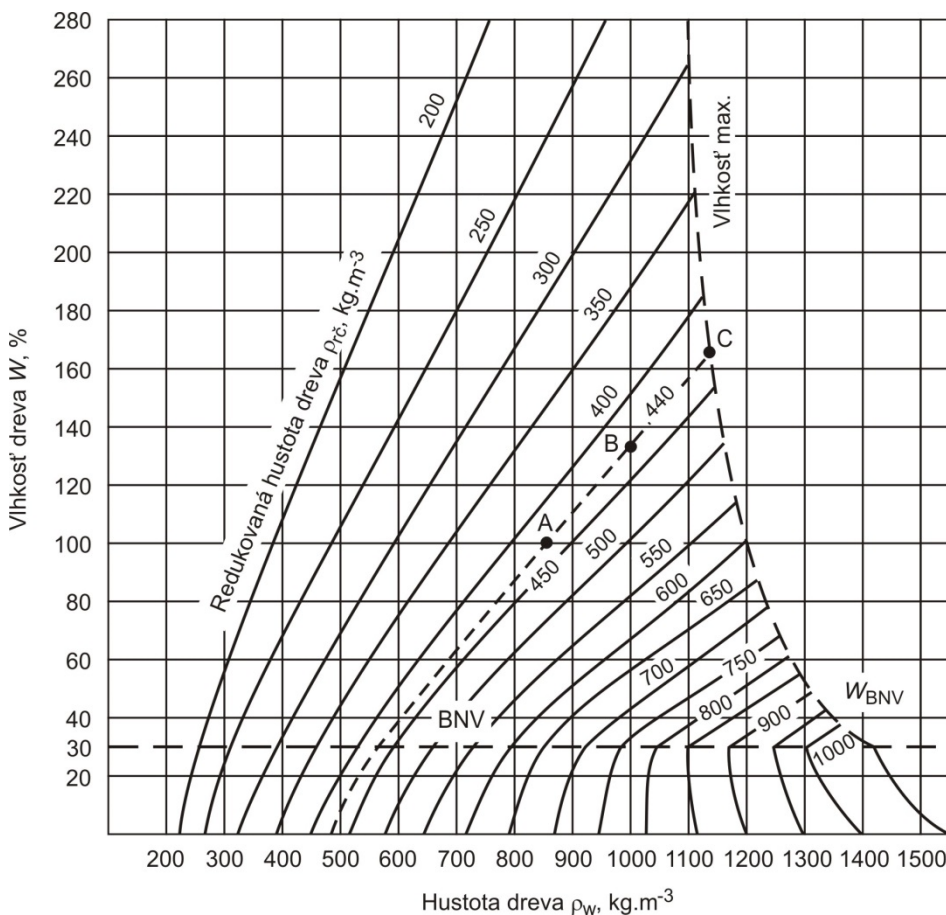
Na stanovenie hustoty dreva z závislosti na vlhkosti dreva sú v odbornej literatúre uvádzané diagramy a nomogramy viacerých autorov. Na obr. 1.12 je uvedený nomogram pre stanovenie hustoty dreva v závislosti na vlhkosti dreva.



Obr. 1.12 Nomogram pre stanovenie hustoty dreva pri rôznej vlhkosti dreva, *Kollmann (1951)*

Podľa uvedeného nomogramu je možné stanoviť hustotu dreva pri vlhkosti dreva v rozsahu od 0 % do 450 %, ak je známa hustota dreva v absolútne suchom stave ρ_0 . Príkladom použitia daného nomogramu je stanovenie hustoty borovicového dreva pri absolútnej vlhkosti $W = 50$ %. Z priesečníka izoplety hustoty suchého borovicového dreva $\rho_0 = 510 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vlhkosti $W = 50$ % vyplýva, že hustota mokrého borovicového dreva je $\rho_w = 660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Inou grafickou pomôckou pre stanovenie hustoty vlhkého dreva je na obr. 1.13 nomogram: ρ_w - W - ρ_r umožňujúci stanoviť hustotu dreva v závislosti na vlhkosti dreva W a redukovanej hustote dreva ρ_r .



Obr. 1.13 Nomogram ρ_w - W - ρ_r , Krečetov (1932)

Prostredníctvom uvedeného diagramu je možné stanoviť:

- redukovanú hustotu dreva ρ_r pre drevo ľubovoľnej drevice na základe hustoty dreva v absolútne suchom stave ρ_0 ;
- hustotu vlhkého dreva ρ_w pri ľubovoľnej absolútnej vlhkosti dreva W na základe redukovanej hustoty dreva ρ_r ;
- maximálnu vlhkosť dreva danej drevice W_{\max} .

Podľa uvedeného nomogramu mokré drevo borovice lesnej s redukovanou hustotou $\rho_r = 430 \text{ kg.m}^{-3}$ pri absolútnej vlhkosti $W = 100 \%$ má hustotu $\rho_w = 860 \text{ kg.m}^{-3}$ (bod A na obr. 1.13), hustotu $\rho_w = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ má borovicové drevo pri absolútnej vlhkosti $W = 135 \%$ (bod B na obr. 1.13), maximálna absolútna vlhkosť borovicového dreva je $W_{\max} = 165 \%$ (bod C na obr. 1.13).

