

MATEMATICKÝ MODEL VÝPOČTU TECHNICKY ZDÔVODNITEĽNEJ NORMY SPOTREBY TEPLA NA SUŠENIA REZIVA V KOMOROVEJ SUŠIARNI

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE TECHNICAL QUALIFICATION NORM OF THE HEAT ENERGY CONSUMPTION FOR DRYING OF SAWN WOOD IN A DRYING CHAMBER

Ladislav Dzurenda – Nencho Deliiski

ABSTRACT

The paper presents a mathematical model for the calculation of the technical qualification norm of the heat energy consumption, needed for drying of sawn wood materials from arbitrary species with initial temperature $t_D > 0^\circ\text{C}$ in convective drying chamber when the temperature of the surrounding atmospheric air is in the range $-20^\circ\text{C} \leq t_0 \leq 35^\circ\text{C}$.

The technical qualification norm is expressed as a specific heat energy consumption, i.e. for drying of one cubic meter of subjected to drying sawn wood materials.

To verify the model a value of the technical qualification norm of the heat energy consumption $Q_{\text{TZN}} = 189,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, which is equivalent to $Q_{\text{TZN}} = 0,682 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$ is determined for the case of drying of spruce lumber with 32 mm thickness, initial moisture content 50 % to the final moisture content 10 %, by ON 49 0651 regime in a medium capacity drying chamber KWC 121.

The analysis of the heat energy consumption during the process of drying of the lumber has shown that increasing of heat efficiency depends mainly on the level of innovation of the drying chamber construction by using innovative heat-insulation materials, by recuperation of the heat of the wet air flowing from the drying chamber to the atmosphere, and by the level of utilization of the volume of the drying chamber.

Key words: drying of sawn wood, mathematical model, technical qualification norm, specific heat consumption

ÚVOD

Sušenie reziva sa radí k základným technologickým operáciám spracovania dreva. Proces sušenia dreva patrí medzi energeticky náročné technologické operácie pri spracovaní drevnej hmoty do finálneho výrobku o čom svedčia údaje o špecifickej spotrebe tepla a elektrickej energie. V práci „Merná spotreba energie pri sušení reziva a možnosti jej úspor“ autori KOBERLE – TREBULA (1981) uvádzajú, že špecifická spotreba tepla a elektrickej energie na 1 kg odparenej vody v moderných malokapacitných teplovzdušných komorových sušiarňach reziva je: $q = 5\,690 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{o.v.}$ a elektrickej energie $e = 0,25 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{o.v.}$ Hodnoty špecifických spotrieb tepla a energie stredno-kapacitných sušiarň reziva, podľa prác (TREBULA 1989, TREBULA – KLEMENT 2002) sú o niečo nižšie: $q = 4490 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{o.v.}$ a $e = 0,175 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{o.v.}$

Pri analýze vplyvu dreviny na sušenie reziva hrúbky $h = 40$ mm, v malokapacitných panelových sušiarňach reziva z počiatočnej vlhkosti $W_p = 60$ % na konečnú vlhkosť $W_k = 10$ %, tvrdými režimami sušenia ON 49 0651, boli v práci (DZURENDA 1993) stanovené objektívne nutné spotreby tepla na sušenie 1 m^3 reziva, pre smrek obyčajný $q = 0,767$ GJ·m⁻³, $e = 17,5$ kWh·m⁻³, borovicu lesnú $q = 0,866$ GJ·m⁻³, $e = 19,9$ kWh·m⁻³, dub zimný $q = 1,083$ GJ·m⁻³, $e = 37,3$ kWh·m⁻³ a pre buk lesný $q = 1,122$ GJ·m⁻³, $e = 34,0$ kWh·m⁻³.

Jednou z možností ako racionalizovať spotrebu tepla a elektrickej energie v procese sušenia a tým zvyšovať celkovú efektívnosť tejto technologickej operácie je analyzovanie spotrieb tepla v procese sušenia prostredníctvom technicky zdôvodniteľných noriem (TZN).

Cieľom tohto príspevku je vypracovanie matematického modelu pre stanovenie technicky zdôvodniteľnej normy spotreby tepla na sušenie reziva v komorových sušiarňach, formou technického výpočtu a prostredníctvom jednotlivých spotrieb tepla komorovej sušiarne reziva analyzovať efektívnosť vynaloženého tepla v technologickom procese.

MATEMATICKÝ MODEL PRE VÝPOČET TZN SPOTREBY TEPLA NA SUŠENIE REZIVA V KOMOROVEJ SUŠIARNI

Technicky zdôvodniteľná norma (TZN) je špecifická spotreba tepla vyjadrujúca objektívne nutné množstvo tepla spotrebované na jednotku výrobu t.j. vysušenie 1 m^3 reziva v komorovej sušiarni. Matematický model (TZN) spotreby tepla pre technologický proces teplovzdušného sušenia nezmrznutého reziva ($t_w > 0^\circ\text{C}$) v komorovej sušiarni pri atmosférickom tlaku a teplote atmosférického vzduchu v priestore okolo sušiarne od -20°C až do $+35^\circ\text{C}$ popisujú rovnice:

$$Q_{\text{TZN}} = \frac{Q_w + Q_v + Q_A + Q_L + Q_{\text{HG}} + Q_S}{V_D}, \quad (1)$$

kde:

Q_w – teplo potrebné na ohrev reziva v sušiarni, kWh;

Q_v – teplo potrebné na ohrev vlhkého vzduchu v komorovej sušiarni a jeho zvlhčovanie vo fáze ohrevu a fáze konečného ošetrenia, kWh;

Q_A – teplo potrebné na ohrev konštrukcie komorovej sušiarne, sušiarenských vozíkov a prekladových latiek, kWh;

Q_L – teplo potrebné na ohrev vzduchu v sušiarni za účelom odparenia vody z dreva, kWh;

Q_{HG} – teplo na uvoľnenie hygroscopicky viazanej vody z dreva, kWh;

Q_S – teplo na krytie tepelných strát sušiarne, kWh;

V_D – objem sušeného dreva, m³.

