

ОПРЕДЕЛЯНЕ ПРОДЪЛЖИТЕЛНОСТТА НА КОНВЕКТИВНО НАГРЯВАНЕ НА ПЛОСКИ ДЪБОВИ ДЕТАЙЛИ ПРЕДИ ПОСЛЕДВАЩОТО ИМ ЛАКИРАНЕ

Ненчо Делийски, Димитър Ангелски, Нено Тричков, Живко Гочев
Лесотехнически университет, София

Резюме

Въз основа на диференциалното уравнение на топлопроводността е предложен линеен модел на процеса на едностранно конвективно нагряване с горещ въздух на плоски мебелни детайли преди лакирането им. За решаване на модела е изготвена програма в изчислителната среда на Visual Fortran. С програмата е изчислено едностранното разпределение на температурата по дебелината на плоски дъбови детайли с начална температура 20 °C, съдържание на вода 0,08 kg·kg⁻¹ и дебелина 16 mm по време на 14 min нагряване с въздух с температура 60 °C, 80 °C, 100 °C и скорост 3 m·s⁻¹.

Ключови думи: конвективно нагряване, плоски дъбови детайли, филмообразуване, лакиране.

Key words: convective heating, flat oak details, film-forming, lacquering.

JEL: L68, O33.

Увод

Предварително нагряване на подлежащи на лакиране повърхнини се прилага с цел ускоряване на втвърдяването на тънки покрития от лакови системи с органични разтворители. При насяне на лаковите покрития върху нагряватата повърхност се ускорява изпарението на разтворителите и се отстранява въздухът от порите на дървесината [8, 11].

Съоръженията за предварително нагряване на подлежащи на лакиране детайли се оформят като тунелни секции, пригодени за включване в поточни линии за формиране на защитно-декоративни покрития [4, 7, 9].

В специализираната литература лисват сведения относно предложени методи за научно обосновано определяне на целесъобразната продължителност на конвективното нагряване на дървени детайли преди лакирането им. Ето защо всяко изследване в тази насока представлява както научен, така и практически интерес.

В статията се представя 1D линеен модел за изчисляване разпределението на температурата по дебелината на подложени на едностранно конвективно нагряване с горещ въздух плоски дървени детайли с цел подобряване температурните условия за последващото им лакиране.

1. Механизъм на разпространение на топлината в дървените детайли по време на конвективното им нагряване

По време на нагряването на дървени детайли наред с чисто топлинните процеси протича размяна на влага между детайлите и околното пространство. Коефициентът на дифузията на влага на дървесината обикновено е стотици пъти по-малък от коефициента на предаване на температура на дървесината [1, 2, 3, 10]. Този факт

обуславя незначително изменение на съдържанието на вода в дървесината в сравнение с изменението на температурата ѝ по време на нагряването. Поради това механизмът на разпространение на топлината в детайлите може да се опише математически с помощта на уравнението на топлопроводността.

При дървени детайли, когато широчината и дължината им превишават тяхната дебелина поне съответно 2 ÷ 3 пъти и 4 ÷ 5 пъти, изчисляването на нестационарното изменение на температурата по дебелината h на най-бавно нагряващото се тяхно напречно сечение по време на едностранното им конвективно нагряване може да се осъществи с помощта на следния 1D линеен математичен модел [2]:

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

с начално условие

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

и следните гранични условия (виж фиг. 1):

- откъм нагряваната повърхност на детайлите – в условията на принуден конвективен топлообмен между дървесината и циркулиращия над нея горещ въздух:

$$\frac{dT(0, \tau)}{dx} = - \frac{\alpha_{hs}(\tau)}{\lambda_{hs}(0, \tau)} [T(0, \tau) - T_{ha}(\tau)], \quad (3)$$

- откъм ненагряваната повърхност на детайлите – в условията на естествен конвективен топлообмен между дървесината и обкръжаващата я въздушна среда:

$$\frac{dT(X, \tau)}{dx} = - \frac{\alpha_{nhs}(\tau)}{\lambda_{nhs}(X, \tau)} [T(X, \tau) - T_{nha}(\tau)], \quad (4)$$

