Изчисляване на енергийния разход и КПД на бетонни ями при проваряване на трупи за производството на фурнир

Н. Делийски[1], Л. Дзуренда[2], Д. Ангелски[1], П. Вичев[1], К. Атанасова[1]

Computation of Energy Consumption and Efficiency of Concrete Pits during Boiling of Logs for Veneer Production

N. Deliiski[1], L. Dzurenda[2], D. Angelski[1], P. Vitchev[1], K. Atanasova[1]

[1] *University of Forestry, 10 Blvd. Kliment Ohridski Blvd., 1797 Sofia, Bulgaria, deliiski@netbg.com, d.angelski@gmail.com, p_vitchev@abv.bg, k_atanasova@ltu.bg*

[2] *Katedra Obrabanie dreva, Drevárska fakulta, Technical University in Zvolen, 24 T. G. Masaryka, 960 53 Zvolen, Slovakia, e-mail: dzurenda@tuzvo.sk*

Key Words: *Concrete pits; non-frozen logs; boiling; energy consumption; energy efficiency; veneer production.*

Abstract. *An approach for computing the energy consumption and energy efficiency of pits during boiling of non-frozen logs intended for veneer production has been presented. The approach is based on the use of two personal mathematical models: 1D non-linear model of the unsteady distribution of the temperature along the radius in the central cross section of non-frozen logs subjected to boiling at conductive boundary conditions, and model of the thermal balance of concrete pits during boiling of wood materials in them. For numerical solving of the models and practical application of the suggested approach, a software packages were prepared in the calculation environment of Visual FORTRAN Professional and in Excel respectively. With the help of the first model, the boiling times of beech logs with a diameter of 0.4 m, initial temperature of 0, 10, and 20 °C and moisture content of 0.6 kg·kg^{-1} were determined at water temperatures in the pit equal to 70, 80, and 90 °C. Using the determined logs' boiling durations, with the help of the second model the change in energy required for the entire boiling process and that for each of the components of the thermal balance was calculated. Computer simulations were performed for a well-insulated concrete pit with working volume of 20 m^3 and degree of filling it with logs 45%, 60%, and 75%. It was found that the energy consumption of the pit decreases from 159.7 to 145.3 kWh·m^{-3} when the initial temperature of the logs increases from 0 °C to 20 °C at temperature of the boiling water of 80 °C and maximum possible degree of feeling of 75%. In this case, the thermal efficiency of the pit decreases from 32.2% to 26.1%. It was found also that at the same degree of feeling of the pit the increase in the boiling water temperature from 70 °C to 90 °C causes an increase in the energy consumption of the pit from 135.3 to 170.9 kWh·m^{-3} when the initial temperature of the logs is equal to 10 °C. Under these conditions the thermal efficiency of the pit decreases from 29.9% to 28.8%. The approach can be applied to compute the energy consumption and thermal balances of concrete pits during boiling of non-frozen logs to any desired final average mass temperature required for the mechanical processing of the plasticized wood. It could be easily modified and used to calculate the energy consumption and efficiency of concrete pits of any design and construction parameters.*

1. Увод

Известно е, че проваряването на дървесина представлява технологичен процес, в който дървени материали с висока влажност се нагряват в гореща вода и техните механични и отчасти химични свойства се променят [1,7,13,16,17,19,21,24]. Като правило проваряването се осъществява в бетонни ями, чийто горен край се намира малко над или на нивото на земната повърхност с оглед облекчаване на обслужването и зареждането им с материали [11,14,18,20,23].

Топлинното обработване на трупи в проваряващи ями се извършва с цел пластифицирането им и получаването от тях на качествен фурнир при понижени енергийни разходи по време на производството му чрез рязане или развиване на трупите [1,4,10,12,21].

Правилно и ефективно управление на процеса на проваряване на трупи е възможно, само когато влиянието и тежестта на няколко десетки фактори върху подложените на проваряване дървени материали и оборудването са взети под внимание.

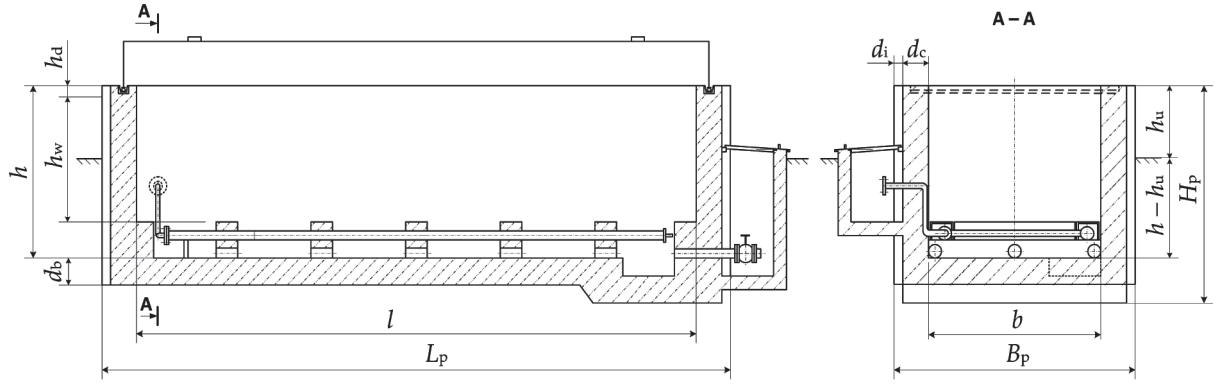
Оценяването на въздействието на толкова много фактори върху температурното поле в нагряваните тру-

пи и върху енергийната консумация на проваряващите ями е сложна задача и нейното решаване е възможно само с помощта на адекватни математични модели.

В специализираната литература има малко публикации, посветени на енергийната консумация на проваряващи ями. Единствено в [7,8] е предложен математичен модел на топлинния баланс на показаната на *фиг. 1* бетонна яма за случая на проваряване в нея на несъдържащи лед дървени призми, предназначени за производството на фурнир.

При изчисляване с този модел на баланса на ямата при проваряване в нея на букови призми с размери на напречното сечение 0.4 × 0.4 m, съдържание на вода 0.8 kg·kg^{-1} и начална температура 10 °C при температура на водата 80 °C до достигане на 70 °C в центъра на призмите е установен специфичен енергиен разход на ямата, равен на 634.315 MJ·m^{-3}.

Цел на настоящата работа е предложеният в [7,8] модел да се ъпдейтва, т.е. да се доразвие, прецизира и представи в системата СИ и с него да се изследва топлинният баланс и КПД на същата яма при проваряване в нея при различни индустриални условия на предназначени за производството на фурнир несъдържащи лед букови трупи.