Teplo potrebné na ohrev reziva v sušiarni popisujú matematicky rovnice:

$$Q_w = \frac{V_D \left\{ \rho_{w_p} c_{w_p} (t_{\text{OH}} - t_w) + \left[\sum_{i=1}^n \rho_{w_i} c_{w_i} (t_i - t_{i-1}) \right] \right\}}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

kde:

V_D – objem sušeného reziva, m³;

ρ_{w_p} – hustota vlhkého reziva na začiatku sušenia s absolútnou vlhkosťou W_p , kg·m⁻³;

c_{w_p} – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity vlhkého reziva vo fáze ohrevu, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,
v intervale teplôt $t_D > 0^\circ C$ až $t_n < 100^\circ C$;

ρ_{w_i} – hustota dreva v i -tom vlhkosťnom stupni sušenia, $kg \cdot m^{-3}$;

c_{w_i} – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity sušeného reziva v i -tom vlhkosťnom stupni sušenia, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

V súlade s prácami (Deliiski 1990, 2003, 2005) hustotu vysúšaného reziva ρ_{w_p} a ρ_{w_i} a strednú hodnotu špecifickej tepelnej kapacity vysúšaného reziva c_{w_p} a c_{w_i} v intervale teplôt dreva $T \geq 273,15 K$ až $T \leq 373,15 K$ popisujú rovnice:

- pre vlhkosť reziva nad medzou hygroskopickosti $w_p > w_{MH}$:

$$\rho_{w_p} = \rho_R (1 + w_p)$$

$$\rho_{w_i} = \rho_R (1 + w_i)$$
(3)

$$c_{w_p} = \frac{2862w_p + 555}{1 + w_p} + \frac{5,49w_p + 2,95}{1 + w_p} \cdot \frac{T_W + T_{OH}}{2} + \frac{0,0036}{1 + w_{p_i}} \left(\frac{T_W + T_{OH}}{2} \right)^2$$

$$c_{w_i} = \frac{2862w_i + 555}{1 + w_i} + \frac{5,49w_i + 2,95}{1 + w_i} \cdot \frac{T_i + T_{i-1}}{2} + \frac{0,0036}{1 + w_{p_i}} \left(\frac{T_i + T_{i-1}}{2} \right)^2$$
(4)

- pre vlhkosť reziva pod medzou hygroskopickosti $w_{p_i} \leq w_{MH}$:

$$\rho_{w_p} = \rho_R \frac{1 + w_p}{1 - 9,3 \cdot 10^{-4} \rho_R (w_{MH} - w_p)}$$

$$\rho_{w_i} = \rho_R \frac{1 + w_i}{1 - 9,3 \cdot 10^{-4} \rho_R (w_{MH} - w_i)}$$
(5)

$$c_{w_p} = \frac{2097w_p + 826}{1 + w_p} + \frac{9,92w_p + 2,55}{1 + w_p} \cdot \frac{T_W + T_{OH}}{2} + \frac{0,002}{1 + w_p} \left(\frac{T_W + T_{OH}}{2} \right)^2$$

$$c_{w_i} = \frac{2097w_i + 826}{1 + w_i} + \frac{9,92w_i + 2,55}{1 + w_i} \cdot \frac{T_i + T_{i-1}}{2} + \frac{0,002}{1 + w_i} \left(\frac{T_i + T_{i-1}}{2} \right)^2$$
(6)

ρ_R – redukovaná hustota dreva, $kg \cdot m^{-3}$;

w_p – absolútna vlhkosť reziva na začiatku sušenia, $kg \cdot kg^{-1}$;

w_i – absolútna vlhkosť reziva na začiatku jednotlivých vlhkosťných stupňoch režimu sušenia reziva, $kg \cdot kg^{-1}$;

w_{MH} – absolútna vlhkosť dreva danej dreviny na medzi hygroskopickosti, $kg \cdot kg^{-1}$;

t_W – teplota reziva na začiatku fázy ohrevu, $^\circ C$;

$T_W = 273,15 + t_W$ – termodynamická teplota reziva na začiatku fázy ohrevu, K ;

t_{OH} – teplota reziva na konci fázy ohrevu, °C;

$T_{OH} = 273,15 + t_{OH}$ – termodynamická teplota reziva na konci fázy ohrevu, K;

t_i – teplota reziva v i -tom vlhkostnom stupni sušenia, °C;

$T_i = 273,15 + t_i$ – termodynamická teplota reziva v i -tom vlhkostnom stupni sušenia, K;

t_{i-1} – teplota reziva v predchádzajúcom vlhkostnom stupni sušenia, °C;

$T_{i-1} = 273,15 + t_{i-1}$ – termodynamická teplota reziva v predchádzajúcom vlhkostnom stupni sušenia, K.

Teplota potrebné na ohrev vlhkého vzduchu v komorovej sušiarne a jeho zvlhčovanie vo fáze ohrevu a fáze konečného ošetrenia:

$$Q_V = \frac{m_{SV-OH}(h_{OH} - h_0) + m_{SV-KO}(h_{KO} - h_{i=n})}{3,6 \cdot 10^3}, \quad (7)$$

kde: m_{SV-OH} – hmotnosť suchého vzduchu nachádzajúceho sa v komorovej sušiarne po zavezení sušeného dreva, kg;

$$m_{SV-OH} = \frac{(p_{at} - \varphi_0 p_{P0}) (V_S - V_D)}{r_{SV} (273,15 + t_0)}, \quad (8)$$

$p_{at} = 10^5$ – atmosférický tlak vzduchu, Pa;

φ_0 – relatívna vlhkosť atmosférického vzduchu, – ;

$p_{P0}'' = 10^{\left(\frac{760+12,558 \cdot t_0}{273,15+t_0}\right)}$ parciálny tlak vodných pár vo vlhkom atmosférickom vzduchu, pre rozpätie teplôt $t_0 = -20$ až 0 °C, (HORÁK 1988), Pa;