където x е координатата на отделните точки върху оста на нагряването, съвпадаща с дебелината на детайлите: $0 \leq x \leq X = h$, m (фиг. 1); h – дебелина на детайлите, m; a – коефициент на предаване на температура на дървесината на детайлите, $m^2 \cdot s^{-1}$; u – съдържание на вода на детайлите, $kg \cdot kg^{-1}$; τ – време, s; T – температура, K; T_0 – начална температура на подложените на нагряване детайли, K; $T(x,0)$ – температура на всички точки по оста на детайлите в началото на нагряването, K; $T(0,t)$ – температура на нагряваната повърхност на детайлите, K; $T(X,t)$ – температура на ненагряваната повърхност на детайлите, K; T_{ha} – температура на въздуха в близост до нагряваната повърхност на детайлите, K; T_{nha} – температура на въздуха в близост до ненагряваната повърхност на детайлите, K; α_{hs} – коефициент на конвективно топлопредаване на нагряваната повърхност на детайлите, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; α_{nhs} – коефициент на конвективно топлопредаване на ненагряваната повърхност на детайлите, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; λ_{hs} – коефициент на топлопроводност на дървесината на нагряваната повърхност на детайлите, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; λ_{nhs} – коефициент на топлопроводност на дървесината на ненагряваната повърхност на детайлите, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ – плътност на дървесината на детайлите, $kg \cdot m^{-3}$.

2. Конкретизиране на условията за конвективно нагряване на дъбовите детайли

За компютърно решаване на системата от уравнения (1) ÷ (4) е необходимо да се разполага със стойностите на коефициентите и променливите, които участват в десните части на тези уравнения, а именно: T_0 , T_{ha} , T_{nha} , λ_{ha} , λ_{nha} , a , α_{ha} , α_{nha} и ρ . По този начин се конкретизират условията за провеждане на процеса на едностранно конвективно нагряване на плоските дървени детайли.

2.1. Параметри на нагряваните детайли

Приемаме, че на нагряване са подложени плоски дъбови детайли със следните параметри:

- дебелина $h = 0,16$ m;
- широчина $l = 0,6$ m, съвпадаща с посоката на обдухване на детайлите с горещ въздух в нагряващото съоръжение;
- температура в началото на нагряването $t_0 = 20^\circ C$, т.е. $T_0 = 20 + 273,15 = 293,15$ K;
- съдържание на вода $u = 0,08$ $kg \cdot kg^{-1}$, т.е. 8%;
- съдържание на вода при границата на насищане на клетъчните стени при $20^\circ C$, т.е. при $293,15$ K $u_{fsp}^{20} = 0,29$ $kg \cdot kg^{-1}$ [1, 3];
- обемно съсъхване $S_v = 11,9\%$ [3];
- базисна плътност $\rho_b = 670$ $kg \cdot m^{-3}$ [1, 3, 10].

При тези стойности на ρ_b , u , u_{fsp}^{20} и S_v съгласно следното уравнение, отнасящо се за хигроскопичния диапазон на дървесината [2]:

$$\rho = \rho_b \frac{1+u}{1 - \frac{S_v}{100} [u_{fsp}^{293,15} - 0,001(T - 293,15) - u]} \quad (5)$$

дъбовата дървесина при температура $20^\circ C$ има плътност $\rho = 742$ $kg \cdot m^{-3}$.

2.2. Параметри на въздуха откъм нагряваната и ненагряваната повърхност на детайлите

- температура на нагряващия детайлите въздух $t_{ha} = 60^\circ C$, $t_{ha} = 80^\circ C$ и $t_{ha} = 100^\circ C$, т.е. T_{ha} във всеки от тези 3 случая е равна съответно на $233,15$ K, $253,15$ K и $273,15$ K;
- скорост на нагряващия въздух $v = 3$ $m \cdot s^{-1}$;
- температура на въздуха от ненагряваната повърхност на детайлите $t_{nha} = 20^\circ C$, т.е. $T_{nha} = 293,15$ K.

2.3. Коефициенти на топлопроводност и на предаване на температура на дървесината

С използване на приведеното в [3] математично описание на топлофизичните характеристики на дървесината са изчислени показаните в табл. 1 средноаритметични стойности на a и на $\lambda = \lambda_{hs}$ на дървесина от дъб с посочените по-горе ρ_b , u , u_{fsp}^{20} и S_v при изменение на температурата на дървесината от $20^\circ C$ до $40^\circ C$, от $20^\circ C$ до $50^\circ C$ и от $20^\circ C$ до $60^\circ C$.

