

COMPUTATION OF THE ENERGY CONSUMPTION FOR THE HEAT EMISSION OF SUBJECTED TO ONE SIDED HEATING WOOD DETAILS

ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ЕНЕРГОКОНСУМАЦИЯТА ЗА ТОПЛИННАТА ЕМИСИЯ НА ПОДЛОЖЕНИ НА ЕДНОСТРАННО НАГРЯВАНЕ ДЪРВЕНИ ДЕТАЙЛИ



ДЕЛИЙСКИ Ненчо
DELIISKI Nencho
deliiski@netbg.com

Лесотехнически университет - София
катедра «Машинознание и автоматизация на производството»
БЪЛГАРИЯ, 1756 гр.София, бул.Климент Охридски 10



АНГЕЛСКИ Димитър
ANGELSKI Dimitar
d.angelski@gmail.com

Лесотехнически университет - София
катедра «Производство на мебели»
БЪЛГАРИЯ, 1756 гр.София, бул.Климент Охридски 10



ТРИЧКОВ Нено
TRICHKOV Neno
nenotr@abv.bg

Лесотехнически университет - София
катедра «Механична технология на дървесината»
БЪЛГАРИЯ, 1756 гр.София, бул.Климент Охридски 10

Въз основа на диференциалното уравнение на топлопроводността е предложен едномерен линеен модел на процеса на едностранно нагряване на плоски дървени детайли преди огъването им, а също методология за изчисляване с него на енергоконсумацията за топлинната емисия на детайлите. За числено решаване на модела с цел прилагане на методологията е изготвена програма, която е въведена в изчислителната среда на Visual Fortran Professional. С нея са извършени изчисления за определяне на енергоконсумацията за топлинната емисия на плоски смърчови детайли с начална температура 20 °С, съдържание на вода 0.15 kg.kg⁻¹ и дебелини 6 mm, 8 mm и 10 mm по време на едностранното им нагряване в течение на 10 min при температури на нагряващата метална лента 100 °С, 120 °С и 140 °С и на обкръжаващия въздух 20 °С. Получените резултати са представени графично и са анализирани.

Ключови думи: *смърчови детайли, едностранно нагряване, пластифициране, топлинна емисия, специфична енергоконсумация*

Based on the differential equation of the thermal conductivity, a 1D linear mathematical model of the one sided heating process of flat wood details before their bending, and also a methodology for the computation with it of the energy consumption for the heat emission of the details, has been suggested. For the numerical solution of the model with the aim of applying the methodology a software program has been prepared, which has been input in the calculation environment of Visual Fortran Professional. Using the program, computations have been carried out for the determination of the energy consumption for covering of the heat emission of flat spruce details with an initial temperature of 20 °C, moisture content of 0.15 kg.kg⁻¹, and thicknesses of 6 mm, 8 mm, and 10 mm during their 10 min one sided heating at temperatures of the heating metal band of 100 °C, 120 °C, and 140 °C and of the surrounding air of 20 °C. The obtained results are graphically presented and analyzed.

Keywords: *spruce details, one sided heating, plasticizing, heat emission, specific energy consumption*

Statement of the problem. An important component of the technologies for production of curved wood details is the one sided heating aimed at their plasticizing up to the stage that allows for their faultless bending [1]. The duration of the process and the energy needed for the heating of the details and for their heat emission depends on many factors: wood specie, thickness and moisture content of the details, temperatures of the heating body and of the surrounding air, desired degree of plasticizing and radius of the bending, etc. [2, 5, 7, 8].

One sided heating is applied, for example, in the production of curved outside parts of corpuses of string music instruments so that they are plasticized before bending. In the practice those details usually are with thicknesses between 5 mm to 10 mm and with moisture content around 15%. The technology for plasticizing of such details is based on the usage of press equipment with metal band, electrically heated up to the temperature in the range of 100 °C ÷ 150 °C (Fig. 1). The electric energy supplied to the band has been transformed into heat energy, which has been used for the heating of the wood details and for the covering of losses of the heat emission from the non-heated side of the details to the surrounding air environment.