Фиг. 1. Надлъжно и напречно сечение на ямата, използвана при компютърните симулации на проваряване на трупи

2. Методология на изследването

2.1. Основни параметри на яма, в която се проваряват дървени материали

Компютърните симулации с ъпдейтвания модел са извършени върху топлинния баланс на показаната на *фиг. 1* яма, имаща следните габаритни размери: дължина L_p = 7.4 m, широчина B_p = 2.8 m и дълбочина H_p = 2.5 m.

Означението, размерността и стойностите на другите показани на *фиг. 1* параметри на ямата са дадени в *табл. 1.* В нея са нанесени и променливи, участващи в уравненията на моделите на отделните компоненти на топлинния баланс на ямата, който е представен по-долу.

Частта от дълбочината на ямата, означена на *фиг. 1* с h_u, се намира над земната повърхност, а останалата част – под нея.

Бетонните стени и дъното на ямата са с дебелина съответно d_c и d_b, те са армирани и хидроизолирани, а стените са снабдени и с топлоизолационен слой с дебелина d_i.

По време на проваряването ямата се покрива с добре топлоизолиран метален капак.

Долните ръбове на капака се разполагат в канал, който е оформен в горния край на стените на ямата. Този канал се запълва с вода и по такъв начин се формира добро водно уплътнение на капака.

Нагряването на водата в ямата до желаната технологично целесъобразна температура за конкретните дървесни видове се осъществява индиректно с помощта на метален калорифер, който е разположен в долния край на ямата. В калорифера се подава водна пара или гореща вода с температура 120–140 °C.

2.2. Моделиране на 1D разпределение на температурата по радиуса на трупите при проваряването им

Когато дължината на трупите L е поне 4-5 пъти по-голяма от диаметъра им D, тогава за изчисляване на нестационарното температурно поле по радиуса на трупите в централното им напречно сечение по време на проваряването може да се използва следният нелинеен 1D математичен модел [2,3,4]:

$$(1)\quad c_{\mathrm{w}} \cdot \rho_{\mathrm{w}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \mathrm{div}\ (\lambda_{\mathrm{wr}} \mathrm{grad}\ T)$$

с начално условие

$$(2)\quad T(r,0) = T_{\mathrm{w0}}$$

и следното кондуктивно гранично условие:

$$(3)\quad T(0,\tau) = T_{\mathrm{m}}(\tau)$$

където c_w е специфичният топлинен капацитет на дървесината на трупите по време на проваряването им, $J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}$; λ_{wr} – коефициент на топлопроводност на трупите в радиално направление, $W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}$; ρ_w – плътност на

дървесината, $kg \cdot m^{-3}$; r – координата на отделните точки на изчислителната мрежа по радиуса на трупа при числено решаване на модела (1)–(3), m; T – температура, K; T_{w0} – начална средномасова температура на подложените на проваряване трупи, K; T_m – температура на проваряващата вода в ямата, K; τ – време, s.

Табл. 1. Основни параметри на бетонната яма, използвани при решаването на модела на топлинния ѝ баланс

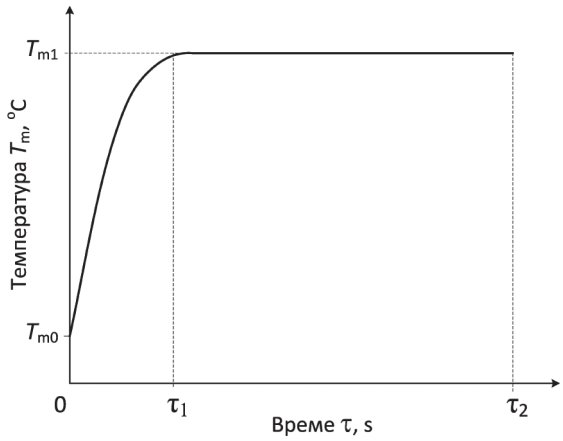
№	Наименование на параметъра	Означение	Размерност	Стойност
1.	Дължина на работното пространство на ямата	l	m	6.6
2.	Широчина на работното пространство на ямата	b	m	2.0
3.	Дълбочина на работното пространство на ямата	h_w	m	1.52
4.	Дълбочина на стените на ямата	h	m	2.0
5.	Дълбочина на надземната част на ямата	h_u	m	0.8
6.	Работен обем на ямата, равен на $l \cdot b \cdot h_w$	V_{pit}	m^3	20
7.	Дебелина на бетонните стени и под на ямата	d_c, d_b	m	0.3
8.	Дебелина на изолационния слой на стените и на капака на ямата	d_i, $d_{i\text{-}lid}$	m	0.1
9.	Дебелина на стоманените листове на капака на ямата	d_{Fe}	m	0.004
10.	Разстояние на дренажния канал на ямата спрямо горния край на стените ѝ	d_d	m	0.13
11.	Плътност на бетонните стени и дъното на ямата	ρ_c	$kg \cdot m^{-3}$	2300
12.	Плътност на изолационните слоеве на стените и капака на ямата	ρ_i, $\rho_{i\text{-}lid}$	$kg \cdot m^{-3}$	350
13.	Плътност на стоманените листове на капака на ямата	ρ_{Fe}	$kg \cdot m^{-3}$	7850
14.	Начална температура на бетонните стени и дъно на ямата	t_{cu0}, t_{cg0}, t_{bg0}	°C	10
15.	Начална температура на изолацията на ямата и почвата до нея	t_{iu0}, t_{ig0}, t_{s0}	°C	10
16.	Специфичен топлинен капацитет на бетона	c_c	$J \cdot kg^{-1} \cdot K$	1134
17.	Специфичен топлинен капацитет на изолационния материал на стените и капака на ямата	c_i, $c_{i\text{-}lid}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K$	850
18.	Специфичен топлинен капацитет на стоманените листове на капака	c_{Fe}	$J \cdot kg^{-1} \cdot K$	444
19.	Коефициент на топлопроводност на бетона	λ_c	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	1.28
20.	Коефициент на топлопроводност на изолационния материал на стените на ямата	λ_i	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.042
21.	Коефициент на топлопроводност на пясъчно-глинестата почва, контактуваща със стените и дъното на ямата	λ_s	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	1.4
22.	Специфична маса на 1 m^2 от нагревателните елементи на калорифера на ямата, разположен над дъното ѝ	m_{he}	$kg \cdot m^{-2}$	100
23.	Температура на топлоносителя, захранващ калорифера на ямата	t_{hc}	°C	130
24.	Температура на въздуха, заобикалящ надземната част на ямата, в т.ч. и капака ѝ	t_{air}	°C	10
25.	Степен на запълване на ямата с трупи за проваряване	f	%	45, 60, 75

Математични описания на c_w и λ_{wr} са направени в [2,3,4,6] въз основа на експериментално установени в дисертациите на чужди автори зависимости на тези топлинни свойства като функции на температурата и съдържанието на вода в дървесината.