$p_{P0}'' = 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_0}{236+t_0}\right)}$ parciálny tlak vodných pár vo vlhkom atmosférickom vzduchu pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až 35 °C, (HORÁK 1988), Pa;

t_0 – teplota atmosférického vzduchu, °C;

$V_S = 3/4 \cdot (s \cdot d \cdot v)$ – vnútorný priestor komorovej sušiarne reziva vyplnený vlhkým vzduchom, m³;

s – šírka komorovej sušiarne, m;

d – dĺžka komorovej sušiarne, m;

v – výška komorovej sušiarne, m;

V_D – objem sušeného reziva v komorovej sušiarne, m³;

$r_{SV} = 287$ – špecifická plynová konštanta suchého vzduchu, J·kg⁻¹·K⁻¹;

h_{OH} – entalpia vlhkého vzduchu ohrievajúceho rezivo v komorovej sušiarne, J·kg⁻¹;

$$h_{OH} = [1,005 t_{OH} + x_{OH} (1,86 t_{OH} + 2500)] \cdot 10^3, \quad (9)$$

t_{OH} – teplota vlhkého vzduchu ohrievajúceho rezivo v komorovej sušiarne, °C;

x_{OH} – špecifická vlhkosť vlhkého vzduchu ohrievajúceho rezivo v komorovej sušiarne, pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až $+100$ °C, (HORÁK 1988), kg·kg⁻¹,

$$x_{OH} = 0,622 \frac{\varphi_{OH} p_{P0}''}{10^5 - \varphi_{OH} p_{P0}''} = 0,622 \frac{\varphi_{OH} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{OH}}{236+t_{OH}}\right)}}{10^5 - \varphi_{OH} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{OH}}{236+t_{OH}}\right)}}, \quad (10)$$

φ_0 – relatívna vlhkosť vzduchu ohrievajúceho rezivo v komorovej sušiarňi, –;
 h_0 – entalpia atmosférického vlhkého vzduchu, J·kg⁻¹;

$$h_0 = [1,005t_0 + x_0(1,86t_0 + 2500)].10^3, \quad (11)$$

t_0 – teplota atmosférického vzduchu, °C;
 x_0 – špecifická vlhkosť atmosférického vzduchu, kg·kg⁻¹;

- pre rozpätie teplôt $t_0 = -20$ až 0°C , (Horák 1988):

$$x_0 = 0,622 \frac{\varphi_0 P_p''}{10^5 - \varphi_0 P_p''} = 0,622 \frac{\varphi_0 \cdot 10^{\left(\frac{760+12,558 \cdot t_0}{273,15+t_0}\right)}}{10^5 - \varphi_0 \cdot 10^{\left(\frac{760+12,558 \cdot t_0}{273,15+t_0}\right)}} \quad (12)$$

- pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až $+100^\circ\text{C}$, (Horák 1988):

$$x_0 = 0,622 \frac{\varphi_0 P_p''}{10^5 - \varphi_0 P_p''} = 0,622 \frac{\varphi_0 \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_0}{236+t_0}\right)}}{10^5 - \varphi_0 \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_0}{236+t_0}\right)}} \quad (13)$$

φ_0 – relatívna vlhkosť atmosférického vzduchu, –;
 $m_{\text{SV-KO}}$ – hmotnosť suchého vzduchu nachádzajúceho sa v komorovej sušiarňi na začiatku fázy konečného ošetrenia sušeného reziva, kg;

$$m_{\text{SV-KO}} = \frac{\left(p_{\text{at}} - \varphi_{\text{KO}} \cdot 10^{\left(\frac{658-10,24 \cdot t_{\text{KO}}}{236+t_{\text{KO}}}\right)} \right) (V_{\text{S}} - V_{\text{D}})}{r_{\text{SV}} (273,15 + t_{\text{KO}})}, \quad (14)$$

$p_{\text{at}} = 10^5$ – atmosférický tlak vzduchu, Pa;

φ_{KO} – relatívna vlhkosť vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušeného reziva, –;

t_{KO} – teplota vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušeného reziva, °C;

$V_{\text{S}} = 3/4 \cdot (s \cdot d \cdot v)$ – vnútorný priestor komorovej sušiarne reziva vyplnený vlhkým vzduchom, m³;

s – šírka komorovej sušiarne, m;

d – dĺžka komorovej sušiarne, m;

v – výška komorovej sušiarne, m;

V_{D} – objem sušeného reziva v komorovej sušiarňi, m³;

$r_{\text{SV}} = 287$ – špecifická plynová konštanta suchého vzduchu, J·kg⁻¹·K⁻¹;

h_{KO} – entalpia vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušeného reziva, J·kg⁻¹;

$$h_{\text{KO}} = [1,005t_{\text{KO}} + x_{\text{KO}}(1,86t_{\text{KO}} + 2500)].10^3, \quad (15)$$

t_{KO} – teplota vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušeného reziva, °C;

x_{KO} – špecifická vlhkosť vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušenia reziva, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až $+100^\circ\text{C}$, (HORÁK 1988),

$$x_{\text{KO}} = 0,622 \frac{\varphi_{\text{KO}} P_{\text{P}}''}{10^5 - \varphi_{\text{KO}} P_{\text{P}}''} = 0,622 \frac{\varphi_{\text{KO}} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{\text{KO}}}{236+t_{\text{KO}}}\right)}}{10^5 - \varphi_{\text{KO}} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{\text{KO}}}{236+t_{\text{KO}}}\right)}}, \quad (16)$$

φ_{KO} – relatívna vlhkosť vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia sušenia reziva, –;

$h_{i=n}$ – entalpia vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi reziva v poslednom vlhkosťnom stupni sušenia reziva, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

$$h_{i=n} = [1,005t_{i=n} + x_{i=n}(1,86t_{i=n} + 2500)] \cdot 10^3, \quad (17)$$

$t_{i=n}$ – teplota vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi reziva v poslednom vlhkosťnom stupni sušenia reziva, $^\circ\text{C}$;