In the specialized literature there is no information at all about the energy consumption both for the details' heating and for the covering of their heat emission.

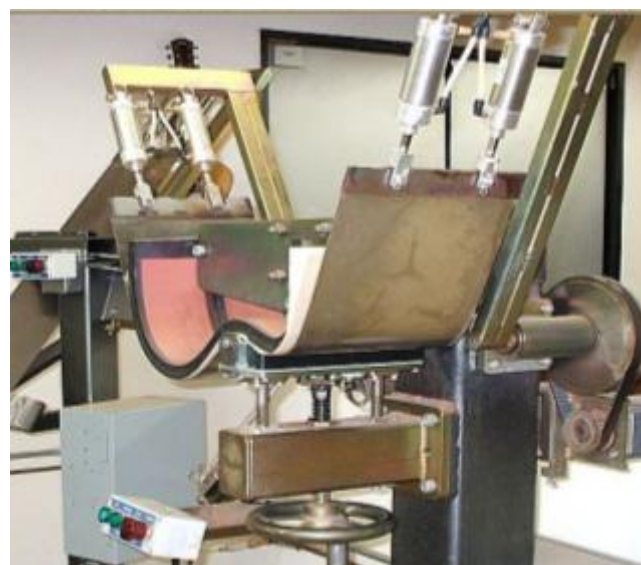
The aim of the present paper is to suggest a methodology for the computation of the energy consumption for covering of the heat emission of flat wood details during their one sided heating aiming their plasticizing before bending.

Постановка на проблема. Важна съставна част на технологиите за производство на огънати детайли от масивна дървесина е тяхното едностранно нагряване с цел пластифициране до състояние, позволяващо бездефектното им огъване [1].

Продължителността на процеса и енергоконсумацията за нагряване на детайлите и за покриване на топлинната им емисия зависи от редица фактори: дървесен вид, съдържание на вода и размери на напречното сечение на детайлите, температурата на

нагряващото тяло, радиуса на огъване и т.н. [2, 5, 7, 8].

На пластифициране посредством едностранно контактно нагряване преди огъването им се подлагат дървени детайли с широчина от 5 до 10 mm и съдържание на вода около 15 %, които са предназначени за влагане като огънати детайли в корпусите на струнни музикални инструменти. Този тип детайли се пластифицират и огъват в преси с метална лента, електрически нагряваема до температура 100 ÷ 150 °C (фиг. 1). Електричната енергия, захранваща лентата, се преобразува в топлинна енергия, която се изразходва за нагряване на дървените детайли и за покриване на топлинната емисия от ненагряваната им повърхност към околното въздушно пространство.



Фиг. 1. Оборудване с електрически нагряваема метална лента за едностранно нагряване и огъване на плоски дървени детайли

В специализираната литература липсва информация за енергоконсумацията както за нагряването на детайлите, така и за топлинната им емисия.

Цел на настоящата работа е да се предложи методология за изчисляване на енерго-консумацията за покриване на топлинната емисия на плоски дървени детайли по време на едностранното им нагряване с цел тяхното пластифициране преди огъването им.

Механизъм на разпространение на топлината в детайлите по време на едностранното им нагриване. Когато широчината на подложени на едностранно нагриване детайли превишава дебелината им поне 3 ÷ 4 пъти, нестационарното изменение на температурата по дебелината на детайлите (т.е. по координата x , която съвпада с дебелината на детайлите) по време на нагриването може да се изчисли с помощта на следния линеен 1D математичен модел [3]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_c \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (1)$$

с начално условие

$$T(x, 0) = T_0 \quad (2)$$

и следните гранични условия:

- откъм страната на нагриващото тяло – при температура на повърхността на детайлите, еднаква с тази на температурата на металното нагриващо тяло T_m :

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

- откъм противоположната на нагриващото тяло страна на детайлите – при условията на конвективен топлообмен между дървесината и обкръжаващата я въздушна среда:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha(\tau)}{\lambda_s(\tau)} [T_a(\tau) - T_s(\tau)] \quad (4)$$