2.3. Математично описание на температурата на проваряващата вода

На *фиг. 2* е показано изменението на температурата T_m на водата в ямата при обичайно прилаганите в практиката режими за проваряване на дървени материали. Тези режими се състоят от две степени, по време на които T_m се изменя по следния начин:

▪ По време на първата степен в течение на времето от 0 до τ_1 се осъществява повишаване на T_m от началната ѝ стойност T_{m0} до достигане на максималната за даден режим стойност T_{m1}. Това се извършва чрез изцяло или частично отваряне на вентила за подаване на пара или гореща вода под налягане в калорифера на ямата, осигуряващ индиректно нагряване на проваряващата вода.



Фиг. 2. Изменение на температурата на водата в ямата в режимите за проваряване на дървени материали

Повишаването на T_m от T_{m0} до T_{m1} се описва с уравнението [2,5,9]

$$(4)\quad T_{\mathrm{m}}^{n} = T_{\mathrm{m1}} - \left(T_{\mathrm{m1}} - T_{\mathrm{m0}}\right)\exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\mathrm{e}}}\right)$$

at $0 \le \tau \le \tau_1$,

където T_m^n е текущата стойност на температурата на водата по време на първата степен на режима, K; τ – текуща стойност на времето на в режима за проваряване, равно на $n{\cdot}\Delta\tau$, s; n – текущ номер на стъпката по времевата координата $\Delta\tau$, с която се решава моделът (1)–(3): $n = 0, 1, 2, 3, \ldots, \tau_2/\Delta\tau$; τ_2 – продължителност на режима за проваряване, s; τ_{e1} – времеконстанта на експоненциалното повишаване на T_m в първата степен на режима, s.

▪ По време на втората степен на режима в течение на времето от τ_1 до τ_2 се подава дозирано количество топлоносител към калорифера на ямата. По този начин се поддържа неизменна стойност на T_m, равна на максималната технологично целесъобразна за конкретния дървесен вид стойност T_{m1}. В края τ_2 на режима подложените на проваряване трупи достигат оптимална температура, която е изискуема за тяхното последващо механично обработване.

Математически режимната температура T_{m1} във втората степен се описва с уравнението

$$(5)\quad T_{\mathrm{m}}^{n} = T_{\mathrm{m1}} \text{ at } \tau_1 < \tau \le \tau_2.$$

Продължителността на втората степен на режима се определя от изпълнението на определено технологично условие, което най-често се свързва с достигането на желана степен на нагряване и пластифициране на дървесината в ямата.

Например подложените на проваряване трупи, предназначени за производството на фурнир, в края на втората степен на режима, т.е. в момента τ_2 трябва да достигнат минимално изискуемата температура $T_{wc\text{-}min}$ в техния център в зависимост от плътността на конкретния дървесен вид [2,6,15]. Това ще осигури необходимата пластичност на трупите за получаването от тях на качествен фурнир.

Следователно времето τ_2 в режима за проваряване на трупите се определя, когато се изпълнят следните условия:

$$(6)\quad \tau = \tau_2 \text{ при } T_{\mathrm{m}} = T_{\mathrm{m1}} \,\&\, T_{\mathrm{wc}} = T_{\mathrm{wc\text{-}min}}.$$

При решаването на модела (1)–(3) се изчислява нестационарното изменение на температурата по радиуса на централното напречно сечение на трупите и моментът на достигане на изискуемата температура в центъра им $T_{wc\text{-}min}$ определя продължителността на проваряване на трупите τ_2.

Симулационното изследване в настоящата работа е извършено върху енергийния разход и КПД на показаната на *фиг. 1* бетонна яма при проваряване в нея на несъдържащи лед букови (*Fagus sylvatica L.*) трупи, използвани често за производство на фурнир.

Означенията, размерността и стойностите на основни параметри на трупите и на горещата вода, които участват в някои от представените по-долу математични модели на компонентите на топлинния баланс на ямата, са дадени в *табл. 2.* В нея са нанесени също и основни параметри, които са използвани при решаването на уравнения (1)–(6).

2.4. Модели на топлинния баланс на ямата и на компонентите му

Топлинният баланс на ямата при проваряване в нея на трупи може да се опише със следния математичен модел [7,8]:

$$(7)\quad Q_{\text{Pit-boil}} = Q_{\text{Wood}} + Q_{\text{Constr.}} + Q_{\text{Water}} + Q_{\text{Calorif.}} + Q_{\text{Losses.}},$$

където $Q_{Pit\text{-}boil}$ е специфичният (спрямо 1 m^3 дървесина) сумарен разход на топлинна енергия, който е необходим за провеждане на целия процес на проваряване на трупите, $kWh{\cdot}m^{-3}$.

Значението на индексите на променливите в уравнение (7) е следното: Wood – дървесина; Constr. – конструктивни елементи на ямата; Water – вода в ямата; Calorif. – калорифер в ямата; Losses – топлинни загуби на ямата по време на проваряването на трупите.

2.4.1. Математичен модел на Q_{Wood}

При изчисляване на разхода на енергия Q_{Wood}, който е необходим за нагряване на подложените на проваряване трупи, е подходящо да се използва известният в термодинамиката подход, че специфичният енергиен разход Q за нагряване на 1 m^3 от твърдо тяло с начална температура T_0 до температура T_1 може да бъде определен по уравнението [1,22]

$$(8)\quad Q = \frac{\rho \cdot c \cdot \left(T_1 - T_0\right)}{3.6 \cdot 10^6},$$

където Q е специфичният разход на енергия, $kWh{\cdot}m^{-3}$; ρ – плътност на материала на тялото, $kg{\cdot}m^{-3}$; c – спе-

цифичен топлинен капацитет на материала на тялото, $J{\cdot}kg\text{-}1{\cdot}K^{-1}$.

Множителят $3.6{\cdot}10^6$ в знаменателя на (8) осигурява получаване на изчислените стойности на Q в $kWh{\cdot}m^{-3}$, вместо в $J{\cdot}m^{-3}$.

