

# Изчисляване на средномасовата температура на дървени детайли при едностранното им нагряване

Н. Делийски, Д. Ангелски, Н. Тричков, Ж. Гочев

## Computation of the Average Mass Temperature of Wood Details during their One Sided Heating

N. Deliiski, D. Angelski, N. Trichkov, Z. Gochev

**Key Words:** Average mass temperature; oak details; one sided heating; plasticizing; bending.

**Abstract.** An approach for computing the average mass temperature of the wood and the rate of its change during one sided heating of flat wood details, has been suggested. The approach is based on the use of the solutions of own non-linear model for the calculation of the non-stationary 1D temperature distribution along the thickness of subjected to one sided conductive heating flat wood details aimed at their plasticizing in the production of curved back parts of chairs. A software program has been prepared in the calculation environment of Visual FORTRAN Professional for solving of the model. With the help of the program, the 1D non-stationary temperature field in flat oak details with an initial temperature of 20°C, moisture content of 0.15 kg.kg<sup>-1</sup>, thickness of 12 mm, 16 mm, and 20 mm during their 30 min one sided heating at temperature of 80°C and 120°C of the heating metal body has been calculated. After integration of the temperature field, the average mass wood temperature and the rate of its change of the subjected to one sided heating oak details has been calculated. The obtained results are graphically presented and analyzed.

### 1. Увод

Важна съставна част на технологиите за производство на плоски огънати детайли от масивна дървесина е тяхното едностранно нагряване с цел пластифициране преди огъването им [1].

Огънати след едностранно нагряване детайли се използват при производството на облегални части на столове, на външни корпусни елементи за струнни музикални инструменти и други.

Едностранното нагряване на дървени детайли се осъществява в специализирано оборудване, което съвместява пластифицирането и огъването им. За такова нагряване и огъване на детайли с дебелина от 10 до 25 mm се използват горещи хидравлични преси с подходяща за огъването криволинейна повърхност.

Такава технология на пластифициране и огъване се прилага например при производството на облегални части на столове. Тези части имат сравнително малка дебелина  $h$

в сравнение с широчината и дължината им, а също голям радиус  $R$  на огъване и отношение  $R/h = 20-25$  [1,8].

Информация за средномасовата температура на дървени детайли  $T_{avg}$  по време на едностранното им нагряване се дава в специализираната литература само от авторите [6]. Изчисляването на  $T_{avg}$  в тази публикация е извършено с използване на опростен линеен модел на разпространението на топлината в подложените на едностранно нагряване детайли.

Цел на работата е да се предложи метод за компютърно изчисляване на  $T_{avg}$ , който се основава на численото интегриране на решенията на собствен нелинеен модел, представящи едномерното нестационарно разпределение на температурата по дебелината на плоски дървени детайли по време на едностранното им контактно нагряване.

### 2. Математичен модел на процеса на едностранно контактно нагряване на плоски дървени детайли

В [5] е предложен следният нелинеен математичен модел на процеса на едностранно контактно нагряване на плоски дървени детайли:

$$(1) \quad c_w(T, u) \cdot \rho_w(\rho_b, u, u_{fsp}, S_v) \frac{\partial T_w(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_w(T, u, \rho_b) \frac{\partial^2 T_w(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_w(T, u, \rho_b)}{\partial T} \left( \frac{\partial T_w}{\partial x} \right)^2$$

с начално условие

$$(2) \quad T_w(x, 0) = T_w0$$

и следните гранични условия:

- откъм страната на металното тяло, нагряващо детайлите (виж *фиг. 1*):

$$(3) \quad T_w(0, \tau) = T_m(\tau);$$

- откъм противоположната ненагрявана страна на детайлите, която контактува с въздуха:

$$(4) \quad \frac{\partial T_w(X, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha_w(\tau)}{\lambda_{ws}(\tau)} [T_a(\tau) - T_{ws}(\tau)],$$