където a_c е коефициентът на предаване на температура на дървесината напречно на дървесните влакна, $m^2 \cdot s^{-1}$; T – температурата, К; T_0 – началната температура на нагриваните детайли, К; T_m – температурата на металното тяло, нагриващо едностранно детайлите, К; T_s – температурата на повърхността на детайлите, контактуваща с въздуха по време на нагриването, К; T_a – температурата на въздуха в близост до ненагриваната повърхност на детайлите, К; u – съдържанието на вода на детайлите, $kg \cdot kg^{-1}$; x – координатата по оста на нагриването, съвпадаща с дебелината на детайлите: $0 \leq x \leq X = h$, m; h – дебелината на детайлите, m; α – коефициентът на топло-предаване

между детайлите и въздуха, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; $\lambda_s = \lambda_c$ – коефициентът на топло-проводност напречно на влакната на дървесината върху ненагриваната повърхност на детайлите, която контактува с въздуха, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; τ – времето, s.

Противоположната на нагриващото тяло страна на детайлите се подлага на охлаждане при атмосферни условия на естествена конвекция по време на едностранното нагриване. За изчисляване на коефициента на топлопредаване на хоризонтално разположени плоскости на дървесината Чудинов [5] предлага следното уравнение:

$$\alpha = 3.256 [T_s(\tau) - T_a(\tau)]^{0.25}. \quad (5)$$

Значението на променливите в уравнение (5) е обяснено по-горе.

Математично описание на енергоконсу-мацията за покриване на топлинната емисия на детайлите. Изменението на специфичния (за $1 m^2$ от повърхността на детайлите) разход на енергия q_e , който е необходим за покриване на топлинната емисия от ненагриваната им повърхност в околното въздушно пространство в течение на време $\Delta\tau$, може да се изчисли по следното уравнение [3]:

$$\Delta q_e = \frac{\alpha(\tau) \Delta\tau}{3.6 \cdot 10^6} [T_s(\tau) - T_a(\tau)]. \quad (6)$$

Множителят $3.6 \cdot 10^6$ в знаменателя на уравнение (6) осигурява размерност на стойностите на q_e в $kWh \cdot m^{-2}$, вместо в $J \cdot m^{-2}$.

Специфичният разход на енергия, който е необходим за покриване на емисията от $1 m^2$ повърхност на детайлите по време на процеса на тяхно нагриване с продължителност $\tau_p = N \cdot \Delta\tau$, е равен на

$$q_e = \sum_{i=1}^N \Delta q_{ei}. \quad (7)$$

Резултати и дискусия. За числено решаване на представения чрез уравнения (1) ÷ (7) математичен модел е изготвена програма на FORTRAN, която е въведена в изчислителната среда на Visual Fortran Professional. С тази програма е изчислено

разпределението на температурното поле по дебелината на смърчови (*Picea Abies Karst*) детайли с дебелини $h = 6 \text{ mm}$, $h = 8 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$, начална температура $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и съдържание на вода $u = 0.15 \text{ kg.kg}^{-1}$ по време на едностранното им нагряване в течение на 10 min при $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. В резултат на изчисленията е получено показаното на фиг. 1, 2 и 3 изменение на температурата на ненагряваната повърхност на детайлите T_s , а с нейно участие и с използване на уравнения (5) и (6) е изчислено и изменението на енергията, която е необходима за покриване на топлинната емисия от тази повърхност към околното пространство за всеки момент на едностранното нагряване на детайлите в течение на 10 min . (фиг. 4, 5 и 6).

Изчисленията са извършени със средноаритметичните стойности на a_c и $\lambda_c = \lambda_s$ за температурните диапазони от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ съответно до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $120 \text{ }^\circ\text{C}$ и $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Тези стойности са получени с помощта на математичните описания на a_c и λ_c в зависимост от температурата, съдържанието на вода и границата на насищане на клетъчните стени на дървесните видове [3, 4, 6].