$x_{i=n}$ – špecifická vlhkosť vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi reziva v poslednom vlhkosťnom stupni sušenia reziva $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až $+100^\circ\text{C}$, (HORÁK 1988),

$$x_{i=n} = 0,622 \frac{\varphi_{i=n} P_{\text{P}}''}{10^5 - \varphi_{i=n} P_{\text{P}}''} = 0,622 \frac{\varphi_{i=n} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{i=n}}{236+t_{i=n}}\right)}}{10^5 - \varphi_{i=n} \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{i=n}}{236+t_{i=n}}\right)}}, \quad (18)$$

$\varphi_{i=n}$ – relatívna vlhkosť vlhkého vzduchu v poslednom vlhkosťnom stupni sušenia reziva, –;

Tepló potrebné na ohrev konštrukcie komorovej sušiarne, sušiarenských vozíkov a prekladových latiek popisuje matematická rovnica :

$$Q_A = \frac{m_A c_A \left[\left(\frac{t_A + t_{\text{max}}}{2} \right) - t_A \right] + d \cdot s \cdot h_Z \rho_{\text{bet}} c_{\text{bet}} \left[\left(\frac{t_A + t_{\text{max}}}{2} \right) - t_A \right]}{3,6 \cdot 10^6} + \frac{n [m_{\text{Fe}} c_{\text{Fe}} (t_{\text{max}} - t_A)] + V_D V_{\text{PR}} \rho_{\text{SM}} c_{\text{SM}} (t_{\text{max}} - t_A)}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (19)$$

kde: m_A – hmotnosť konštrukcie sušiarne, kg ;

c_A – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity sušiarne, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

t_A – teplota konštrukčného materiálu sušiarne na začiatku fázy ohrevu reziva $^\circ\text{C}$;

t_{max} – najvyššia teplota v režime sušenia reziva, $^\circ\text{C}$;

d – dĺžka komorovej sušiarne, m ;

s – šírka komorovej sušiarne, m ;

h_Z – hrúbka betónového základu komorovej sušiarne, m ;

$\rho_{\text{bet}} = 2\,300$ – hustota betónu, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

$c_{\text{bet}} = 1\,134$ – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity betónu, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

n – počet vozíkov v sušiarňi, –;

$m_{Fe} = 400$ – hmotnosť sušiarenského vozíka, kg;
 $c_{Fe} = 477$ – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity konštrukčného materiálu sušiarenského vozíka, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
 V_D – objem sušeného reziva v komorovej sušiarni, m^3 ;
 $V_{PR} = 0,04 \cdot [1 - h/(h + 0,024)]$ – objem prekladových latiek hrúbky 24 mm, šírky 40 mm, ktoré sa nachádza v $1 m^3$ objemu kletky reziva, m^3 ;
 h – hrúbka sušeného reziva, m;
 $\rho_{SM} = 453$ – hustota prekladových latiek zo smrekového dreva o vlhkosti $W = 10\%$ v súlade s rovnicou (5), $kg \cdot m^{-3}$;
 $c_{SM} = 1700$ – stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity smrekového dreva prekladových latiek, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Teplo potrebné na ohrev vzduchu v sušiarni za účelom odparenie vody z reziva bilancuje rovnica:

$$Q_L = \frac{V_D \rho_R \sum_{i=1}^n q_{wi} \cdot (w_i - w_{i+1})}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (20)$$

kde: V_D – objem sušeného reziva v sušiarni na začiatku sušenia, m^3 ;
 ρ_R – redukovaná hustota dreva, $kg \cdot m^{-3}$;
 w_i – absolútna vlhkosť reziva vo vlhkosťnom stupni režimu sušenia reziva, $kg \cdot kg^{-1}$;
 w_{i+1} – absolútna vlhkosť reziva v následnom vlhkosťnom stupni režimu sušenia reziva, $kg \cdot kg^{-1}$;
 q_{wi} – špecifická spotreba tepla na 1 kg odparenej vody v procese sušenia reziva v i -tom stupni režimu sušenia reziva, $J \cdot kg^{-1} \cdot o \cdot v$; (SERGOVSKIJ 1968, DRAHOŠ – VIKTORIN 1977, STRUMILLO 1983, VIDELOV 2003),

$$q_{wi} = \frac{h_i - h_0}{x_i - x_0}, \quad (21)$$

h_0 – entalpia vlhkého vzduchu atmosférického vzduchu, $J \cdot kg^{-1}$;
 x_0 – špecifická vlhkosť atmosférického vzduchu, $kg \cdot kg^{-1}$;
 h_i – entalpia vlhkého vzduchu v sušiarni v i -tom stupni režimu sušenia reziva, $J \cdot kg^{-1}$;

$$h_i = [1,005t_i + x_i(1,86t_i + 2500)] \cdot 10^3, \quad (22)$$

t_i – teplota vlhkého vzduchu v i -tom vlhkosťnom stupni režimu sušenia reziva, $^{\circ}C$;
 x_i – špecifická vlhkosť vlhkého vzduchu v i -tom stupni režimu sušenia, pre rozpätie teplôt $t_0 = 0$ až $+100^{\circ}C$, (HORÁK 1988), $kg \cdot kg^{-1}$,

$$x_i = 0,622 \frac{\varphi_i p_p''}{10^5 - \varphi_i p_p''} = 0,622 \frac{\varphi_i \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_i}{236+t_i}\right)}}{10^5 - \varphi_i \cdot 10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_i}{236+t_i}\right)}}, \quad (23)$$

φ_i – relatívnu vlhkosť vlhkého vzduchu v i -tom stupni režimu sušenia na základe rozpisu teploty suchého teplomera t_S ($^{\circ}C$) a teploty mokrého teplomera t_M ($^{\circ}C$) v režime sušenia je možné ju vyjadriť prostredníctvom Sprungovho vzťahu rovnicou, (ENENKL – HLOUŠEK – JANOTKOVÁ 1981), v tvare:

$$\varphi_i = \frac{p_{P_i}}{P_{P_i}} = \frac{p_{P-M_i}'' - 66,2 \cdot (t_{S_i} - t_{M_i})}{p_{P-S_i}''}, \quad (24)$$