където  $c_w$  е специфичният топлинен капацитет на дървесината на детайлите,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $K$ ;  $T_{w0}$  – начална температура на подложените на нагряване детайли,  $K$ ;  $T_m$  – температура на нагряващото детайлите тяло,  $K$ ;  $T_{ws}$  – температура на повърхността на детайлите, контактуваща с въздуха,  $K$ ;  $T_a$  – температура на въздуха в близост до ненагряваната повърхност на детайлите,  $K$ ;  $u$  – съдържание на вода на детайлите,  $kg \cdot kg^{-1}$ ;  $u_{fsp}$  – съдържание на вода на детайлите при границата на насищане на клетъчните стени на дървесината,  $kg \cdot kg^{-1}$ ;  $x$  – координата по оста на нагряването, съпадаща с дебелината на детайлите:  $0 \leq x \leq h$ ,  $m$ ;  $h$  – дебелина на детайлите,  $m$ ;  $\alpha_w$  – коефициент на топлопредаване между детайлите и въздуха,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\lambda_w$  – коефициент на топлопроводност на дървесината на детайлите,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\lambda_{ws}$  – коефициент на топлопроводност на дървесината на повърхността на детайлите, която контактува с въздуха,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\rho_b$  – базисна плътност на дървесината, равна на отношението на масата  $\dot{m}$  в абсолютно сухо състояние към обема  $\dot{V}$  при  $u \geq u_{fsp}$ ,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\rho_w$  – плътност на детайлите,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $S_v$  – обемно съсъхване на дървесината, %;  $\tau$  – време,  $s$ .

Уравнение (1), заедно с началното условие (2) и граничните условия (3) и (4), представлява едномерен математичен модел на процеса на едностранно нагряване на дървени детайли.

### 3. Математично описание на $T_{w-avg}$ и на скоростта на изменението ѝ

Средномасовата температура на дървените детайли  $T_{w-avg}$  по време на едностранното нагряване може да бъде изчислена след интегриране по следното уравнение на полученото при решаването на модела (1)-(4) едномерно (1D) нестационарно разпределение на температурата по дебелината им:

$$(5) \quad T_{w-avg} = \frac{1}{h} \int_{(h)} T(x, \tau) dx.$$

Едномерното нестационарно разпределение на температурата  $T(x, \tau)$  по дебелината на детайлите във всеки момент от едностранното им нагряване се получава в хода на численото решаване на модела (1)-(4).

При решаването на модела едновременно с определянето на средномасовата температура на детайлите  $T_{w-avg}$  е възможно да се изчислява и скоростта на нейното изменение  $\frac{dT_{w-avg}}{d\tau}$ .

### 4. Представяне на математичния модел във вид, удобен за програмиране

За решаване на системата от уравнения (1)-(4) е необходимо да се разполага с математични описания на

топлофизичните характеристики на дървесината  $c_w$ ,  $\lambda_w$ ,  $\alpha_w$  и на нейната плътност  $\rho_w$ .

Въз основа на експериментални данни, получени в дисертации на чуждестранни учени, в [3] са изведени уравнения за изчисляване на участващите в (1) теплофизични характеристики на несъдържаща лед дървесина  $c_w$ ,  $\rho_w$  и  $\lambda_w$  от различни дървесни видове в хигроскопичния диапазон. Те са използвани при решаването на модела (1)-(4).

В [4] е приведено следното уравнение за определяне на коефициента на топлопредаване  $\alpha_w$  на хоризонтално разположени дървесни повърхности в хигроскопичния диапазон

$$(6) \quad \alpha_w = 3.256 [T_{ws}(\tau) - T_a(\tau)]^{0.25}.$$

След въвеждане в уравнение (1) на (6) и на математичните описания на  $c_w$ ,  $\rho_w$  и  $\lambda_w$ , е извършено диференциране на  $\lambda_w$  по  $T$  в дясната част на това уравнение. С използване на явна схема на метода на крайните разлики по начин, описан в [3,5], математичният модел на процеса на едностранно контактно нагряване на плоски дървени детайли е трансформиран във вид, удобен за компютърно програмиране с цел численото му решаване.

Представянето на модела посредством негов дискретен аналог, удобен за програмиране на език FORTRAN, е осъществено с използване на показаната на *фиг. 1* система за позициониране на възлите на изчислителната мрежа, в които се пресмята нестационарното 1D разпределение на температурата по дебелината на подложен на едностранно нагряване плосък дървен детайл.

С числата от 1 до 17 на *фиг. 1* е означен поредният номер на възлите на изчислителната мрежа по дебелината  $h$  на детайла, като с  $\Delta x$  е означено разстоянието между възлите на мрежата по координатната ос  $x$ , съпадаща с дебелината на детайла в мястото, в което се допира плътно изпъкналата част на нагряващото метално тяло.

За интегриране на дясната част на уравнение (5) е приложен методът на Симпсън, който при неголям брой на възлите на изчислителната мрежа се оказва значително по-точен в сравнение с метода на Грегори и на метода на трапеците [7].