Линейната зависимост на a_c и λ_c от температурата [3] позволява да се решава линейното диференциално уравнение (1) с приведените в таблица 1 средноаритметични стойности на a_c и $\lambda_s = \lambda_c$ в съответните температурни диапазони за определяне на разпределението на температурата по дебелината на детайлите, а също на T_s и q_e .

Получените резултати, показват че:

1. Увеличаването на специфичната енергосумация за покриване на топлинната емисия q_e по време на едностранното нагряване на детайлите става по криволинейна зависимост, която преминава в праволинейна след достигане на установени стойности на температурата на ненагряваната повърхност на детайлите t_s .

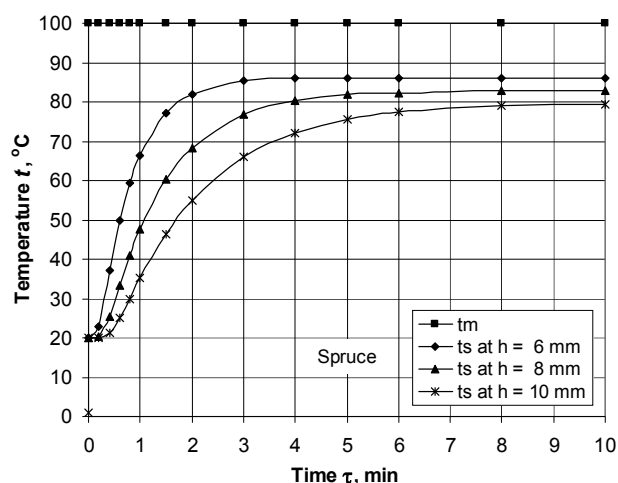
2. Когато по дебелината на детайлите в резултат на нарастващата топлинна емисия настъпи стационарно разпределение на температурата, t_s достига следните установени стойности (фиг. 1, 2 и 3):

- за детайлите с дебелина $h = 6 \text{ mm}$: $t_s = 86.0 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_s = 102.7 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_s = 118.5 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 140 \text{ }^\circ\text{C}$;
- за детайлите с дебелина $h = 8 \text{ mm}$: $t_s = 82.7 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_s = 98.0 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_s = 113.3 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 140 \text{ }^\circ\text{C}$;
- за детайлите с дебелина $h = 10 \text{ mm}$: $t_s = 79.7 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_s = 94.2 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_s = 108.7 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_m = 140 \text{ }^\circ\text{C}$.

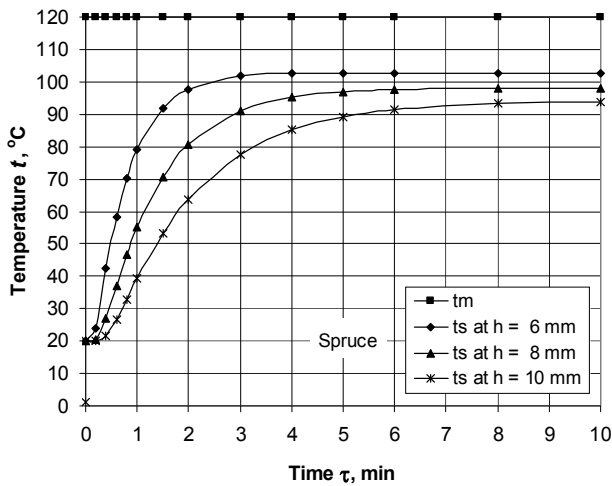
Таблица 1.