Табл. 2. Основни параметри на буковите трупи и проваряващата вода, използвани при решаването на моделите

№	Наименование на параметъра	Означение	Размерност	Стойност
1.	Диаметър на трупите, подлагани на проваряване	D	m	0.4
2.	в ямата	L	m	3.0
3.	Дължина на проваряваните трупи	V_w	m^3	15, 12, 9
4.	Обем на заредените за проваряване трупи, равен	u	$kg{\cdot}kg^{-1}$	0.6
5.	на $f{\cdot}V_{pit}$	$u_{fsp\text{-}293.15}$	$kg{\cdot}kg^{-1}$	0.31
	Съдържание на вода в трупите			
6.	Стандартизирана граница на хигроскопичността	ρ_b	$kg{\cdot}m^{-3}$	560
7.	на бука при 293.15 K (т.е. при 20 °C)	ρ_{H2O}	$kg{\cdot}m^{-3}$	998
8.	Базисна плътност на буковата дървесина	c_{H2O}	$J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K$	4180
9.	Плътност на проваряващата вода в ямата	t_{w0}	°C	0*a*, 10*b*, 20*c*
	Специфичен топлинен капацитет на водата в ямата			
10.	Начална средномасова температура на трупите	$t_{wc\text{-}min}$	°C	62
	(*a* – при t_{w0} = 0 °C; *b* – при t_{w0} = 10 °C, *c* – при t_{w0} = 20			
11.	°C)	t_{m0}, $t_{H2O\text{-}beg}$	°C	10
12.	Минимано изискуема температура в центъра	t_{m1}, t_{cs1}, t_{H2O}	°C	70*m*, 80*n*, 90*o*
	на трупите в края τ_2 на режимите им за проваряване			
	Начална температура на проваряващата вода в ямата	τ_1		
13.	Максимална температура на проваряващата вода	$\tau_2 = \tau_{boil}$	h	4.0
14.	и на стените на ямата, контактуващи с нея		h	21*a*, 20*b*, 18.5*c*
	(*m* – при t_{m1}=70 °C; *n* – при t_{m1}=80 °C, *o* – при t_{m1}= 90	$\tau_2 = \tau_{boil}$		
15.	°C)		h	34*m*, 26*n*, 22*o*
	Продължителност на повишаване на t_m от t_{m0} до t_{m1}	$t_{avg\text{-}end}$		
16.	Продължителност на режимите за проваряване на		°C	72.8*a*,*b*,*c*
	трупите в ямата при t_{m1} = 80 °C в зависимост от t_{w0}			66.9*m*
	Продължителност на режимите за проваряване на			72.8*n*
	трупи с t_{w0} = 10 °C в зависимост от t_{m1}			79.0*o*
	Средномасова температура на трупите в края τ_2 на			
	режимите им на проваряване в зависимост от t_{w0} и t_{m1}			

Изхождайки от уравнение (8), специфичният разход на топлинна енергия Q_{Wood}, който е необходим за нагряване само на подложените на проваряване трупи, може да се определи с помощта на следното уравнение [2,3]:

$$Q_{\text{Wood}} = \frac{\rho_w}{3.6.10^6};$$

$$(9)\quad \frac{c_w \text{ at } T = 272.15 \text{ K} + c_w \text{ at } T = T_{\text{avg-end}}}{2}.$$

$$\left(T_{\text{avg-end}} - 272.15\right)$$

където [1,2,6,9]

$$(10)\quad \rho_w = \rho_b \cdot (1+u)$$

$$c_w = \frac{1}{1+u}.$$

$$(11)\quad (2862u + 2.95T + 5.49u \cdot T +$$

$$0.0036T^2 + 555)$$

$$(12)\quad T_{\text{avg}}^n = \frac{1}{\frac{D}{2}} \int_{\frac{D}{2}} T(r, n \cdot \Delta\tau)\mathrm{d}D.$$

Стойностите на променливите D, u, ρ_b, $t_{w0} = T_{w0} - 273.15$, $t_{avg\text{-}end} = T_{avg\text{-}end} - 273.15$ и τ_2, които участват в уравнения (9)–(12) и са използвани при компютърните симулации, са дадени в *табл. 2*. Останалите променливи в тези уравнения означават следното: ρ_w – плътност на дървесината в надхигроскопичния диапазон, $kg{\cdot}m^{-3}$; T_{avg} – средномасова температура на трупите, K; r – радиална координата при решаването на модела (1)–(3); $\Delta\tau$ – стъпка по времевата координата, s; n – текущ номер на стъпката по времевата координата.

2.4.2. Математичен модел на $Q_{Constr.}$

Специфичният разход на енергия $Q_{Constr.}$, който е необходим за нагряване на конструктивните елементи на проваряващата яма, може да се изрази чрез следния модел:

$$(13)\quad Q_{\text{Constr.}} = Q_{\text{Constr.1}} + Q_{\text{Constr.2}} + Q_{\text{Constr.3}} + Q_{\text{Constr.4}}$$

където $Q_{Constr.1}$ и $Q_{Constr.2}$ са енергиите, необходими за нагряване на стените съответно на надземната и подземната

част на ямата; $Q_{Constr.3}$ и $Q_{Constr.4}$ – енергиите, необходими за нагряване съответно на дъното и на капака на ямата.

В [7,8] са дадени уравнения за изчисляване на $Q_{Constr.1}$, $Q_{Constr.2}$, $Q_{Constr.3}$ и $Q_{Constr.4}$ в зависимост от специфицирани там конструктивни и топлофизични влияещи им фактори, а именно: $Q_{Constr.1}$ като функция на 16 фактора; $Q_{Constr.2}$ – на 17 фактора; $Q_{Constr.3}$ – на 10 фактора и $Q_{Constr.4}$ – на 12 фактора. В *табл. 1* са посочени общо 19 от влияещите фактори.

2.4.3. Математичен модел на Q_{Water}

Специфичният разход на енергия Q_{Water}, който е необходим за нагряване на водата в проваряващата яма, може да се представи чрез следния модел:

$$Q_{\mathrm{Water}} = \frac{1}{3.6\cdot 10^{6}\cdot V_{\mathrm{w}}}\cdot \left[\left(l\cdot b\cdot\left(h_{\mathrm{w}}-h_{\mathrm{d}}\right)-V_{\mathrm{w}}\right)\right]\cdot \rho_{\mathrm{H2O}}\cdot c_{\mathrm{H_2O}}\cdot\left(t_{\mathrm{H_2O}}-t_{\mathrm{H_2O-beg}}\right) \quad (14)$$

Използваните при компютърните симулации стойности на всички променливи в уравнение (14) са дадени в *табл. 1* и *табл. 2*.

2.4.4. Математичен модел на $Q_{Calorif.}$

Специфичният разход на енергия $Q_{Calorif.}$, който е необходим за нагряване на самия метален калорифер на ямата, може да се изрази чрез следния модел:

$$Q_{\mathrm{Calorif.}} = \frac{1}{3.6\cdot 10^{6}\cdot V_{\mathrm{w}}}\cdot \left[l\cdot b\cdot m_{\mathrm{he}}\cdot c_{\mathrm{Fe}}\cdot\left(t_{\mathrm{hc}}-t_{\mathrm{H2O-beg}}\right)\right] \quad (15)$$

Използваните при симулациите стойности на променливите в уравнение (15) са дадени в *табл. 1* и *табл. 2.*

2.4.5. Математичен модел на Q_{Losses}

Специфичният разход на енергия Q_{Losses}, който е необходим за покриване на топлинните загуби на ямата, може да се изрази чрез следния модел:

$$Q_{\mathrm{Losses}} = Q_{\mathrm{Losses1}} + Q_{\mathrm{Losses2}} + Q_{\mathrm{Losses3}} + Q_{\mathrm{Losses4}}, \quad (16)$$

където $Q_{Losses1}$ и $Q_{Losses2}$ са енергиите, необходими за покриване на загубите, обусловени от топлинната емисия съответно на надземната и подземната части на стените на ямата; $Q_{Losses3}$ и $Q_{Losses4}$ – енергиите, необходими за покриване на топлинните загуби, предизвикани от емисията съответно на дъното и капака на ямата.

