

ИЗЧИСЛЯВАНЕ ИЗМЕНЕНИЕТО НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА ВЪЗДУШНАТА ОБРАБОТВАЩА СРЕДА ВЪВ ФРИЗЕР ПО ВРЕМЕ ЗА ЗАМРАЗЯВАНЕ НА ОБЛИ БУКОВИ МАТЕРИАЛИ

Ненчо Делийски, Наталия Тумбаркова, Райко Станев
Лесотехнически университет, София

Резюме

В работата са предложени уравнения за изчисляване на експериментално установеното изменение на температурата на въздушната обработваща среда T_m по време на замразяването във фризер на обли дървени материали. Понижаването на T_m в началото на замразяването на материалите е представено с експоненциално уравнение, което след определена продължителност на замразяването преминава в линейно уравнение. Определени са стойностите на променливите, участващи в предложените уравнения, за случаите на понижаване на T_m в диапазона от 20 °C до -30 °C по време на 40 h и 50 h замразяване поотделно на два обли букови материала с диаметър 240 mm и дължина 480 mm.

Ключови думи: математично описание, обли букови материали, замразяване, обработваща въздушна среда.

Key words: mathematical description, beech logs, friezing, processing air medium.

JEL: C63, O3, O14, Q23.

Увод

При различни технологични и инженерни изчисления се налага да се определя степента на заледеност на дървените материали в зависимост от температурата на въздействащата върху тях въздушна среда и от продължителността на престояването им в тази среда. Такива изчисления е възможно да бъдат извършвани с помощта на математични модели, адекватно отразяващи сложния процес на замръзване на хигроскопично свързаната и на свободната вода в дървесината. В граничните условия на такива модели участва температурата на обработващата (въздействащата върху материалите) въздушна среда T_m [2, 3, 6, 9]. За решаването на такива модели е необходимо да се разполага с достатъчно точно математично описание на T_m .

Цел на настоящата работа е да се предложат уравнения, които апроксимират понижаването на температурата на обработващата въздушна среда T_m във фризер по време на замразяването в него на обли дървени материали, както и да се илюстрира използването на предложените уравнения за изчисляване на експериментално установеното изменение на T_m за случаите на замразяване на конкретни обли букови материали.

1. Механизъм на разпространение на топлината в облите дървени материали по време на замразяването им

По време на охлаждането на дървени материали с цел замразяване освен чисто топлинни процеси се осъществява и размяна на влага между обработващата среда и материалите.

Стойностите на коефициента на влагопроводност на дървесината са стотици пъти по-малки от тези на коефициента ѝ на предаване на температура [1, 4, 5]. Този факт обуславя незначително изменение на съдържанието на вода в дървесината по време на замразяването в сравнение с изменението на температурата в дървесината.

Това позволява размяната на влага между обработващата среда и дървените материали да се пренебрегне и изменението на температурата в тях да се разглежда като резултат от размяна само на топлина помежду им, като се приема, че разпространението на топлината в дървесината става единствено чрез топлопроводност [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Поради това механизмът на разпространение на топлината в подложени на замразяване обли дървени материали може да се опише математически с помощта на диференциалното уравнение на топлопроводността.

В цилиндрични координати при постоянни стойности на топлофизичните характеристики на дървесината то се представя по следния начин в едномерен (1D) вариант, отразяващ разпространението на топлината само по радиуса на подложените на замразяване обли материали [2, 3, 6, 9]:

$$c_e \rho \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) + q_v \quad (1)$$

с начално условие

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

и гранично условие, изразяващо конвективното топлинно взаимодействие между цилиндричната повърхност на материалите и въздушната обработваща среда във фризера:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = -\frac{\alpha_r(0, \tau)}{\lambda_r(0, \tau)} [T(0, \tau) - T_m(\tau)], \quad (3)$$

където c_e е ефективният специфичен топлинен капацитет на дървесината, отчитащ липсата или наличието на лед в съответните точки от обема ѝ по време на замразяването, $J.kg^{-1}.K^{-1}$; λ_r – коефициент на топлопроводност на дървесината в радиално направление, $W.m^{-1}.K^{-1}$; ρ – плътност на дървесината, $kg.m^{-3}$; q_v – вътрешен обемен източник на топлина, изразяващ отделянето на латентната топлина по време на кристализацията на водата в дървесината при замръзването ѝ, $W.m^{-3}$; α_r – коефициент на конвективно топлопредаване между повърхността на дървесината в радиално направление и заобикалящата я въздушна среда във фризера, $W.m^{-2}.K^{-1}$; r – радиална координата, с която се решава математичният модел: $0 \leq r \leq R$, m; R – радиус на подложения на замразяване объл материал, m; T – температура, K; T_0 – начална температура на подложения на замразяване дървени материали K; T_m – температура на обработващата (замразяващата) въздушна среда във фризера, K, τ – време, s.