По-долу на фиг. 2, 3 и 4 е показано, че тази температура се изменя в посочените диапазони при конвективното нагряване на детайлите с горещ въздух с температура t_{ha} , съответно равна на $60^\circ C$, $80^\circ C$ и $100^\circ C$.

Наличието на линейни зависимости на a и λ на дървесината от температурата [2, 3] позволява при решаването на математичния модел (1) ÷ (4) да се използват средноаритметичните стойности на a и $\lambda = \lambda_{hs}$ в съответните температурни диапазони за определяне изменението на t по дебелината на детайлите по време на едностранното им нагряване.

2.4. Коефициенти на топлопредаване между въздуха и дървесината

Коефициентът на топлопредаване между горещия въздух и нагряваната повърхност на детайлите е определен по следното уравнение за условията на турбулентен режим на принудена конвекция на въздуха [5]:

$$\alpha_{hs} = \frac{0,037 Re_{ha}^{0,8} Pr_{ha}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ha}}{Pr_{hs}} \right)^{0,25} \cdot \lambda_{ha}}{l}, \quad (6)$$

където λ_{ha} е коефициентът на топлопроводност на нагриващия детайлите въздух, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; l – дължина на детайлите, по протежението на които те се обдухват от горещия въздух, m , Re_{ha} – критерий на подобие на Рейнолдс, определен спрямо температурата на нагриващия въздух (hot air); Pr_{ha} – критерий на подобие на Прантл, определен спрямо температурата на нагриващия въздух; Pr_{hs} – критерий на Прантл, определен спрямо температурата на нагриваната повърхност на детайлите (heated surface).

С използване на приведеното в [2] математично описание на параметрите на въздуха по уравнение (6) са определени следните стойности на α_{hs} при скорост на нагретия въздух $v = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ обдувана широчина на детайлите $l = 0,6 \text{ m}$:

- $\alpha_{hs} = 14,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ при $t_{ha} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $\alpha_{hs} = 14,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ при $t_{ha} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $\alpha_{hs} = 13,80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ при $t_{ha} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Причина за намаляването на α_{hs} с нарастване на t_m е увеличаването на коефициента на кинематичен вискозитет на въздуха w пропорционално на t_m .

Този вискозитет участва в знаменателя на уравнението за определяне на критерия на подобие на Рейнолдс Re_{ha} [3, 5], т.е. при увеличаване

на w намалява Re_{ha} , в резултат на което съгласно (6) намалява и коефициентът α_{hs} .

Коефициентът на топлопредаване между дървесината и въздуха откъм ненагриваната повърхност на детайлите се определя по уравнение, отнасящо се за условията на свободна конвекция на въздуха [5]:

$$\alpha_{nhs} = \frac{0.65(Gr_{nha} Pr_{nha})^{0.25} \left(\frac{Pr_{nha}}{Pr_{nhs}}\right)^{0.25} \lambda_{nha}}{b}, \quad (7)$$

където λ_{nha} е коефициент на топлопроводност на въздуха откъм ненагриваната повърхност на детайлите, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; b – по-малкият от двата линейни размера на повърхността на детайла, обдувана от горещия въздух, m ; Gr_{nha} – критерий на подобие на Грасхоф, определен спрямо температурата на въздуха откъм ненагриваната повърхност на детайлите (not heating air); Pr_{ha} – критерий на подобие на Прантл, определен спрямо същата температура; Pr_{hs} – критерий на подобие на Прантл, определен спрямо температурата на нагриваната повърхност на детайлите (not heated surface).