В [7,8] са дадени уравнения за изчисляване на $Q_{Losses1}$, $Q_{Losses2}$, $Q_{Losses3}$ и $Q_{Losses4}$ в зависимост от специфицирани там конструктивни и топло-физични влияещи им фактори, а именно: $Q_{Losses1}$ като функция на 14 фактора; $Q_{Losses2}$ – на 15 фактора; $Q_{Losses3}$ – на 11 фактора и $Q_{Losses4}$ – на 8 фактора. В *табл. 1* са посочени общо осем от влияещите фактори.

2.4.5. Изчисляване на КПД на ямата

Кофициентът на полезно действие на изследваната яма при проваряване в нея на букови трупи с различна начална температура t_{w0} в условията на различни режимни температури t_{m1} на горещата вода и различна степен на запълване f на ямата с трупи се изчислява (в %) по следното уравнение:

$$\eta_{\mathrm{Pit-boil}} = 100\frac{Q_{\mathrm{Wood}}}{Q_{\mathrm{Pit-boil}}}, \quad (17)$$

където Q_{Wood} е изчисленият по уравнение (9) разход на енергия Q_{Wood}, който е необходим за нагряване само на подложените на проваряване трупи, $kWh\cdot m^{-3}$; $Q_{Pit\text{-}boil} = Q_{Pit\text{-}total}$ – изчисленият по уравнение (7) сумарен разход на енергия, който е необходим за осъществяване на целия процес на проваряване на трупите, $kWh\cdot m^{-3}$.

2.5. Решаване на моделите (1)–(3) и (7)

Математичните описания на температурата T_m на водата в ямата и на топлофизичните характеристики на дървесината са въведени в модела (1)–(3) и той е решен с помощта на собствена софтуерна програма в изчислителната платформа на Visual FORTRAN Professional.

Изчислено е изменението на Tm от началната ѝ стойност T_{m0} = 283.15 °C (т.е. t_{m0} = 10 °C) до достигане и поддържане неизменно на максималните ѝ стойности в режимите за проваряване, равни съответно на T_{m1} = 343.15 K, 353.15 K и 363.15 K (т.е. t_{m1} = 70, 80 и 90 °C). Времеконстантата в уравнение (4) е подбрана така, че експоненциалното повишаване на T_m от T_{m0} до T_{m1} да има еднаква продължителност τ_1 (*фиг. 2*) и за трите изследвани стойности на T_{m1}.

От изчисленото нестационарно изменение на температурното поле по радиуса на централното напречно сечение на трупите и в частност от момента на достигане на 62 °C в техния център е определена и отразена в *табл. 2* продължителността τ_2 на всеки от режимите за проваряване.

Стойностите на τ_2 са използвани при изчисляването на топлинните загуби на ямата с отделните уравнения на модела (16).

Изчислените по уравнение (12) стойности $T_{avg\text{-}end}$ на средномасовата температура на трупите в края на проваряването им (т.е. при $\tau = \tau_2$) са използвани за решаване на уравнение (9). Тези стойности на $T_{avg\text{-}end}$ са индикатор, че желаната степен на пластифициране на трупите е достигната и от тях може да се получи качествен фурнир.

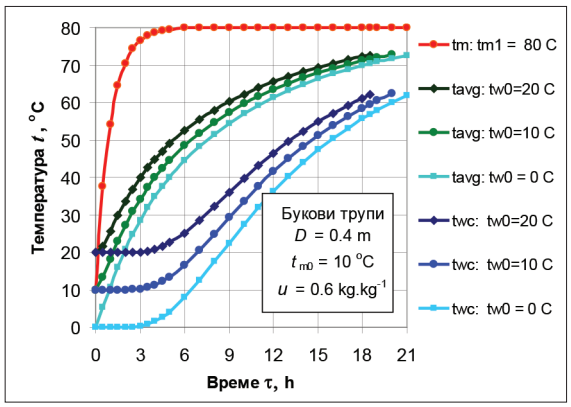
Изготвена е програма на Excel за едновременно решаване на уравненията в модела (7). С тази програма е изследван топлинният баланс на показаната на *фиг. 1* яма за случаите на проваряване в нея на несъдържащи лед букови трупи с начална температура t_{w0} = 0, 10, 20 °C и съдържание на вода 0.6 $kg\cdot kg^{-1}$ при температура на водата в ямата t_{m1} = 70, 80, 90 °C и степен на запълването ѝ с трупи f = 45, 60 и 75%.

Като основни входни данни за параметрите на ямата, на водата в нея и на подложените на проваряване букови трупи са използвани показаните в *табл. 1* и *табл. 2*.

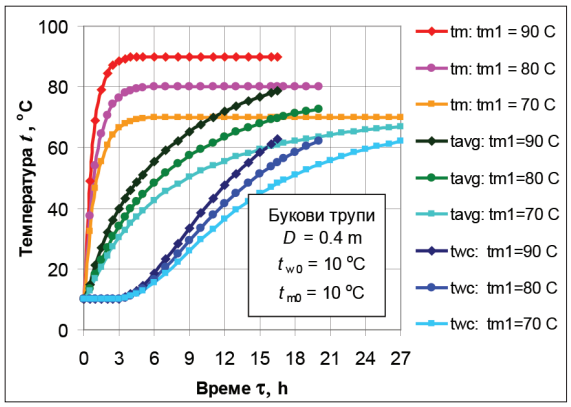
3. Резултати и анализ

3.1. Изменение на температурата в подложените на проваряване трупи

На *фиг. 3* и *фиг. 4* е представено изчисленото изменение на температурата на водата в ямата t_m, на средномасовата температура на трупите t_{avg} и на температурата t_{wc} в тяхната централна точка по време на проваряването им в зависимост съответно от t_{w0} и t_{m1}.