С използване на метода на Симпсън уравненията, с чиято помощ се изчисляват текущите стойности на средномасовата температура на детайлите  $T_{w-avg}$  и скоростта на нейното изменение  $dT_{w-avg}/d\tau$  за всеки момент  $n \cdot \Delta\tau$  от процеса на едностранно нагряване на детайлите, получават следния удобен за програмиране вид:

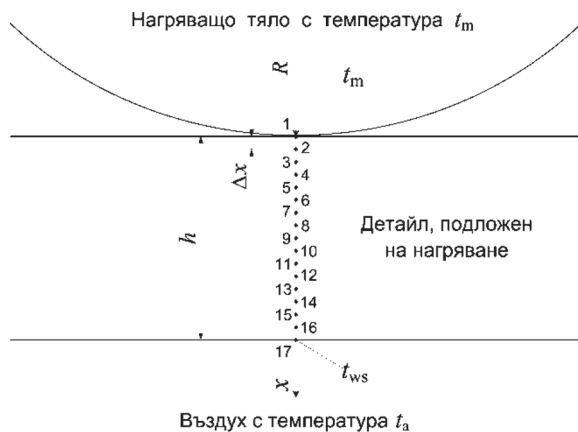
$$(7) \quad T_{w-avg}^n = \frac{\Delta x}{3} \left( \begin{array}{l} T_1^n + 4T_2^n + 2T_3^n + 4T_4^n + 2T_5^n + \\ + 4T_6^n + 2T_7^n + 4T_8^n + 2T_9^n + 4T_{10}^n + \\ + 2T_{11}^n + 4T_{12}^n + 2T_{13}^n + 4T_{14}^n + \\ + 2T_{15}^n + 4T_{16}^n + T_{17}^n \end{array} \right);$$

$$(8) \quad \frac{dT_{w-avg}^n}{d\tau} \approx \frac{\Delta T_{w-avg}^n}{\Delta\tau},$$

където

$$(9) \quad \Delta T_{\text{avg}}^n = T_{\text{avg}}^n - T_{\text{avg}}^{n-1};$$

$$(10) \quad T_{w-\text{avg}}^{n-1} = \frac{\Delta x}{3} \left( \begin{array}{l} T_1^{n-1} + 4T_2^{n-1} + 2T_3^{n-1} + 4T_4^{n-1} + 2T_5^{n-1} + \\ + 4T_6^{n-1} + 2T_7^{n-1} + 4T_8^{n-1} + 2T_9^{n-1} + 4T_{10}^{n-1} + \\ + 2T_{11}^{n-1} + 4T_{12}^{n-1} + 2T_{13}^{n-1} + 4T_{14}^{n-1} + \\ + 2T_{15}^{n-1} + 4T_{16}^{n-1} + T_{17}^{n-1} \end{array} \right)$$



Фиг. 1. Позициониране на възлите на изчислителната мрежа върху дебелината на подложени на едностранно контактно нагряване плоски дървени материали

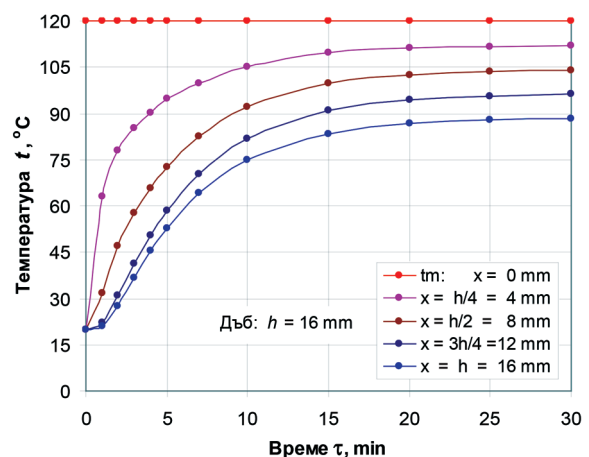
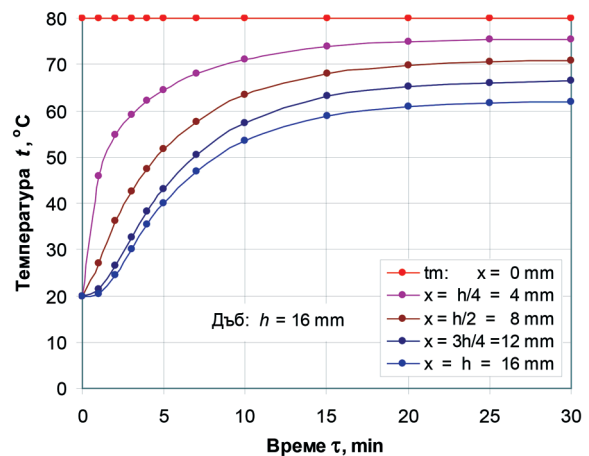
В уравнение (8) с  $\Delta t$  е означена стъпката по времетова координата на изчислителната мрежа, с която се решава моделът, а с  $n$  – поредният номер на тази стъпка:  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