Изменение на a_c и $\lambda_s = \lambda_c$ на смърчова дървесина с $u = 0.15 \text{ kg.kg}^{-1}$ в зависимост от t

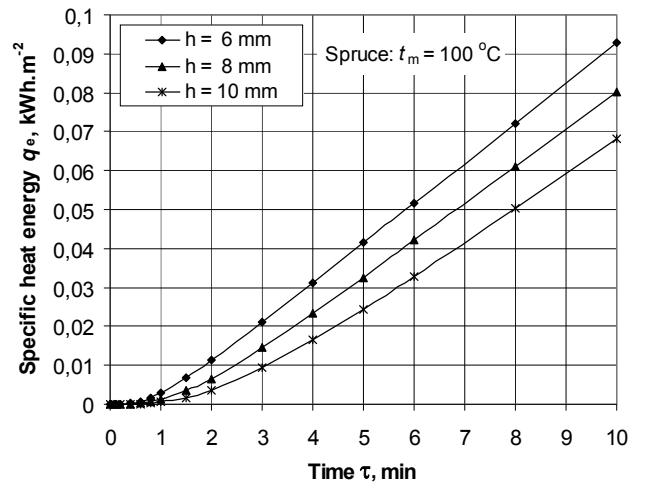
Параметри на дървесината	Средни стойности за $\lambda_s = \lambda_c$ и a_c за температурните диапазони		
	$t = 20 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 20 \div 120 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 20 \div 140 \text{ }^\circ\text{C}$
$\lambda_s = \lambda_c, \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	0.2664	0.2745	0.2826
$a_c \cdot 10^7, \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	2.7331	2.7627	2.7926



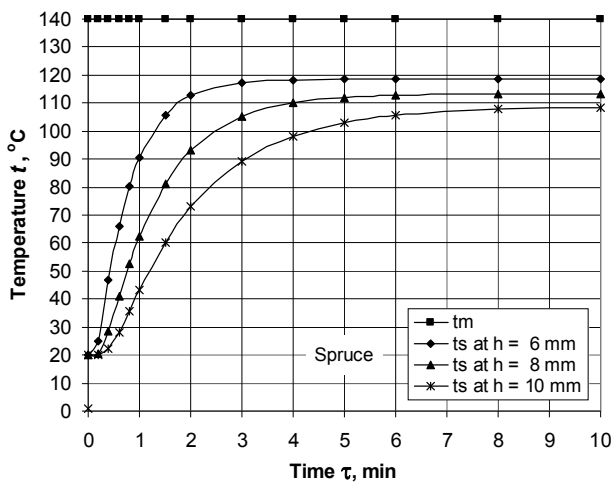
Фиг. 1. Изменение на t_m и t_s на смърчови детайли с $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $u = 0.15 \text{ kg.kg}^{-1}$, $h = 6 \text{ mm}$, 8 mm и $h = 10 \text{ mm}$ по време на едностранното им нагряване при $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



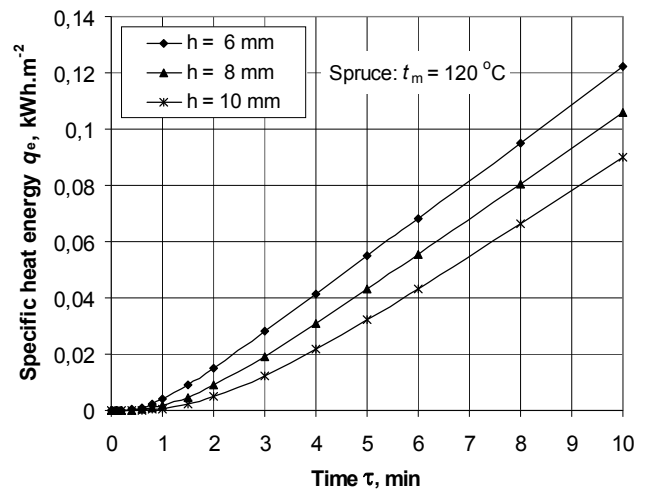
Фиг. 2. Изменение на t_m и t_s на смърчови детайли с $t_0 = 20$ °C, $u = 0.15$ kg.kg⁻¹, $h = 6$ mm, 8 mm и $h = 10$ mm по време на едностранното им нагряване при $t_m = 120$ °C и $t_a = 20$ °C