Фиг. 3. Изменение на t_m, t_{avg} и t_{wc} по време на проваряването на трупите в зависимост от t_{w0}



Фиг. 4. Изменение на t_m, t_{avg} и t_{wc} по време на проваряването на трупите в зависимост от t_{m1}

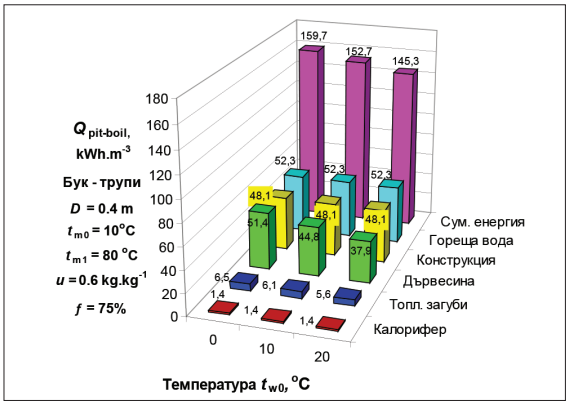
На *фиг. 3* се вижда, че процесът на проваряване на трупите с различна начална средномасова температура t_{w0} приключва след τ_2 = 21.0 *h* при t_{w0} = 0 °C, след τ_2 = 20.0 h при t_{w0} = 10 °C и след τ_2 = 18.5 *h* при t_{w0} = 20 °C. При тези продължителности на проваряването t_{wc} достига 62 °C, което съответства на минимално изискуемата температура за получаване на качествен фурнир от нагрети букови трупи [6,15]. В същото време средномасовата температура и на трите трупа достига стойност t_{avg} = 72.7 °C.

На *фиг. 4* се вижда, че процесът на проваряване на трупи с t_{w0} = 10 °C при различни температури на водата t_{m1} приключва след τ_2 = 27.0 h при t_{m1} = 70 °C, след τ_2 = 20.0 h при t_{m1} = 80 °C и след τ_2 = 16.5 h при t_{m1} = 90 °C. Тогава средномасовата температура на трупите достига следните стойности: $t_{avg\text{-}end}$ = 66.8 °C при t_{m1} = 70 °C, $t_{avg\text{-}end}$ = 72.7 °C при при t_{m1} = 80 °C и $t_{avg\text{-}end}$ = 78.6 °C при t_{m1} = 90 °C. Тези стойности на $t_{avg\text{-}end}$ са използвани при изчисляването по уравнение (9) на компонентата Q_{Wood} в топлинния баланс на ямата (7).

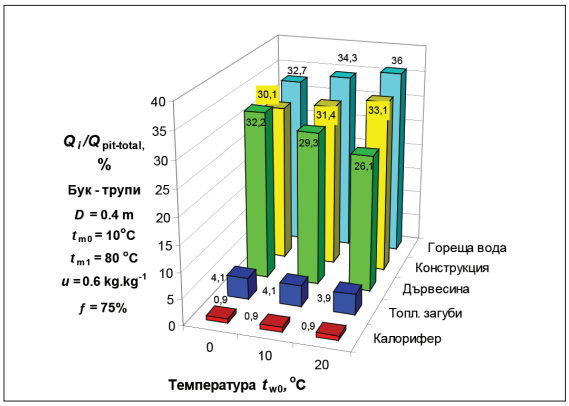
3.2. Изменение на топлинния баланс на ямата в зависимост от началната температура t_{w0} на проваряваните трупи

На *фиг. 5* е показано измененението на сумарния енергиен разход на ямата $Q_{pit\text{-}total}$ (в $kWh{\cdot}m^{-3}$), а също това на всеки от компонентите на топлинния баланс на ямата в зависимост от t_{w0} при t_{m1} = 80 °C и 75% запълване на ямата с трупи.

На *фиг. 6* е представено измененението на отделните компоненти на топлинния баланс в % спрямо енергоразхода $Q_{pit\text{-}total}$ в зависимост от t_{w0}.



Фиг. 5. Изменение на енергоразхода на ямата $Q_{pit\text{-}total}$ и на отделните му компоненти в зависимост от t_{w0}



Фиг. 6. Изменение на компонентите на топлинния баланс на ямата в % спрямо $Q_{pit\text{-}total}$ в зависимост от t_{w0}

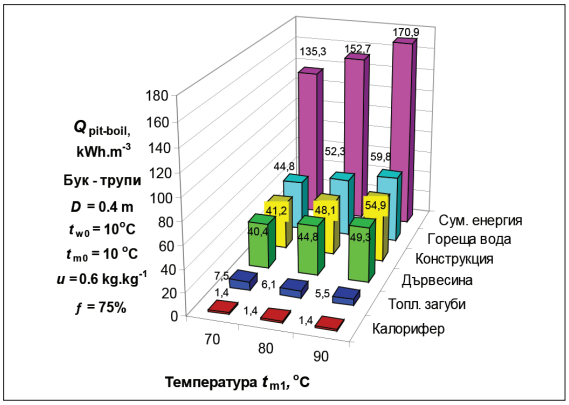
На *фиг. 5* и *фиг. 6* се вижда, че увеличаването на t_{w0} от 0 до 20 °C обуславя намаляване на енергоразхода на

ямата от 159.7 на 145.3 $kWh{\cdot}m^{-3}$, а относителният дял на отделните компоненти на топлинния ѝ баланс се променя така: Q_{Wood} и Q_{Losses} намаляват съответно от 32.2% на 26.2% и от 4.1% на 3.9%; Q_{Water} и $Q_{Constr.}$ нарастват съответно от 32.7% на 36.0% и от 30.1% на 33.1%, а $Q_{Calorif.}$ остава непроменен с участие от 0.9%.

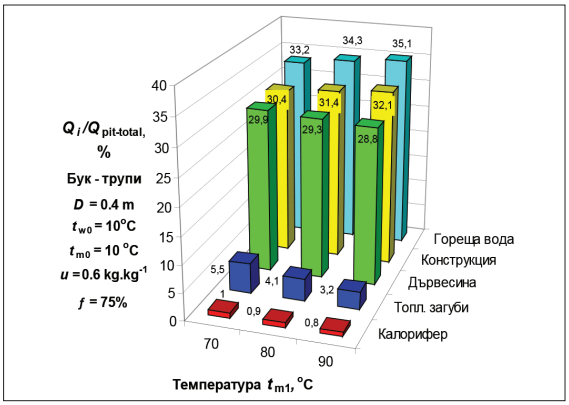
3.3. Изменение на топлинния баланс на ямата в зависимост от температурата t_{m1} на проваряващата вода

На *фиг. 7* е показано изменението на сумарния енергиен разход на ямата $Q_{pit\text{-}total}$ (в $kWh{\cdot}m^{-3}$), а също това на всеки от компонентите на топлинния баланс на ямата в зависимост от t_{m1} при t_{w0} = 10 °C и 75% запълване на ямата с трупи.

На *фиг. 8* е представено изменението на отделните компоненти на топлинния баланс в % спрямо енергоразхода $Q_{pit\text{-}total}$ в зависимост от t_{m1}.