Po vyjadrení hodnôt parciálnych tlakov vodnej pary pre teploty suchého a mokrého teplomera rovnica relatívnej vlhkosti nadobúda tvar:

$$\varphi_i = \frac{p_{P_i}}{P_{P_i}} = \frac{10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{M_i}}{236+t_{M_i}}\right)} - 66,2 \cdot (t_{S_i} - t_{M_i})}{10^{\left(\frac{658+10,24 \cdot t_{S_i}}{236+t_{S_i}}\right)}}, \quad (25)$$

kde: p_{P_i} – parciálny tlak vodnej pary vo vlhkom vzduchu v sušiarňi v i -tom vlhkosťnom stupni sušenia reziva, Pa;

p_{P_i}'' – parciálny tlak vodnej pary vo vlhkom vzduchu v sušiarňi v i -tom vlhkosťnom stupni sušenia reziva, Pa;

p_{P-M_i}'' – parciálny tlak vodnej pary pre teplotu mokrého teplomera, Pa;

p_{P-S_i}'' – parciálny tlak vodnej pary pre teplotu suchého teplomera, Pa;

t_{S_i} – teplota suchého teplomera, °C;

t_{M_i} – teplota mokrého teplomera, °C.

Teploto potrebné na uvoľnenie hygroscopickej viazanej vody z dreva v procese sušenia pod medzou hygroscopickej uvoľnenia uvádza rovnica, (SETNICKÁ 1981):

$$Q_{HG} = \frac{V_D \rho_R \left[74,68 - \frac{92,11 w_K}{0,07 + w_K} \right]}{3,6 \cdot 10^3}, \quad (26)$$

kde: V_D – objem sušeného dreva, m³;

ρ_R – redukovaná hustota dreva, kg·m⁻³;

w_K – konečná absolútna vlhkosť reziva, kg·kg⁻¹.

Teploto potrebné na krytie tepelných strát sušiarne v procese sušenia v komorovej sušiarňi:

$$Q_S = k_A [2(s+d) \cdot v + 1,3d \cdot s] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \tau_i (t_i - t_0) + \tau_{KO} (t_{KO} - t_0) \right] + k_P d \cdot s \cdot \left[\sum_{i=1}^n \tau_i (t_i - 10) + \tau_{KO} (t_{KO} - 10) \right], \quad (27)$$

kde: k_A – koeficient prestupu tepla stenami sušiarne do atmosférického vzduchu, W·m⁻²·K⁻¹;

s – šírka komorovej sušiarne, m;

d – dĺžka komorovej sušiarne, m;

v – výška komorovej sušiarne, m;

t_i – teplota vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi v i -tom vlhkosťnom stupni sušenia, °C;

t_0 – teplota atmosférického vzduchu v okolí sušiarne, °C;

t_{KO} – teplota vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi vo fáze konečného ošetrenia, °C;
 τ_i – čas sušenia reziva v i -tom vlhkosťnom stupni režimu sušenia, h;
 τ_{KO} – čas konečného ošetrenia reziva v režimu sušenia, h;
 k_p – koeficient prestupu tepla zo sušiarne do pôdy, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, (CIHELKA 1969):

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{h_z}{\lambda_z} + \frac{1}{\lambda_p}} = \frac{\lambda_p}{1 + 0,32\lambda_p}, \quad (28)$$

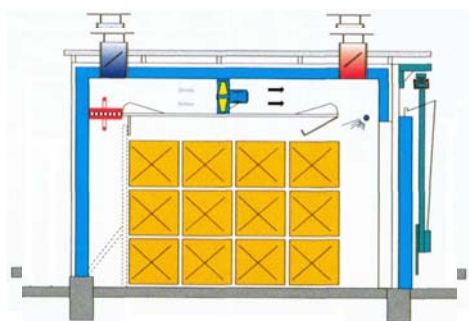
$\alpha = 8,0 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, koeficient prestupu tepla zo vzduchu do základu sušiarne;
 $h_z = 0,25$ m, t.j. hrúbka betónového základu sušiarne;
 $\lambda_z = 1,28 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, t.j. koeficient tepelnej vodivosti betónového základu sušiarne;
 λ_p – koeficient tepelnej vodivosti pôdy pod základom sušiarne, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
 $\lambda_p = 2,30 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre ílovito-kamenistú pôdu, (CIHELKA 1969);
 $\lambda_p = 1,40 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre hlinito piesčitú pôdu, (HALAHYJA – CHMÚRNY – STERNOVÁ 1998);
 $\lambda_p = 0,90 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre hlinito pieskovec, (HALAHYJA – CHMÚRNY – STERNOVÁ 1998).

VERIFIKÁCIA MODELU VÝPOČTU TZN SPOTREBY TEPLA NA SUŠENIE REZIVA A DISKUSIA

Model výpočtu stanovenia TZN spotreby tepla pre sušenie reziva v komorovej sušiarňi reziva možno aplikovať pre sušenie nezmrznutého reziva, ľubovoľnej dreviny v konkrétnej komorovej sušiarňi reziva, pri teplote atmosférického vzduchu $t_0 = -20$ až $+35$ °C. Verifikácia modelu je vykonaná pre sušenie referenčného materiálu t.j. smrekového reziva $h = 32$ mm, v trojsmennej prevádzke, z vlhkosti $W_p = 50$ % na konečnú vlhkosť $W_k = 10$ %, mäkkým režimom ON 49 0651, v stredno-kapacitnej komorovej sušiarňi reziva KWC 121 vyrábanej firmou Vzduchotechnika a.s. Nové Mesto nad Váhom:

Tab. 1 Technické údaje komorovej sušiarne reziva
Tab. 1 Technical information of chamber drying kilns