2. Математично описание на T_m

За компютърно решаване на математичния модел на процеса на замразяване на обли дървени материали е необходимо да се разполага с математично описание на участващата в дясната част на уравнение (3) температура на замразяващата въздушна среда във фризера T_m .

При експериментално изследване на процеса на замразяване във фризер на обли дървени материали е установено, че температурата T_m се понижава по сложна криволинейна зависимост във времето. Тази зависимост с достатъчна точност може да бъде представена чрез преминаващи една в друга експоненциална крива и права линия (фиг. 1).

Експоненциалното понижаване на T_m в началото на процеса на замразяване може да бъде описано математически с помощта на следното уравнение:

$$T_m^{exp} = T_{me}^{asympt} + (T_{m0} - T_{me}^{asympt}) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{exp}}\right), \quad (4)$$

$$@ \quad 0 \leq \tau \leq \tau_e^{exp}$$

където T_{m0} е началната стойност на T_m , K; T_{me}^{asympt} – асимптотична стойност на T_m в края на експоненциалното ѝ понижаване, K; τ – текуща стойност на времето на замразяване, s; τ_{exp} – времеконстанта на експонентата $T_m^{exp} = f(\tau)$, s; τ_e^{exp} – продължителност на експоненциалното понижаване на T_m , s; @ – при (когато).

По-нататъшното линейно понижаване на T_m (след изтичане на времето τ_e^{exp}) може да се представи чрез уравнението

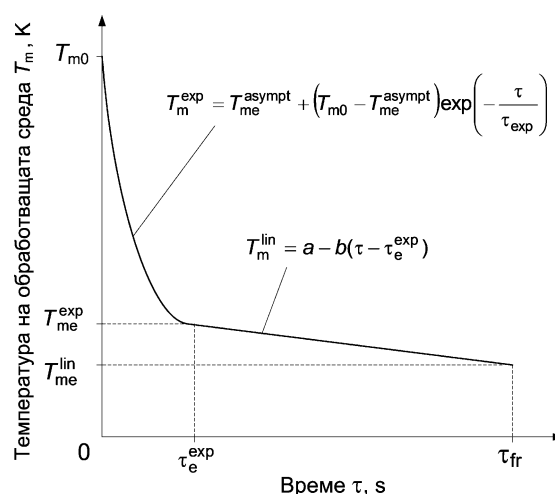
$$T_m^{lin} = a - b(\tau - \tau_e^{exp}) \quad @ \quad \tau_e^{exp} < \tau \leq \tau_{fr}, \quad (5)$$

където

$$a = T_{me}^{exp}, \quad (6)$$

$$b = \frac{T_{me}^{exp} - T_{me}^{lin}}{\tau_{fr} - \tau_e^{exp}}. \quad (7)$$

Символите в уравнения (5), (6) и (7), които не са пояснени след уравнение (4), означават следното: T_{me}^{exp} и T_{me}^{lin} – крайна (последна) стойност съответно на експоненциалното и линейното понижаване на T_m , K; τ_{fr} – продължителност на процеса на замразяване, s (виж фиг. 1).



Фиг. 1. Изменение на T_m по време на замразяване на облите материали във фризер

За осигуряване на най-добро съответствие между експериментално установените и изчислените по уравнения (4) и (5) стойности на T_m те се съпоставят едни с други. За критерий на най-добро съответствие между сравняваните стойности на T_m е използвана минималната стойност σ_{n-1}^{min} на средноквадратична грешка, изчислена по следното уравнение:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (T_n^{calc} - T_n^{experim})^2}{N-1}}, \quad (8)$$

където с T_n^{calc} и $T_n^{experim}$ са означени съответно изчислените и експерименталните стойности на T_m , а с n – поредният номер на моментите от процеса на замразяване, в които те се сравняват помежду им: $0 \leq n \leq N$.