Таблица 1. Изменение на a и $\lambda = \lambda_{hs}$ на дъбова дървесина с $\rho_b = 670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ и $u = 0.08 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ в зависимост от t

Параметър на дървесината	Температура t , $^\circ\text{C}$					Средноаритметични стойности на λ_{hs} и a за температурните диапазони:		
	20	30	40	50	60	$t = 20 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_{ha} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 20 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_{ha} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$	$t = 20 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$ при $t_{ha} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
$\lambda_{hs} = \lambda$, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.2648	0.2693	0.2738	0.2783	0.2828	0.2693	0.27155	0.2738
$a \cdot 10^7$, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1.9351	1.9344	1.9337	1.9331	1.9325	1.9344	1.9340	1.9337

3. Изчисляване с модела на 1D разпределение на температурата по дебелината на детайлите

Уравнение (6) е въведено в (3), а уравнение (7) е въведено в (4). Полученият по този начин конкретизиран 1D математичен модел на процеса на едностранно конвективно нагриване на плоски дървени детайли е представен в удобна за компютърно решаване форма.

Използвана е явна схема на метода на крайните разлики по начин, който е описан в [2].

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 1D разпределение на температурата по дебелината на подложения на едностранно нагриване плосък дървен детайл.

С цифрите от 1 до 9 на фиг. 1 е означен по-редният номер на възлите на изчислителната мрежа по дебелината h на детайла, като с Δx е означено разстоянието между възлите на мрежата по координатната ос x , съпадаща с дебелината.

За решаване на дискретните аналози на системата от уравнения (1) ÷ (7) е изготвена програма в изчислителната среда на Visual Fortran Professional.

С програмата в качеството на пример е изследвано 1D изменение на температурата в плоски дъбови детайли с дебелина $h = 0,16 \text{ m}$, начална температура $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, базисна плътност $\rho_b = 670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, съдържание на вода $u = 0,08 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $u_{fsp}^{20} = 0,29 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ и обемно съсъхване $S_v = 11,9\%$ [1, 3] по време на едностранното им конвективно нагриване в течение на 14 min при $t_m = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ и $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

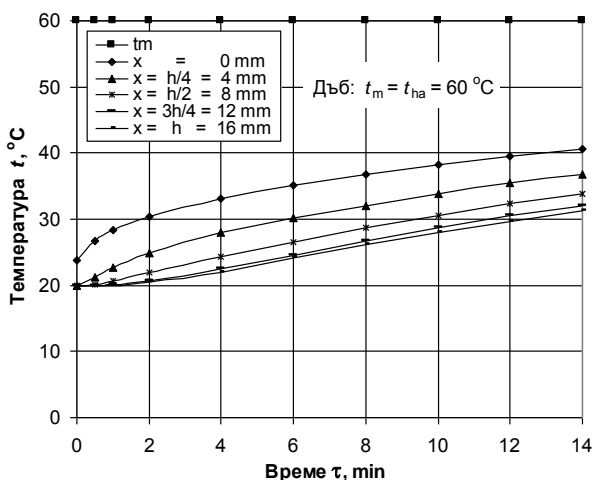


Фиг. 1. Позициониране на възлите на 1D изчислителна мрежа върху дебелината на подложени на едностранно конвективно нагряване плоски дървени материали

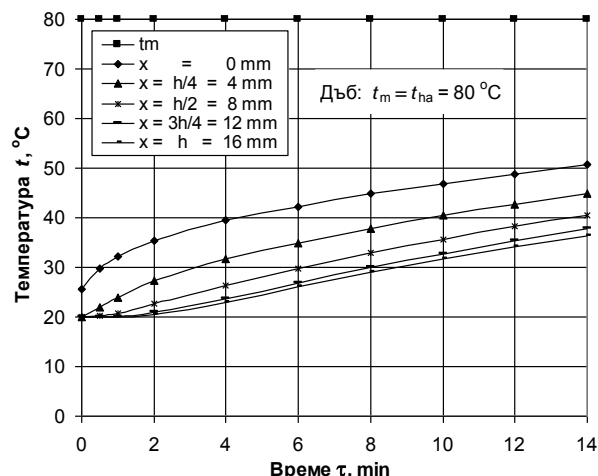
Изчисленията са извършени с 9 възела на изчислителната мрежа, т.е. със стъпка Δx , равна на 2 mm (Фиг. 1).

На фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4 е показана заложената с входните данни на модела постоянна температура на нагряващата въздушна среда съответно $t_m = t_{ha} = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = t_{ha} = 80\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_m = t_{ha} = 100\text{ }^\circ\text{C}$, а също изчисленото с модела 1D изменение на температурата в 5 равноотдалечени една от друга характерни точки по дебелината на детайлите по време на едностранното им нагряване. Координатите на характерните точки са посочени в легендите на фигурите.