## 5. Изчисляване на 1D разпределение на $T_w$ по дебелината на нагряваните детайли

За решаване на дискретния аналог на математичния модел е изготвена програма в изчислителната среда на Visual Fortran Professional. С тази програма в качеството на пример е изследвано едномерното изменение на температурата в плоски дъбови детайли с дебелини  $h = 12$  mm,  $h = 16$  mm и  $h = 20$  mm, начална температура  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , базисна плътност  $\rho_b = 670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , съдържание на вода и  $= 0.15 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , граница на насищане с вода на клетъчните стени на дъбовата дървесина при  $20^\circ\text{C}$  (т.е. при  $293.15 \text{ K}$ )  $u_{\text{fsp}}^{293.15} = 0.29 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$  и обемно съсъхване  $S_v = 11.9 \%$  [2, 3] по време на едностранното им нагряване в течение на 30 min при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  и  $t_m = 120^\circ\text{C}$  при температура на въздуха  $t_a = 20^\circ\text{C}$  с цел пластифициране преди огъването им.

На фиг. 2 е показано изчисленото с модела едномерно изменение на температурата  $t$  (в  $^\circ\text{C}$ ) в четири равноотдалечени една от друга характерни точки по дебелината на дъбови детайли с  $h = 16$  mm по време на едностранното им нагряване съответно при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  и  $t_m = 120^\circ\text{C}$ . Ко-

ординатите на характерните точки са посочени в легендата на фигурата.



Фиг. 2. Изменение на  $t_w$  по дебелината на дъбови детайли с  $h = 16$  mm по време на едностранното им нагряване при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  (горе) и  $t_m = 120^\circ\text{C}$  (долу)

На фиг. 2 се вижда, че изменението на температурата по дебелината на детайлите става по сложни нелинейни зависимости във времето.

С увеличаване на времето на нагряване кривите  $t_w = f(\tau)$  постепенно асимптотично се приближават към своите най-големи стойности, които са обратно пропорционални на отдалечеността на точките от нагряваната повърхност на детайлите.

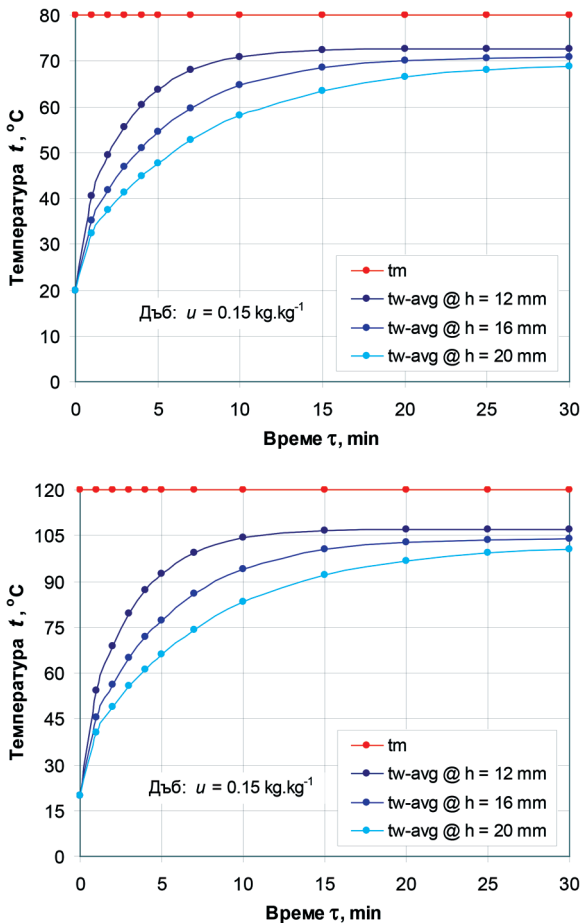
Тези най-големи стойности на  $t_w$  се достигат при установяване на стационарно разпределение на температурата по дебелината на детайлите, което настъпва в резултат на топлопредаването през тяхната ненагрявана повърхност.