1.3 Zmrznuté drevo

Voda nachádzajúca sa v mokrom dreve uloženom v priestoroch s teplotou nižšou než je $t \leq -2 \text{ }^\circ\text{C}$, Kanter (1955), Čudinov (1968), sa mení na ľad (zamŕza), voda voľná úplne, viazaná voda čiastočne. Zamŕzanie voľnej a viazanej vody v dreve je zložitý proces zohľadňujúci špecifiká morfolologickej stavby dreva, molekulárnej fyziky a chemického zloženia vody – vodného roztoku nízkej koncentrácie organických a anorganických látok.

Z molekulárnej fyziky je známe, že čím je menší polomer kapiláry, tým väčšie je nutné podchladenie, aby sa začal proces kryštalizácie vody nachádzajúcej sa v kapiláre. Navyše steny makro kapilár bunecných elementov dreva sú tenké ($\sim 0,005 \text{ mm}$), vysoko elastické blany, ktoré pri kryštalizácii vody môžu deformovať. Istým obmedzením deformácie bunecných stien kapilár je lignín nachádzajúci sa v bunecných stenách, ktorý znižuje elasticnosť bunkových stien a tým prispieva k tomu, že zamŕzanie vody voľnej v lúmenoch buniek dreva pri atmosférickom tlaku je podľa prác Čudinova (1968) v teplotnom intervale $\Delta t = -1$ až $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Na teplotu zamŕzania voľnej vody v dreve má vplyv aj obsah a zloženie živných látok rozpustených vo vode nachádzajúcich sa v lúmenoch buniek. Uvedenou skutočnosťou sa vysvetľuje nižšia teplota zamŕzania vody v dreve živých stromov než je teplota zamŕzania voľnej vody v zoŕatých stromoch, aj keď obsah lignínu je rovnaký.

Proces zamŕzania viazanej vody v dreve prebieha v porovnaní so zamŕzaním voľnej vody v ďaleko širšom intervale teplôt. Tento proces je zložitejší, tak v dôsledku tenko-disperznej stavby bunecných stien, väčšej variabilite rozmerov mikrokapilár v bunecných stenách s menším polomerom než sú polomery makrokapilár lúmenov bunecných stien, ako aj druhov viazanej vody v bunecných stenách.

Adsorpčná voda v monomolekulárnej vrstve nemôže kryštalizovať, pretože v tvorbe ľubovoľného kryštálu musia byť molekuly vody rozmiestnené v priestore a nie v jednej rovine. To je jeden z vážnych argumentov, podľa ktorých nie všetka viazaná voda v dreve sa môže meniť na ľad. Ak sa v submikrokapiláre nachádzajú molekuly vody usporiadané v troch vrstvách, tak tvorba kryštálov ľadu je principiálne možná, ale značne obmedzovaná tak Van der Waalsovými silami medzi hydroxylovými skupinami lignín sacharidickej matrice a monomolekulárnou vrstvou vody, ako aj vodíkovými väzbami medzi molekulami vody v jednotlivých vrstvách. Zamŕzanie vody pri týchto podmienkach je uskutočňované pri veľmi nízkych teplotách pod hodnotou $t \leq -50 \text{ }^\circ\text{C}$. Zložitá je aj kryštalizácia vody v usporiadaných desiatych a viacerých vrstvách molekúl vody v submikrokapilárach. Potvrdzujú to experi-

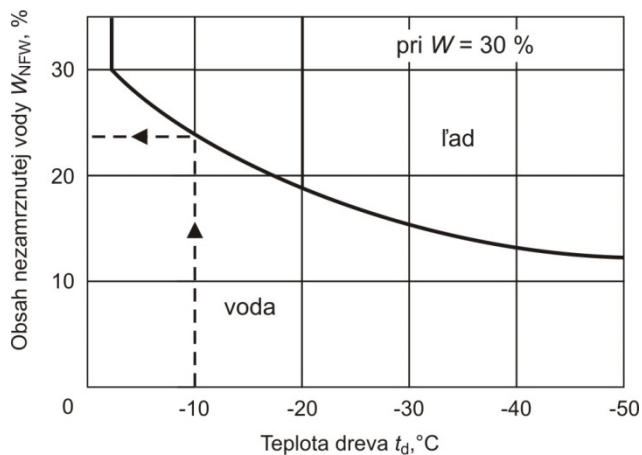
menty, podľa ktorých viazaná voda v dreve pri absolútnej vlhkosti dreva $W \approx 12\%$ nie je zamrznutá ani pri teplote $t = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zamŕzanie hygroscopickej viazanej vody nachádzajúcej sa v bunečných stenách pri vyššej vlhkosti než je absolútna vlhkosť dreva $W \approx 12\%$ po bod nasýtenia vlákien, je závislé od jej množstva v dreve a teploty prostredia, v ktorom sa drevo nachádza. Viazaná voda nachádzajúca sa v dreve pri vlhkosti $W = 20\%$ sa mení na ľad pri teplote $t = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a viazaná voda nachádzajúca sa v dreve pri vlhkosti $W = 30\%$ sa mení na ľad pri teplote $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Množstvo nezmrznutej vody v dreve (W_{NFW}) v závislosti od teploty matematicky popisujú Čudinov-Stepanov (1968) vzťahom (1.10) a pre absolútnu vlhkosť dreva $W = 30\%$ ju graficky zobrazuje obr. 1.14.

$$W_{\text{NFW}} = 12 + 18 e^{0,0567(t_d + 2)}, \quad (1.10)$$

kde: W_{NFW} – obsah nezmrznutej vody v dreve, %;
 t_d – teplota dreva, $^{\circ}\text{C}$.



Obr. 1.14 Závislosť obsahu nezamŕzajúcej vody v dreve od teploty dreva t_d pri vlhkosti $W = 30\%$