Фиг. 7. Изменение на енергоразхода на ямата $Q_{pit\text{-}total}$ и на отделните му компоненти в зависимост от t_{m1}



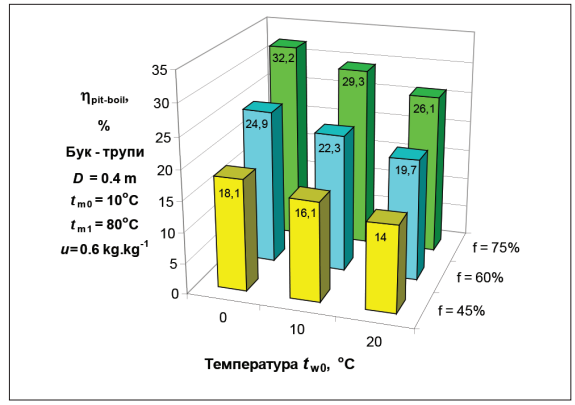
Фиг. 8. Изменение на компонентите на топлинния баланс на ямата в % спрямо $Q_{pit\text{-}total}$ в зависимост от t_{m1}

На *фиг. 7* и *фиг. 8* се вижда, че увеличаването на t_{m1} от 70 до 90 °C предизвиква повишаване на енергоразхода на ямата от 135.3 на 170.9 $kWh{\cdot}m^{-3}$, а относителният дял на отделните компоненти в топлинния ѝ баланс се изменя така: Q_{Water} и $Q_{Constr.}$ нарастват съответно от 32.3% на 35.1% и от 30.4% на 32.1%, а Q_{Wood}, Q_{Losses} и $Q_{Calorif}$ намаляват съответно от 29.9% на 28.8%, от 5.5% на 3.2% и от 1.0% на 0.8%.

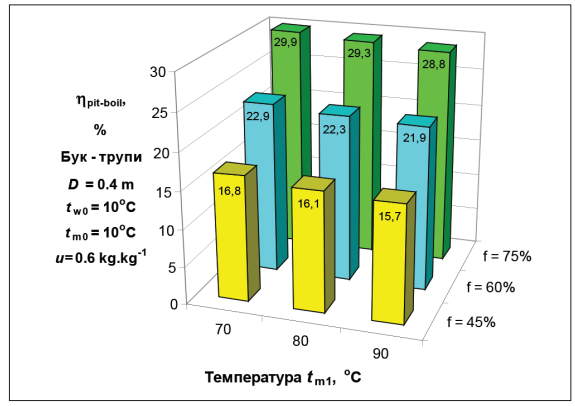
3.4. Изменение на КПД на проваряващата яма $\eta_{pit\text{-}boil}$

На *фиг. 9* е показано изменението на КПД на изследваната яма $\eta_{pit\text{-}boil}$ в зависимост от началната температура t_{w0} на проваряваните при t_{m1} = 80 °C трупи и от степента *f* на запълване на ямата с дървесина.

На *фиг. 10* е показано изменението на $\eta_{pit\text{-}boil}$ в зависимост от температурата на водата в ямата t_{m1} и от степента *f* на запълването ѝ с трупи, имащи начална температура t_{w0} = 10 °C.



Фиг. 9. Изменение на КПД на проваряващата яма в зависимост от t_{w0} и *f*



Фиг. 10. Изменение на КПД на проваряващата яма в зависимост от t_{m1} и *f*

На *фиг. 9* и *фиг. 10* се вижда, че повишаването както на t_{w0}, така и на t_{m1} обуславя понижаване на коефициента на полезно действие на проваряващата яма, както следва:

- Повишаването на t_{w0} от 0 до 20 °C предизвиква понижаване на $\eta_{pit\text{-}boil}$ с 4.1% при *f* = 45%, с 5.2% при *f* = 60% и с 6.1% при *f* = 75%;
- Повишаването на t_{m1} от 70 до 90 °C предизвиква понижаване на $\eta_{pit\text{-}boil}$ с 1.1% при *f* = 45%, с 1.0% при *f* = 60% и с 1.1% при *f* = 75%.

Значително по-голямо е влиянието на степента на запълване на ямата с трупи за проваряване върху КПД на ямата, като при намаляване на f от 75% на 45% стойностите на коефициента $\eta_{pit\text{-}boil}$ намаляват по следния начин:

- от 32.2 на 18.1% при t_{w0} = 0 °C, от 29.3 на 16.1% при t_{w0} = 10 °C и от 26.1 на 14.0% при t_{w0} = 20 °C;
- от 29.9 на 16.8% при t_{m1} = 70 °C, от 29.3 на 16.1% при t_{m1} = 80 °C и от 28.8 на 15.7% при t_{m1} = 90 °C.

Причина за това значително влияние на f върху $\eta_{pit\text{-}boil}$ е силното нарастване на относителния дял на разхода на енергия за нагряване на водата Q_{Water} в топлинния баланс на ямата при намаляването на f, което предизвиква съответното значително намаляване на дела на Q_{Wood} в този баланс, а оттам и на $\eta_{pit\text{-}boil}$.

4. Заключение

В настоящия труд е представена методология за изчисляване на енергоразхода и топлинния баланс и КПД на бетонни ями при проваряване в тях на несъдържащи лед трупи, предназначени за производството на фурнир.

Методологията се базира на използването на два собствени математични модела: 1D нелинеен модел на разпределението на температурата по радиуса в централното напречно сечение на трупите по време на топлинното им обработване при кондуктивни гранични условия и модел на топлинния баланс на бетонни ями при проваряването в тях на дървени материали.

За числено решаване на първия модел и практическо прилагане на методологията е изготвен софтуерен пакет в изчислителната среда на Visual FORTRAN Professional. Изготвена е също софтуерна програма в Excel за едновременно взаимносвързано решаване на множеството уравнения в модела на топлинния баланс. С помощта на първия модел е определена продължителността на режимите за проваряване на букови трупи с диаметър 0.4 m, начална температура 0, 10 и 20 °C и съдържание на вода 0.6 $kg{\cdot}kg^{-1}$ при температура на водата в ямата 70, 80 и 90 °C.

Използвайки определената продължителност на режимите, с помощта на втория модел е изчислен топлинният баланс на бетонна яма с работен обем 20 m^3 при степен на запълване 45, 60 и 75% с трупи, подлежащи на проваряване с цел пластифициране за производството на фурнир. Определен е енергийният разход и КПД на цялата яма, а също разходът за всеки от петте компонента на топлинния ѝ баланс във функция от влияещите общо над 40 фактора.