## 6. Изчисляване на температурата $T_{w-\text{avg}}$ и на скоростта на изменението ѝ

Синхронно с решаването на модела е извършено изчисляване на  $T_{w-\text{avg}}$  и  $\frac{dT_{w-\text{avg}}}{dt}$  на дъбовите детайли по време на нагряването им.

На фиг. 3 и фиг. 4 е показано изчисленото нестационарно изменение съответно на  $t_{w-\text{avg}}$  в течение на 30 min

нагряване и на скоростта  $\frac{dt_{w-avg}}{d\tau}$  през първите 5 min от него, когато тя е най-голяма.  $d\tau$



Фиг. 3. Изменение на  $t_{w-avg}$  на детайлите по време на нагряването им при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  (горе) и  $t_m = 120^\circ\text{C}$  (долу) в зависимост от  $h$

От фиг. 3 и фиг. 4 се вижда, че изменението както на  $t_{w-avg}$  така и на  $\frac{dt_{w-avg}}{d\tau}$  става по сложни криволинейни зависимости от продължителността на нагряването.

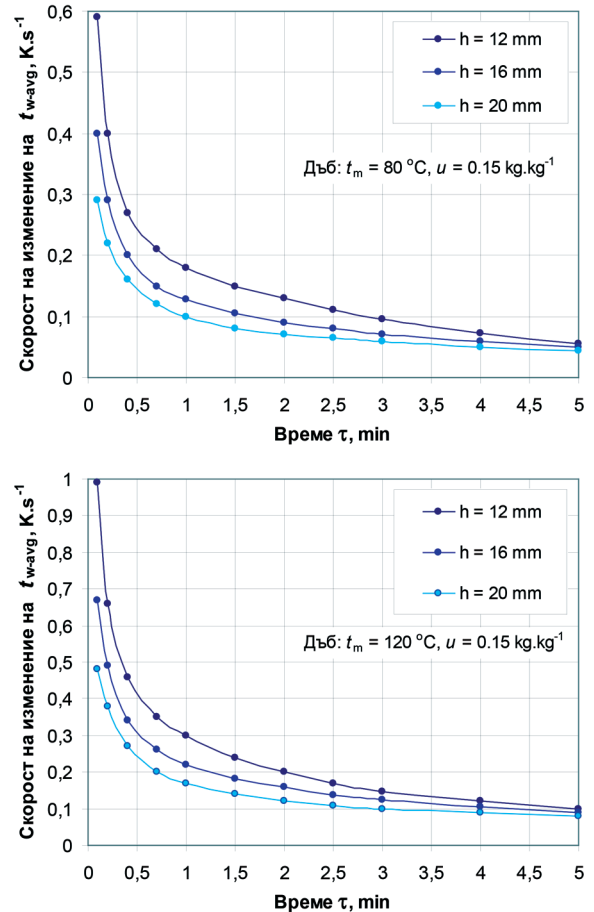
След продължителност 10 min и 15 min на едностранното нагряване на дъбовите детайли при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  тяхната средномасова температура достига съответно следните стойности, достатъчни за пластифицирането им преди огъване:

- за  $h = 12\text{ mm}$ :  $70.9^\circ\text{C}$  и  $72.3^\circ\text{C}$ ;
- за  $h = 16\text{ mm}$ :  $64.6^\circ\text{C}$  и  $68.6^\circ\text{C}$ ;
- за  $h = 20\text{ mm}$ :  $58.0^\circ\text{C}$  и  $63.5^\circ\text{C}$ .

Кривите на  $t_{w-avg} = f(\tau)$ , също както тези на  $t_w = f(\tau)$ , асимптотично се приближават към своите най-големи стойности, които зависят намаляващо от дебелината на детайлите  $h$  и нарастващо от  $t_m$ .

В началото на нагряването скоростта  $\frac{dt_{w-avg}}{d\tau}$  много бързо нараства до стойности, които са извън градуировката на ординатните оси на фиг. 4. Това нарастване на  $\frac{dt_{w-avg}}{d\tau}$  съ-

ответства на стръмните начални участъци на зависимостите  $t_{w-avg} = f(\tau)$ . След достигане на максимални стойности тази скорост започва да намалява – отначало много стръмно, а след това по-полегато. Когато настъпи стационарно разпределение на  $t_w$  по дебелината на детайлите, тази скорост става равна на нула (не е показано на фиг. 4).