Продължителността на нагряването на детайлите при компютърните симулации, равна на 14 min, е избрана от следните съображения. Както се посочи в увода, цел на настоящото изследване е да се определи необходимото време за акумулиране на топлина в повърхностните слоеве на детайлите по време на конвективното им нагряване при различни температури на циркулиращ със скорост $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ горещ въздух с цел подобряване на условията на последващото лаково филмообразуване.



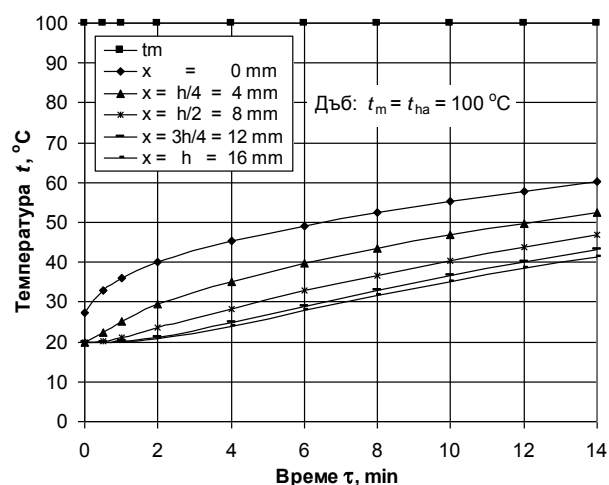
Фиг. 2. Изменение на t по дебелината на дъбов детайл с $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $u = 0,08\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $h = 16\text{ mm}$ и $l = 0,6\text{ m}$ при едностранното му конвективно нагряване с $t_{ha} = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ и $t_{nha} = 20\text{ }^\circ\text{C}$



Фиг. 3. Изменение на t по дебелината на дъбов детайл с $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $u = 0,08\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $h = 16\text{ mm}$ и $l = 0,6\text{ m}$ при едностранното му конвективно нагряване с $t_{ha} = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ и $t_{nha} = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Като индикатор за количеството топлина, акумулирана в детайлите по време на нагряването, на този етап от решаването на задачата е прието да се използва времето за достигане на определена зададена температура в точка, отдалечена на 4 mm от нагряваната повърхност на детайлите без при това да се превишава зададена допустима температура на повърхността им.

В тази статия е прието ограничението от $55\text{ }^\circ\text{C}$ за максимално допустима температура на дървесината за случаите на нанасяне на нитроцелулозен лак или полиестерен грунд [4] върху нагрявата повърхност на детайлите.



Фиг. 4. Изменение на t по дебелината на дъбов детайл с $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $u = 0,08\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $h = 16\text{ mm}$ и $l = 0,6\text{ m}$ при едностранното му конвективно нагряване с $t_{ha} = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ и $t_{nha} = 20\text{ }^\circ\text{C}$

4. Анализ на резултатите

Анализът на представените на фиг. 2, фиг. 3, и фиг. 4 резултати от решенията на модела показва, че в началото на едностранното конвективно нагряване на дървените детайли температурата в отделните точки от дебелината

им се изменя по нарастващи криви, които след 6-тата минута от нагряването придобиват почти линеен характер.

От този момент линиите на изменение на t в отделните точки от дебелината на детайли стават почти паралелни една на друга до края на изследваната продължителност на нагряването от 14 min. Наклонът на тези линии нараства пропорционално на температурата на въздуха, нагряващ детайлите.

Достигането на температури от 30 °C и 35 °C в точка, отдалечена на 4 mm от нагряваната повърхност на детайлите, при спазено технологично ограничение да не се превишава допустимата температура от $t_{hs} = 55$ °C на тази повърхност, настъпва след продължителност на конвективното нагряване, както следва:

- при $t_{ha} = 60$ °C: съответно след 5.88 min (при $t_{hs} = 35.0$ °C) и 11.48 min (при $t_{hs} = 39.2$ °C);
- при $t_{ha} = 80$ °C: съответно след 3,15 min (при $t_{hs} = 38.0$ °C) и 5.98 min (при $t_{hs} = 42,3$ °C);
- при $t_{ha} = 100$ °C: съответно след 2,17 min (при $t_{hs} = 40,7$ °C) и 3.92 min (при $t_{hs} = 45,2$ °C).