3. Използване на математичното описание на T_m за апроксимиране понижаването на T_m по време на замразяване на обли букви материали

За изчисляване на T_m и σ_{n-1} по време на замразяването обли дървени материали е съставена компютърна програма в изчислителната среда на MS Excel. За целта получените експериментални стойности за понижаването на T_m във фризера се въвеждат в създадени в програмата таблици, в които автоматично се нанасят изчислените по уравнения (4), (5) и (8) стойности на T_m и σ_{n-1} . Изчисляваните стойности на σ_{n-1} се обединяват в таблица, от анализа на която се установява минималната средноквадратична грешка σ_{n-1}^{\min} и съответстващите ѝ стойности на променливите, участващи в уравнения (4) ÷ (7).

За определяне на стойностите на променливите, участващи в десните части на уравнения (4) ÷ (7), се извършват следните действия.

Изготвената програма се разделя на 7 работни екселови листа (Sheets). Листове 1 и 4 се използват за приблизително определяне на текущото време от процеса на замразяване, в което експоненциалното понижаване на T_m преминава в линейно. Лист 2 и лист 5 са предназначени за прецизно изчисляване на стойностите на променливите участващи в уравнение (4) и на σ_{n-1} по време на експоненциалното понижаване на T_m .

Листове 3 и лист 6 служат за прецизно изчисляване на стойностите на променливите, участващи в уравнение (5) и на σ_{n-1} по време на линейното понижаване на T_m . На лист 7 се осъществява графично представяне на експерименталните и изчислените стойности на T_m в единна координатна система.

В листове 2 и 5 се съставя таблица, в която се нанасят резултатите от следните операции:

- Конвертиране от °C в K на експериментално установените стойности на T_m по време на замразяването;
- Изчисляване на T_m по уравнение (4);
- Пресмятане на квадрата от разликата ΔT_m между експерименталните и изчислените стойности на температурата на обработващата среда с оглед използването му в уравнение (8);
- Изчисляване по уравнение (8) на средната квадратична грешка σ_{n-1} за експоненциалното понижаване на T_m в процеса на замразяване на материалите.

Изготвената в листове 2 и 5 таблица се копира многократно в 8 реда и 17 колони в листове 1 и 4, като във всеки ред се задават различни стойности на времето τ_e^{exp} със стъпка от 1800 s, а за всяка колона се изменя времеконстантата T_{exp} със стъпка 600 s. Получените във всяка таблица стойности на σ_{n-1} се обединяват в нова таблица, от анализа на която се установява при кои стойности на τ_e^{exp} и T_{exp} по уравнение (8) се получава минимална стойност на средноквадратична

грешка σ_{n-1}^{\min} . Така установените стойности на τ_e^{exp} и T_{exp} се залагат като окончателни в таблиците на листове 2 и 5 и с тях се изчислява T_m^{exp} .

В листове 3 и 6 се съставя таблица, в която се нанасят резултатите от следните операции:

- Конвертиране от °C в K на експериментално установените стойности на T_m по време на замразяването.
- За начална стойност на T_m по време на линейното ѝ понижаване по време на замразяването се приема крайната изчислена стойност по време на експоненциалното изменение на T_m , т.е. съгласно уравнение (6) се приема, че $a = T_{\text{me}}^{\text{exp}}$;
- Изчисляване на коефициента на наклона b на линейното понижаване на T_m по уравнение (7);
- Изчисляване на T_m по уравнение (5);
- Пресмятане на квадрата от разликата ΔT_m между експерименталните и изчислените стойности на T_m ;
- Изчисляване по уравнение (8) на средната квадратична грешка σ_{n-1} за линейното понижаване на T_m в процеса на замразяване.

Чрез последователно увеличаване и намаляване с малка стъпка на коефициента b в уравнение (7) спрямо първоначално изчислената му стойност с използване на експериментално установената температура на обработващата среда в края на замразяването на опитните образци се установява минимална стойност на средната

квадратична грешка σ_{n-1}^{\min} . Така установената стойност на коефициента b се залага като окончателна на листове 3 и 6 и с нея се изчисляват стойностите на T_m^{lin} .