Фиг. 4. Изменение на скоростта  $dt_{w-avg}/d\tau$  на детайлите по време на нагряването им при  $t_m = 80^\circ\text{C}$  (горе) и  $t_m = 120^\circ\text{C}$  (долу) в зависимост от  $h$

## 7. Заключение

В статията е предложен числен метод за компютърно определяне на средномасовата температура  $t_{w-avg}$  на плоски дървени детайли и на скоростта на изменение на тази температура по време на едностранното нагряване на детайлите с цел пластифициране преди огъването им. Методът се основава на интегриране на решенията на собствен нелинеен модел за изчисляване на нестационарното 1D поле на температурата в подложени на едностранно контактно нагряване дървени детайли.

За числено решаване на модела с явна схема на метода на крайните разлики и за прилагане на предложения метод е изготвена софтуерна програма в изчислителната среда на продукта Visual FORTRAN Professional, разработен от Microsoft. С нейна помощ са изчислени стойностите на



$t_{w-avg}$  и на скоростта  $\dot{y}$  на изменение при дъбови детайли с начална температура 20°C, съдържание на вода 0.15 kg·kg<sup>-1</sup> и дебелини 12 mm, 16 mm и 20 mm по време на тяхното 30 min едностранно нагряване с цел пластифициране преди огъване в производството на облегални части на столове. При симулациите е прието температурата на нагряващото детайлите метално тяло да бъде равна на 80°C и 120°C.

Получените резултати могат да бъдат използвани за научно обосновано определяне на енергията, необходима за едностранно нагряване на дървени детайли с цел пластифицирането им в производството на пространствено конфигурирани детайли с различно предназначение.

## Благодарности

Тази статия е изготвена в рамките на проект № BG05M2OP001-2.009-0034-C01 "Помощ за развитието на научен капацитет в Лесотехническият университет", финансиран от Оперативната програма за наука и образование за интелигентен растеж (2014-2020) и съфинансиран от ЕС чрез европейските структурни и инвестиционни фондове.

## Литература

1. Ангелски, Д. Изследвания върху процесите на пластифициране и огъване на мебелни детайли от дървесина. Дисертация, ЛТУ, София, 2010.
2. Виделов, Х. Сушене и топлинно обработване на дървесината. ЛТУ, София, 2003.

3. Делийски, Н., Л. Дзуренда. Моделиране на топлинни процеси в технологиите за обработване на дървесина. София, Прима, 2010.
4. Чудинов, Б. С. Теоретически изследвания теплофизических свойств и тепловой обработки древесины. Докт. дисс., СибЛТИ, Красноярск, 1966.
5. Deliiski, N. Transient Heat Conduction in Capillary Porous Bodies. Convection and Conduction Heat Transfer. In Tech Publishing House, Rieka, 2011, 149-176.
6. Deliiski, N., N. Trichkov, D. Angelski, L. Dzurenda. Computation of the Average Wood Temperature and the Rate of its Change During One Sided Heating of Flat Spruce Details before their Bending. – *Innovations in Woodworking Industry and Engineering Design*, V, 2016, No. 1, 21-27.
7. Dorn, W. S., D. D. McCracken. Numerical Methods with FORTRAN IV Case Studies. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
8. Gaff, M., L. Prokein. The Influence of Selected Factors on Coefficient of Wood Bendability. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. – Forestry and Wood Technology*, 2011, No. 74, 78-81.

За контакти:

Проф. д.т.н. **Ненчо Делийски**  
Факултет по горска промишленост  
Лесотехнически университет – София  
e-mail: deliiski@netbg.com

# Софийска енергийна агенция –



Софийска енергийна агенция – СОФЕНА е основана през 2001 г. и оттогава извършва:

- ✓ Проучвания и анализи за енергийна ефективност и възобновяеми енергийни източници.
- ✓ Внедряване на международни стандарти за управление на околната среда и енергиен мениджмънт (ISO 14001 и ISO 50001).
- ✓ Техничко-икономически анализи на енергоспестяващи мерки и техническа помощ при осигуряване на финансиране за тяхното осъществяване.
- ✓ Обучения на служители на фирми, общини и експерти.

✓ Други специфични за клиента консултации в областите на дейност.

СОФЕНА ЕООД е дъщерно дружество на агенцията, създадено за извършване на енергийни обследвания и сертифициране на сгради и енергийни обследвания на промишлени системи и системи за осветление.

За контакти:

1124 София, ул. Цар Иван Асен II № 65, ет. 1  
тел. 02 9434401  
e-mail: office@sofena.com  
www.sofena.com