Technické parametre		Jednotka	Hodnota
Rozmery sušiarne	Šírka s	[m]	5,5
	Dĺžka d	[m]	6,6
	Výška v	[m]	4,1
Hmotnosť sušiarne	m_A	[kg]	7 030
Počet sušiar. vozíkov	n	[-]	4
Špecifická tepel. kapacita materiálu sušiarne	c_A	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	880
Koeficient prestupu tepla stenami sušiarne	k_A	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	0,46
Teplota konšt. sušiarne	t_A	[°C]	10
Typ pôdy pod sušiar.	λ_p	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	2,3



Tab. 2 Parametre atmosférického vzduchu v okolí komorovej sušiarne reziva
Tab. 2 Parameters of atmospheric air in the vicinity of chamber drying kilns

Parametre vlhkého atmosférického vzduchu	t_0 [°C]	ϕ_0 [-]
		10

Tab. 3 Technologické parametre procesu sušenia reziva**Tab. 3 Technological parameters of the drying process of timber**

Technologické parametre procesu sušenia	Symbol	Jednotka	Hodnota
Drevina – redukovaná hustota dreva	ρ_R	[kg·m ⁻³]	380
Hrúbka sušeného reziva	h	[mm]	32
Počiatočná vlhkosť reziva	w_p	[kg·kg ⁻¹]	0,5
Konečná vlhkosť reziva	w_K	[kg·kg ⁻¹]	0,1
Teplota reziva zavezeného do komorovej sušiarne	t_W	[°C]	10
Objem sušeného reziva v komorovej sušiarne	V_D	[m ³]	22

Tab. 4 Technologické parametre procesu sušenia reziva a režim sušenia**Tab. 4 Technological parameters of drying process of timber and drying regime**

Fáza sušenia	Režim sušenia							τ [hod]
	t_S [°C]	t_M [°C]	Δt [°C]	φ [-]	x [kg·kg ⁻¹]	h [kJ·kg ⁻¹]	q_W [kJ·kg ⁻¹ ·o.v.]	
Ohrev	70	66	4					3,2
$W_p > 60\%$	0	0	0	0	0	0	0	0
60–40 %	70	66	4	0,83	0,21671	640	2918	6
40–30 %	70	65	5	0,79	0,20331	605	2938	7
30–25 %	80	71	9	0,67	0,29107	851	2897	4,5
25–20 %	80	68	12	0,59	0,23849	712	2954	4,5
20–15 %	90	73	17	0,49	0,32390	954	2922	5
15–10 %	90	67	23	0,37	0,21584	666	3053	9
10–8 %	0	0	0	0	0	0	0	0
Konečné ošetrenie	90	84	6					12
Ochladzovanie	40	30	10					3,2

Jednotlivé položky spotreby tepla Q_{TZN} na sušenie smrekového reziva $h = 32$ mm podľa režimu ON 49 0651 v komorovej sušiarne reziva KWC 121 uvádza tabuľka 5.

Tab. 5 Jednotlivé položky spotreby tepla TZN**Tab. 5 Individual items of heat consumption TQN**

Názov položky spotreby tepla komorovej sušiarne reziva	Spotreba tepla		% zastúpenia položiek spotreby tepla
	kWh	kJ	
teplo potrebné na ohrev sušeného reziva v komorovej sušiarne	733,7	2 641 442	17,60
teplo potrebné na ohrev vlhkého vzduchu v sušiarne a jeho zvlhčovanie vo fáze ohrevu a konečného ošetrenia	34,4	123 795	0,82
teplo potrebné na ohrev konštrukčného materiálu sušiarne, sušiarenských vozíkov a prekladových latiek v kliečkach	337,6	1 215 480	8,10
teplo na ohrev vzduchu v sušiarne za účelom odparenia vody z reziva	2 733,2	9 839 607	65,57
teplo na uvoľnenie hygroskopicky viazanej vody z dreva	47,6	171 360	1,14
teplo na krytie tepelných strát sušiarne počas sušenia	281,6	1 013 944	6,76
Spolu:	4 168,2	15 005 628	100,0

Technicky zdôvodniteľná norma pre sušenie smrekového reziva $h = 32$ mm, z vlhkosti $W_p = 50\%$ na vlhkosť $W_K = 10\%$, režimom ON 49 0651 v stredno-kapacitnej komorovej sušiarne reziva KWC 121 je:

$$Q_{TZN} = \frac{\sum_{i=1}^6 Q_{kWh-i}}{V_D} = \frac{4168,2}{22} = 189,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$Q_{TZN} = \frac{\sum_{i=1}^6 Q_{kJ-i}}{V_D} = \frac{15005628}{22 \cdot 10^6} = 0,682 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$$

V procese sušenia sa z vysušaného reziva v sušiarňi odparí $m_{H_2O} = V_D \cdot \rho_R \cdot (w_P - w_K) = 3344 \text{ kg}$ vody. Prostredníctvom spotreby tepla komorovej sušiarne reziva a množstva odparenej vody v procese sušenia je možné stanoviť špecifickú spotrebu tepla na 1 kg odparenej vody v procese sušenia, ktorá je jedným z kritérií hodnotenia kvality komorových sušiarňí reziva:

$$q = \frac{\sum_{i=1}^6 Q_{kWh-i}}{m_{H_2O}} = \frac{4162,2}{3344} = 1,245 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ o.v.},$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^6 Q_{kJ-i}}{m_{H_2O}} = \frac{15005628}{3344} = 4487 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ o.v.}$$

Za predpokladu, že tri štvrtiny spotrebovanej elektrickej energie komorovej sušiarne je využité ako zdroj energie pre činnosť ventilátorov zabezpečujúcich cirkuláciu vlhkého vzduchu v komorovej sušiarňi reziva a súčasne teplo privedené do sušiarne polytropickou kompresiou vlhkého vzduchu vo ventilátoroch sa vo fáze ohrevu reziva a fáze vlastného sušenia t.j. dve tretiny sušiacieho cyklu využije ako technologické teplo, výpočtom stanovená špecifická spotreba tepla na 1 kg odparenej vody v stredno-kapacitnej sušiarne reziva KWC 121 je o 6,5 % nižšia než je hodnota špecifickej spotreby tepla pre sušiarne reziva typu KWC uvádzaná v prácach TREBULU (1989), TREBULU a KLEMENTA (2002).