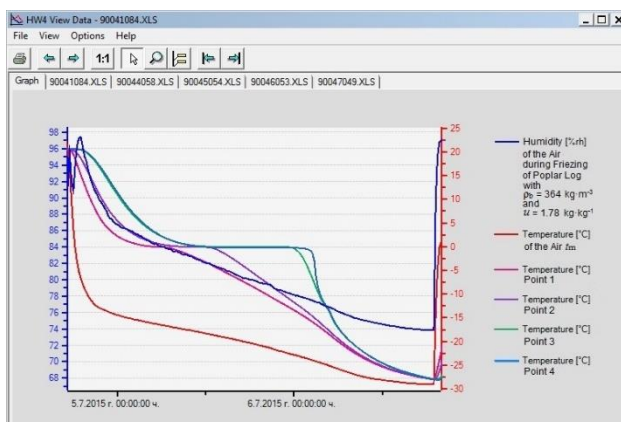
Съставената компютърна програма е използвана за определяне на стойностите на променливите в уравнения (4) ÷ (8) въз основа на обработването с нея на експериментално установеното понижаване на T_m във фризер по време на замразяването в него на обли букви материали с диаметър 240 mm и дължина 480 mm.

Автоматичното измерване и записване на данните за понижаването на T_m по време на експериментите (фиг. 2) е осъществено с помощта на Data Logger тип HygrologNT на швейцарската фирма ROTRONIC със зададен интервал през 15 min. Продължителността на замразяване t_{f} на единия объл материал е 50 h, а на другия е 40 h. Това означава, че броят на експерименталните точки N в уравнение (8) в единия случай е 200, а в другия случай – 160.



Фиг. 2. Измерване на T_m във фризер по време на замразяване в него на объл буков материал

На фиг. 3 е показано изменението на T_m , на относителната влажност на въздуха във фризера ϕ и на температурата в 4 характерни точки от обема на опитния образец Б1 по време на 50 часовото замразяване на образца.



Фиг. 3. Експериментално установено изменение на T_m , ϕ и t в 4 точки от обема на буков образец Б1 по време на замразяването му във фризер

В таблица 1 са приведени определените с помощта на програмата на MS Excel стойности на променливите, които участват в уравнения (4) ÷ (8) за случаите на поотделното замразяване на 2 обли букови материала, означени като „Б1” и „Б2”. В съответствие с приведените в нея стойности на променливите уравнения (4) и (5) получават вида:

- За объл материал Б1:

$$T_m^{exp} = 252.65 + 44.47 \exp\left(-\frac{\tau}{4980}\right), \quad (9)$$

@ $0 \leq \tau \leq 28800s$

$$T_m^{lin} = 252.79 - 7.85 \cdot 10^{-5}(\tau - 28800), \quad (10)$$

@ $28800s < \tau \leq 180000s$

- За объл материал Б2:

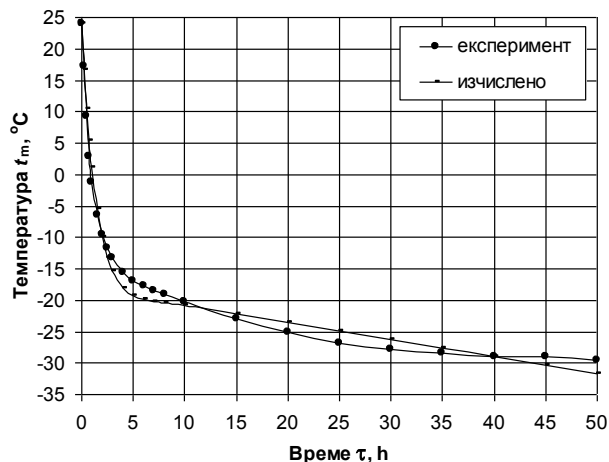
$$T_m^{exp} = 252.15 + 40.71 \exp\left(-\frac{\tau}{5100}\right), \quad (11)$$

@ $0 \leq \tau \leq 28800s$

$$T_m^{lin} = 252.29 - 9.38 \cdot 10^{-5}(\tau - 28800) \quad (12)$$

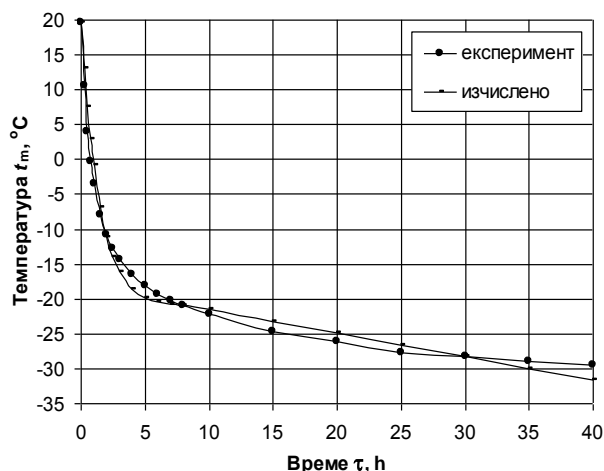
@ $28800s < \tau \leq 144000s$

На фиг. 4 и фиг. 5 е показано изчисленото по уравнения (9) ÷ (12) и експериментално установеното изменение на T_m по време на замразяването поотделно на облите материали съответно Бук1 и Бук 2.