Установено е, че енергийната консумация на ямата се намалява от 159.7 на 145.3 $kWh{\cdot}m^{-3}$, когато началната температура на трупите се повиши от 0 °C на 20 °C, а пластифицирането им се извършва при температура на проваряващата вода 80 °C и максимално възможна в практиката степен на запълване на ямата с трупи 75%. Установено е също, че повишаването на температурата на водата в ямата от 70 на 90 °C при начална температура на трупите 10 °C и същата степен на запълване 75% предизвиква увеличаване на енергийния разход на ямата от 135.3 на 170.9 $kWh{\cdot}m^{-3}$.

И в двата разглеждани случая КПД на ямата се понижава – в първия случай от 32.2% на 26.1% и във втория случай – от 29.9% на 28.8%.

Особено силно е влиянието на степента на запълване на ямата с трупи f върху нейния КПД, като при равни други условия при намаляване на f от 75% на 45% КПД се понижава около два пъти. Причина за това е силното нарастване на относителния дял на разхода на енергия за нагряване на водата в топлинния баланс на ямата при намаляването на f, което предизвиква значително намаляване на дела на енергийния разход за нагряване на самите трупи, а оттам и на КПД на ямата. Това показва колко важно за енергийната ефективност на ямата е тя винаги да бъде добре запълвана с дървени материали.

Представената методология и получените резултати могат да се използват за изчисляване на енергийния разход, топлинния баланс и КПД на бетонни ями с различни параметри при проваряване в тях на дървени материали до всякаква желана степен на нагряване и пластифициране в производството на фурнир.

Литература

1. Chudinov, B. S. Theory of Thermal Treatment of Wood. Moscow, Nauka, 1968, 255 (in Russian).

2. Deliiski, N. Modelling and Technologies for Steaming Wood Materials in Autoclaves. Dissertation for DSc. University of Forestry, Sofia, 2003, 358 (in Bulgarian).

3. Deliiski, N. Transient Heat Conduction in Capillary Porous Bodies. In Ahsan, A. (Ed) Convection and Conduction Heat Transfer. Rieka, InTech Publishing House, 2011, 149-176.

4. Deliiski, N. Modelling of the Energy Needed for Heating of Capillary Porous Bodies in Frozen and Non-frozen States. Scholars' Press, Saarbrücken, Germany, 2013,116, http://www.scholars-press.com//system/.

5. Deliiski, N. and D. Angelski. Computing of the Processing Medium Temperature during Autoclave Steaming of Non-frozen Wooden Prisms. – *Automatica and Informatics*, 54, 2022, 3-4, 5-11 (in Bulgarian).

6. Deliiski, N. and L. Dzurenda. Modelling of the Thermal Treatment in the Technologies for Wood Processing. Sofia, University of Forestry, 2010, 299 (in Bulgarian).

7. Dzurenda, L. and N. Deliiski. Thermal Processes in the Woodworking Technologies. Technical University in Zvolen, Slovakia, 2010, 268 (in Slovak).

8. Dzurenda, L. and N. Deliiski. Mathematical Model for Calculation Standard Values for Heat Energy Consumption during Plasticization Process of Wooden Prisms by Hot Water in Pits. – *Acta Facultatis Xilologie*, 53, 2011, 2, 25-36 (in Slovak).

9. Hadjiski, M. and N. Deliiski. Advanced Control of the Wood Thermal Treatment Processing. – *Cybernetics and Information Technologies*, 16, 2016, No. 2, 179-197.

10. Hadjiski, M. and N. Deliiski. Advanced Process Control of Distributed Parameter Plants by Integration First Principle Modeling and Case-Based Reasoning. Part 2: Case-Based Reasoning Control

of DPP. Proc. of the Int. Conf. of Automatics and Informatics, John Atanasoff, Society of Automatics and Informatics, Varna, 1-3 October 2020, 6.

11. Khattabi, A. and H. P. Steinhagen. Numerical Solution to Two-Dimensional Heating of Logs. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 50, 1992, 7-8, 308-312.

12. Khattabi, A. and H. P. Steinhagen. Analysis of Transient Non-linear Heat Conduction in Wood Using Finite-difference Solutions. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 51, 1993, 4, 272-278.

13. Kollmann, F. F. and W. A. Jr. Côté. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood New York: Springer-Verlag, 1984, 592.

14. Lawniczak, M. Hydrothermal and Plasticizing Treatment of Wood. Part I. Boiling and Steaming of Wood. Poznan, Poland, Agricultural Academy, 1995, 149 (in Polish).

15. Mörath, E. Das Dämpfen und Kochen in der Furnier– und Sperrholzindustrie. – *Holztechnik*, 7, 1949.

16. Niemz, P. and W. Sonderegger. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Munich, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017, 580.

17. Niemz, P., A. Teischinger and D. Sandberg (Eds.). Springer Handbook for Wood Science and Technology. Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2023, 2069.

18. Shubin, G. S. Drying and Thermal Treatment of Wood. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 1990, 337 (in Russian).

19. Steinhagen, H. P. Computerized Finite-Difference Method to Calculate Transient Heat Conduction with Thawing. – *Wood Fiber Science*, 18, 1986, 3, 460-467.

20. Steinhagen, H. P. Heat Transfer Computation for a Long, Frozen Log Heated in Agitated Water or Steam – A Practical Recipe. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49, 1991, 7-8, 287-290.

21. Steinhagen, H. P. Veneer Block Conditioning Manual for Veneer and Plywood Production. – *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7, 2005, 1, 49-56.

22. Telegin, A. S., V. S. Shvidkiy and Y. G. Yaroshenko. Heat and Mass Transfer. Moskow, Akademkniga, 2002, 455 (in Russian).23. Trebula, P. and I. Klement. Drying and Hydrothermal Treatment of Wood. Technical University in Zvolen, Slovakia, 2002, 449 (in Slovak).

24. Videlov, H. Drying and Thermal Treatment of Wood. Sofia, University of Forestry, 2003, 255 (in Bulgarian).

За контакти:
Проф. д.т.н. **Ненчо Делийски**
Катедра „Дървообработващи машини“
Факултет по горска промишленост
Лесотехнически университет – София
бул. Св. Климент Охридски 10, 1797 София
e-mail: deliiski@netbg.com
Prof. Dr. Eng. **Ladislav Dzurenda**
Katedra Obrabanie dreva
Drevárska fakulta
Technical University in Zvolen
24 T. G. Masaryka, 960 53 Zvolen, Slovakia
e-mail: dzurenda@tuzvo.sk
Проф. д-р **Димитър Ангелски**
Катедра „Производство на мебели“
Факултет по горска промишленост
Лесотехнически университет – София
e-mail: d.angelski@gmail.com
Доц. д-р **Павлин Вичев**
Катедра „Дървообработващи машини“
Факултет по горска промишленост
Лесотехнически университет – София
e-mail: p_vitchev@abv.bg
Ас. д-р **Красимира Атанасова**
Катедра "Производство на мебели"
Факултет по горска промишленост
Лесотехнически университет – София
k_atanasova@ltu.bg