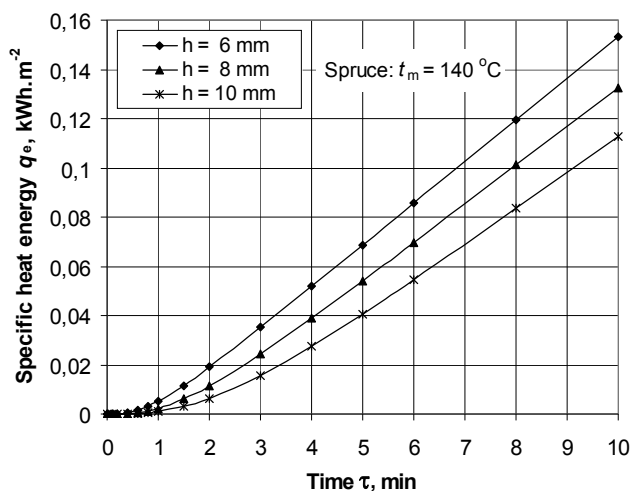
Фиг. 4. Изменение на q_e на смърчови детайли с $t_0 = 20$ °C, $u = 0.15$ kg.kg⁻¹, $h = 6$ mm, 8 mm и $h = 10$ mm по време на едностранното им нагряване при $t_m = 100$ °C и $t_a = 20$ °C



Фиг. 3. Изменение на t_m и t_s на смърчови детайли с $t_0 = 20$ °C, $u = 0.15$ kg.kg⁻¹, $h = 6$ mm, 8 mm и $h = 10$ mm по време на едностранното им нагряване при $t_m = 140$ °C и $t_a = 20$ °C



Фиг. 5. Изменение на q_e на смърчови детайли с $t_0 = 20$ °C, $u = 0.15$ kg.kg⁻¹, $h = 6$ mm, 8 mm и $h = 10$ mm по време на едностранното им нагряване при $t_m = 120$ °C и $t_a = 20$ °C



Фиг. 6. Изменение на q_e на смърчови детайли с $t_0 = 20$ °C, $u = 0.15$ kg.kg⁻¹, $h = 6$ mm, 8 mm и $h = 10$ mm по време на едностранното им нагряване при $t_m = 140$ °C и $t_a = 20$ °C

3. Наклонът на праволинейните участъци на зависимостите $q_e = f(\tau)$ е пропорционален на температурата на нагряващата метална лента t_m . Този наклон намалява при увеличаване на дебелината на детайлите h .

4. Специфичната енергоконсумация q при равни други условия зависи пропорционално от t_m и обратно пропорционално от h . Так например, след 10 min едностранно нагряване на смърчовите детайлите енергоконсумацията q_e достига следните стойности (фиг.4, 5 и 6):

- за детайлите с дебелина $h = 6$ mm: $q_e = 0.093$ kWh.m⁻² при $t_m = 100$ °C, $q_e = 0.122$ kWh.m⁻² при $t_m = 120$ °C и $q_e = 0.153$ kWh.m⁻² при $t_m = 140$ °C;

- за детайлите с дебелина $h = 8$ mm: $q_e = 0.080$ kWh.m⁻² при $t_m = 100$ °C, $q_e = 0.106$ kWh.m⁻² при $t_m = 120$ °C и $q_e = 0.133$ kWh.m⁻² при $t_m = 140$ °C;

- за детайлите с дебелина $h = 10$ mm: $q_e = 0.068$ kWh.m⁻² при $t_m = 100$ °C, $q_e = 0.090$ kWh.m⁻² при $t_m = 120$ °C и $q_e = 0.113$ kWh.m⁻² при $t_m = 140$ °C.

Заклучение. В статията е предложена оригинална методология за изчисляване на специфичната енергоконсумация, която е необходима за покриване на топлинната емисия от повърхността на подложени на

едностранно нагряване дървени детайли в околното въздушно пространство във всеки момент от този процес. Методологията се базира на използване на числените решения на предложен от авторите линеен математичен модел на процеса на едностранното нагряване на детайлите, включващ диференциалното уравнение на топлопроводността в едномерен вариант при съответните гранични условия на този процес.