Z vykonanej analýzy jednotlivých spotrieb tepla vyplýva, že najväčšou položkou spotreby tepla na sušenie reziva je spotreba tepla na ohrev vzduchu privádzaného do sušiarne na odparenie vody z reziva, predstavujúca až 65,57 % zo spotrebovaného tepla v procese sušenia reziva. Uvedené konštatovanie je v súlade, tak s analýzami vplyvu režimov sušenia na spotrebu tepla v komorových sušiarňach reziva (DZURENDA – DELIISKI 2004), ako aj s analýzami spotrieb tepla komorových sušiarňí reziva (GLIJER 1990, DZURENDA 1993), v ktorých podiel spotreby tepla na ohrev vzduchu za účelom odparenia vody z dreva tvorí 51,8–69,4 %. Skutočnosť, že dve tretiny privedeného tepla sa priamo využíva na realizáciu technologického procesu t.j. odparovanie vody z reziva svedčí o vysokej účinnosti využitia tepla v termickom procese sušenia reziva.

Jednou z ciest znižovania spotrieb tepla v procese sušenia reziva v komorových sušiarňach reziva je využívanie odpadového tepla vlhkého vzduchu prúdiaceho zo sušiarne do atmosféry na predohrev vzduchu privádzaného do sušiarne v rekuperátoroch tepla. Realizáciou tohto technického riešenia v stredno-kapacitných komorových sušiarňach reziva KWC je možné, podľa prác: KOBERLE (1980), DIVINEC (1983), TREBULA (1989), znížiť spotrebu tepla komorových sušiarňí o 4–8 %.

Druhou najväčšou položkou spotreby tepla na sušenie reziva v komorovej sušiarňi je spotreba tepla na ohrev vlhkého reziva pre realizáciu samotného technologického procesu. V komorovej sušiarňi KWC 121 uvedené teplo predstavuje hodnotu 17,6 %.

Treťou najväčšou položkou spotreby tepla na sušenie reziva v komorových sušiarňach je teplo na ohrev konštrukčného materiálu sušiarne, sušiarenských vozíkov a prekladových latiek v kliečkach reziva, ktorá predstavuje hodnotu 8,1 %. Určitá možnosť pre znižovanie spotreby tepla v danej položke je v stavebno-konštrukčnom riešení betónového základu komorovej sušiarne reziva a znižovaní akumulácie tepla v betónovom základe.

Štvrtou najväčšou položkou spotreby tepla komorovej sušiarne reziva je teplo na krytie tepelných strát sušiarne. V sušiarňi KWC 121 predstavuje hodnotu 6,76 %. Na uvedenú spotrebu tepla značne vplýva koeficient prestupu tepla: $k = 0,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Uvedená hodnota tepelnej straty skeletu komorovej sušiarne reziva KWC 121 je akceptovateľná pre obdobie konca 20-teho storočia. V súčasnosti sú na trhu nové konštrukčné tepelno-izolačné materiály s nízkou hustotou a menšou tepelnou vodivosťou znižujúcou hodnotu koeficienta prestupu tepla panela skeletu sušiarne pod hodnotu $k \leq 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (HALAHYJA – CHMÚRNY – STERNOVÁ 1998).

Z metodiky stanovenia TZN spotreby tepla sušiarne vyplýva aj dôležitý poznatok, že efektívnosť využitia tepla v procese sušenia reziva v komorových sušiarňach reziva je bezprostredne závislá na využití vnútorného objemu sušiarne reziva. Zaplnenie sušiaceho priestoru komorovej sušiarne je závislé, tak na technologickom parametri procesu sušenia reziva – hrúbke reziva, ako i organizácii práce a maximálnej využiteľnosti kapacity sušiarne. Keďže, hodnota technicko-zdôvodniteľnej normy spotreby tepla komorovej sušiarne reziva je nepriamo úmerná objemu sušeného reziva, práve druhý argument má značný vplyv na efektívnosť využívania tepla v procese sušenia a hodnotu normatívu Q_{TZN} špecifickej spotreby tepla na proces sušenia reziva z aspektu dlhodobého využívania komorovej sušiarne reziva, obdobne ako je to konštatované pri hodnotení efektívnosti využívania tepla v procese parenia dreva v tlakových avtoklávoch, (SOKOLOVSKI – DELIISKI – DZURENDA 2008).

ZÁVER

V príspevku je uvedený matematický model pre výpočet technicky zdôvodniteľnej normy spotreby tepla na sušenie reziva v komorových sušiarňach umožňujúci pre sušenie nezmrznutého reziva ($t_w > 0^\circ\text{C}$) ľubovoľnej dreviny v konkrétnej komorovej sušiarňi reziva, pri teplote atmosférického vzduchu $t_0 = -20$ až $+35^\circ\text{C}$. Hodnoty jednotlivých objektívne nutných spotrieb tepla komorovej sušiarne reziva vynaložených na realizáciu technologického procesu umožňujú analyzovať efektívnosť procesu sušenia reziva.

Aplikáciou uvedeného modelu pre sušenie referenčného materiálu t.j. smrekového reziva $h = 32 \text{ mm}$, mäkkým režimom sušenia ON 49 0651, v stredno-kapacitnej komorovej sušiarňi reziva KWC 121 bola stanovená hodnota technicky zdôvodniteľného normatívu spotreby tepla $Q_{TZN} = 189,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, resp. $Q_{TZN} = 0,682 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

Z analýzy podielu jednotlivých položiek spotreby tepla komorovej sušiarne reziva KWC 121 plynie, že najväčšie spotreby tepla na sušenie sú: spotreba tepla na ohrev vzduchu v sušiarňi reziva za účelom odparenia vody z dreva 65,57 %, spotreba tepla na ohrev reziva v technologickom procese je 17,6 %, spotreba tepla na ohrev konštrukčného materiálu sušiarne, sušiarenských vozíkov a prekladových latiek v kliečkach 8,1 % a spotreba tepla na krytie tepelných strát sušiarne 6,76 %. Skutočnosť, že cca dve tretiny privedeného tepla sa priamo využíva na realizáciu technologického procesu t.j. ohrev vzduchu prívádzaného do

sušiarne za účelom odparovania vody z reziva svedčí o vysokej účinnosti využitia tepla v termickom procese sušenia reziva.