Заклучение

В статията са показани и анализирани диаграми на 1D нестационарно разпределение на температурата по дебелината на подложени на едностранно конвективно нагряване плоски дървени детайли с цел подобряване на топлинните условия за последващото им лакиране. Диаграмите са построени по резултати, изчислени с помощта на математичен модел, който е представен в статията.

В качеството на пример за използване на модела е изчислено, визуализирано и анализирано едномерното разпределение на температурата по дебелината на плоски дъбови детайли с дебелина 16 mm, широчина 0,6 m, начална температура 20 °C и съдържание на вода 0,08 kg.kg⁻¹ по време на едностранното им конвективно нагряване в продължение на 14 min с циркулиращ

над тях със скорост $v = 3,0$ m.s⁻¹ нагрят въздух с температура $t_{ha} = 60$ °C, $t_{ha} = 80$ °C и $t_{ha} = 100$ °C, при температура на въздуха откъм ненагряваната им повърхност $t_a = 20$ °C.

Компютърните решения на математичния модел могат да се използват за визуализиране и технологичен анализ на изменението на температурата по дебелината на детайли от различни дървесни видове, с различна дебелина, широчина, дължина и съдържание на вода по време на едностранното им конвективно нагряване с различна температура и скорост на въздуха преди последващото им лакиране.

Моделът може да се прилага и при моделно базирано автоматично управление [6] на процеса на едностранно конвективно нагряване на дървени детайли чрез въвеждането му в софтуера на използваните за такова управление програмируеми контролери.

Литература

1. Виделов, X. (2010). *Сушене и топлинно обработване на дървесината*. ЛТУ, София.
2. Делийски, Н. (2003). *Моделиране и технологии за пропарване на дървени материали в автоклави*. Дисертация за дтн, ЛТУ, София.
3. Делийски, Н., Дзуренда, Л. (2010). *Моделиране на топлинни процеси в технологиите за обработване на дървесина*. Изд. "Авангард Прима", София.
4. Кавалов, А., Ангелски, Д. (2014). *Технология на мебелите*. ЛТУ.
5. Телегин, А. С., Швыдкий, В. С., Ярошенко, Ю. Г. (2002). *Тепломассоперенос*. Академкнига, Москва.
6. Хаджийски, М. (2013). *Развитие на функциите и структурата в съвременната индустриална автоматика*. сп. „Автоматика и информатика“, № 4, 7–14 САИ, София.
7. Jaic, M., Zhivanovic, R. (2000). *Povrsivska obrada drveta*. Beograd.
8. Rudiger, A. (1991). *Möbel und Innebaushau*. Rosenheim.
9. Skacic, D. (1992). *Finalna prerada drveta*. Beograd.
10. Trebula, P., Klement, I. (2002). *Drying and hydrothermal treatment of wood*. TU Zvolen, Slovakia (in Slovak).
11. https://www.akzonobel.com/wood/ee/system/images/AkzoNobel_Industrial_Finish-ing_Wood_Facts_and_Figures_tcm125-34902.pdf.

DETERMINATION OF THE TIME NEEDED FOR CONVECTIVE HEATING OF FLAT OAK DETAILS BEFORE THEIR SUBSEQUENT LACQUERING

Nencho Deliiski, Diamitar Angelski, Neno Trichkov, Zhivko Gochev
University of Forestry, Sofia, Bulgaria

Abstract

Based on the differential equation of the thermo-conductivity, a linear model of the unilateral heating process by circulated hot air of flat furniture details before their lacquering has been suggested. A software program has been prepared for the solution of the model in the calculation environment of Visual Fortran. Using the program, computations have been carried out for the determination of the 1D temperature distribution along the thickness of flat oak details with an initial temperature of 20 °C, moisture content of 0,08 kg.kg⁻¹, and thickness of 16 mm during their 14 min heating by air with temperatures of 60 °C, 80 °C, 100 °C and velocity of 3 m.s⁻¹.