За числено решаване на модела с цел прилагане на предложената методология е изготвена програма, която е въведена в изчислителната среда на Visual Fortran Professional.

Като пример за използване на модела и на предложената методология, с програмата са извършени изчисления за определяне на изменението на енергоконсумацията за топлинната емисия на плоски смърчови детайли с начална температура 20 °C, съдържание на вода 0.15 kg.kg⁻¹ и дебелини 6 mm, 8 mm и 10 mm по време на едностранното им нагряване в течение на 10 min при температури на нагряващото тяло 100 °C, 120 °C и 140 °C и на обкръжаващия въздух 20 °C. Смърчови детайли с такива характеристики се подлагат на едностранно нагряване с цел пластифициране преди огъването им при производството на криволинейни части от корпусите на

Получените изцяло оригинални резултати за q_e са представени графично и са анализирани.

Предложената методология може да се използва за определяне на q_e на детайли от различни дървесни видове, които са подложени на едностранно нагряване в мебелната и други промишлености. Методологията и получените с нея резултати позволяват да бъде извършвано научно-обосновано енергийно оразмеряване на нагряващите тела на оборудвания, в които се осъществява едностранното нагряване на дървени и други детайли.

Conclusions. In the present paper an original methodology for the computation of the specific energy consumption needed for the covering of the heat losses from the surface of the subjected to one sided heating

flat wood details in the surrounding air environment has been suggested. The methodology is based on the usage of numerical solutions of earlier suggested by the authors 1D linear mathematical model of the one sided heating process of flat wood details, which includes the differential equation of thermal conductivity at corresponding boundary conditions.

For the numerical solution of the model and for the applying of the suggested methodology a software program has been prepared, which has been input in the calculation environment of Visual Fortran Professional.

As examples for the use of the model and the suggested methodology, computations have been carried out for the determination of the change in the specific energy q_e , which is needed for the covering of the heat emission of spruce details with an initial temperature of 20 °C, moisture content of 0.15 kg.kg⁻¹, and thicknesses of 6 mm, 8 mm, and 10 mm during

their 10 min one sided heating at temperatures of the heating body of 100 °C, 120 °C, and 140 °C and of the surrounding air of 20 °C.

Spruce details with such characteristics have been subjected to one sided heating aimed at their plasticizing before bending in the production of corved outside parts for the corpuses of stringed music instruments.

The obtained fully original results for q_e have been graphically presented and analyzed.

The suggested methodology can be used for the determination of q_e of details from different wood species, which have been subjected to one sided heating in furniture and other industries. The methodology and the obtained with it results allow for the realizing of science-based energy dimensioning of the heating bodies of equipments for the one sided heating of wood and other details.

Acknowledgements. This document was supported by the grant No BG051PO001-3.3.06-0056, financed by the Human Resources Development Operational Programme (2007 – 2013) and co-financed jointly by the ESF of the EU and the Bulgarian Ministry of Education and Science.

Литература: 1. Ангелски, Д. Изследвания върху процесите на пластифициране и огъване на мебелни детайли от масивна дървесина // Дисертация, ЛТУ, София, 2010. 2. Виделов, Х. Сушене и топлинно обработване на дървесината // Изд. къща на ЛТУ, София, 2003. 3. Делийски, Н. Моделиране и технологииза пропарване на дървени материали в автоклави // Дисертация за д.т.н., ЛТУ, София, 2003. 4. Делийски, Н., Дзуренда, Л. Моделирование тепловых процессов в технологиях обработки древесины // Изд. Технического университета г.Зволена, Словакия, 2010. 5. Чудинов, Б. С. Теория тепловой обработки древесины // Изд. „Наука”, Москва, 1968. 6. Deliiski, N. Computation of the wood thermal conductivity during defrosting of the wood // Wood Research – 2013 – № 4 – p. 637-650. 7. Gaff, M., Prokein L.. The influence of selected factors on coefficient of bendability // Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology – 2011 – № 74 – p. 78-81. 8. Taylor, Z. Wood bender’s handbook // Sterling Publ. Co., Inc. – 2001 – New York.