Z vykonaných analýz spotrieb tepla v procese sušenia reziva v stredno-kapacitných komorových sušiarňach reziva vyplýva, že zvyšovanie efektívnosti využitia tepla v procese sušenia je možné, tak inováciou konštrukcie sušiarne používaním nových tepelnoizolačných materiálov a rekuperácie tepla z vlhkého vzduchu prúdiaceho z komorovej sušiarne do atmosféry, ako i maximálne využívaním úžitkového objemu komorovej sušiarne.

LITERATÚRA

- CIHELKA, J. 1969. *Vytápění a větrání*. Praha: SNTL, 610 s.
- DELIISKI, N. 1990. Mathematische Beschreibung der spezifischen Wärmekapazität des aufgetauten und gefrorenen Holzes. In *Fundamental Research of Wood*, Warszawa: SGGW, s. 229–233.
- DELIISKI, N. 2003. *Modelirane i tehnologiji za proparvane na drvesiny material i v avtoklavi*. Sofía: [Dizertačná práca LTU], 358 s.
- DELIISKI, N. 2005. *Automatika i avtomatizacija na drvoobrotvaščata i mebelnata promyšlenost*. Sofía: Izdatelska kšča pri LTU, 267 s. ISBN 954–332–015–2.
- DIVINEC, K. 1983. Sušiarenské zariadenie k.p. Vzduchotechnika na spracovanie dreva a drevnej hmoty. In *Sušenie dreva, vývoj sušiarenských zariadení a nové metódy riadenia procesov sušenia z hľadiska energetickej náročnosti*. Bratislava: DT ČSVTS, s. 237–243.
- DRAHOŠ, V. – VIKTORIN, Z. 1977. *Souhrn poznatků a výpočtových podkladů z výskumu sušení a sušáren řeziva*. Praha: VVÚD, 261 s.
- DZURENDA, L. 1993. Energetická náročnosť sušenia reziva v malokapacitných komorových sušiarňach. In *Sušenie dreva v malovýrobe*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, s. 97–111. ISBN 80–228–0224–7.
- DZURENDA, L. – DELIISKI, N. 2004. Energetic evaluation of the beech timber drying regime without color changes of wood mass. In *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 04*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, s. 331–337. ISBN 80–228–1385–0.
- ENENKL, V. – HOLOUŠEK, J. – JANOTKOVÁ, E. 1981. *Termomechanika*. Praha: SNTL, 290 s.
- GLIJER, L. 1990. Zužycie energii w suszarce cyklicznego dzialania do tarcicy. In *Przemysl drewny*. 41(12): 18–20.
- HALAHYJA, M. – CHMÚRNÝ, I. – STERNOVÁ, Z. 1998. *Stavebná tepelná technika*. Bratislava: Vydavateľstvo JAGA GROUP, 247 s. ISBN 80–88905–04–4.
- HORÁK, M. 1988. Termofyzikálne vlastnosti vlhkého vzduchu. In *VIII. konferencia katedier mechanik tekutín a termomechaniky*. Brno: SjF VUT. s. 28–34.
- KOBERLE, M. 1980. Trend sušenia dreva a vývoj sušiarňí na rezivo. In *Drevo*. 35(5): 107–112.
- KOBERLE, M. – TREBULA, P. 1981. Merná spotreba energie pri sušení reziva a možnosti jej úspor. In *Drevo*. 36(2): 31–33.
- SERGOVSKIJ, P. S. 1968. *Gidrotermičeskaja obrotka i konservirovanie drevesiny*. Moskva: Lesnaja promyšlenost', 405 s.
- SETNIČKA, F. 1981. *Energetika a tepelná technika pre drevárskych inžinierov*. Bratislava: ALFA. 440 s.
- SOKOLOVSKI, S. – DELIISKI, N. – DZURENDA, L. 2008. Teplovoj rasčet avtoklavov dla obrabotki drevesiny. In *Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW, Forest and Wood Technology*. (66): 59–64. ISSN 1898–5912.
- STRUMMILO, C. 1983. *Podstawy teorii i techniki suszenia*. Warszawa: WNT, 473 s.
- TREBULA, P. 1989. *Hydrotermická úprava a ochrana dreva. Časť Hydrotermická úprava dreva*. Zvolen: VŠLD, 301 s. ISBN 80–228–0054–6.
- TREBULA, P. – KLEMENT, I. 2002. *Sušenie a hydrotermická úprava dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 449 s. ISBN 80–228–1182–3.
- VIDELOV, CH. 2003. *Sušene i toplanno obrabotvane na drvesinata*. Sofía: Izdatelska kšča pri LTU, 335 s. ISBN 954–8783–63–0.

Pod'akovanie

Táto práca bola vypracovaná v rámci riešenia projektov KEGA–SR č. 1/6164/08 a NIS–LTU 105/2008, ako výsledok práce autorov a výraznej pomoci grantovej agentúry KEGA–SR a NIS–LTU Sofia.

Adresy autorov:

Prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD.
Katedra obrábania dreva
Drevárska fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovensko
dzurenda@vsld.tuzvo.sk

Prof. Dr. Nencho Deliiski, DSc.
Katedra – Mašinoznanije i avtomatizacija na proizvodstvoto
Fakultet Gorska promišlenost
Lesotečničeski univerzitet Sofia
bul. "Kliment Ochridski" 10
1756 Sofia
Bulgaria
deliiski@netbg.com