Фиг. 4. Изменение на t_m по време на 50 h замразяване във фризер на объл материал Б1

На фигурите се вижда твърде добрата точност на апроксимация на експерименталното изменение на T_m с помощта на уравнения (9) ÷ (12). За това свидетелстват и приведените в Таблица 1 стойности на средноквадратичната грешка σ_{n-1}^{min} , които се намират в границите до 2.0 K за експоненциалните и до 1.4 K за линейните апроксимирани уравнения.



Фиг. 5. Изменение на t_m по време на 40 h замразяване във фризер на объл материал Б2

Заклучение

В работата са предложени уравнения за апроксимиране на експериментално установеното изменение на температурата на въздушната обработваща среда T_m по време на замразяването

във фризер на дървени материали. Понижаването на T_m в началото на замразяването на материалите е представено с експоненциално уравнение, което след определена продължителност на процеса на замразяване преминава в линейно уравнение.

Съставена е компютърна програма на MS Excel за определяне на стойностите променливите в предложените уравнения въз основа на

обработването на експериментално установеното понижаване на T_m във фризер по време на замразяването в него на дървени материали. За критерий на най-добро съответствие между изчислените и съответстващите им експериментални стойности на T_m е използвана минималната стойност на средноквадратичната грешка σ_{n-1}^{\min} .

Таблица 1. Стойности на променливите, участващи в уравнения (4) ÷ (8), за случаите на замразяване във фризер на обли букови материали с диаметър 0,24 m и дължина 0,48 m

№	Наименование на променливите	Означение	Размерност	Стойност на променливите	
				Материал Б1	Материал Б2
Променливи на експоненциалното понижаване на T_m в процеса на замразяване на облите материали					
1.	Измерена стойност на T_m в началото на процеса на замразяване	T_{m0}	K	297.12 (23.97 °C)	292.86 (19.71 °C)
2.	Експериментална асимптотична стойност на T_m , която би била достигната ако понижаването на T_m би станало само по експоненциален закон	T_{me}^{asympt}	K	252.65 (-20.5 °C)	252.15 (-21.0 °C)
3.	Времеконстанта на експоненциалното изменение на T_m в процеса на замразяване	τ_{exp}	s	4 980	5 100
4.	Текущо време в края на експоненциалното понижаване на T_m в процеса на замразяване	τ_e^{exp}	s	28 800 (8 h)	28 800 (8 h)
5.	Изчислена по уравнение (1) стойност на T_m в края на експоненциалното и 8 h понижаване при замразяването на образците	T_{me}^{exp}	K	252.79 (-20.36 °C)	252.29 (-20.86 °C)
6.	Минимална средноквадратична грешка на T_m по време на експоненциалното и понижаване	σ_{n-1}^{\min}	K	1.99	1.67
Променливи на линейното понижаване на T_m в процеса на замразяване на облите материали					
7.	Начална стойност на T_m при линейното и понижаване в процеса на замразяване	$a = T_{me}^{exp}$	K	252.79	252.29
8.	Коефициент на наклона на линейното понижаване на T_m в процеса на замразяване	b	K·s ⁻¹	$7.85 \cdot 10^{-5}$	$9.38 \cdot 10^{-5}$
9.	Текущо време в края на линейното понижаване на T_m в процеса на замразяване	τ_{fr}	s	180 000 (50 h)	144 000 (40 h)
10.	Изчислена по уравнение (2) стойност на T_m в края на линейното и понижаване при замразяването на облите материали	T_{me}^{lin}	K	240.92 (-32.23 °C)	241.48 (-31.67 °C)
11.	Минимална средноквадратична грешка на T_m по време на линейното и понижаване	σ_{n-1}^{\min}	K	1.39	1.25

Определени са стойностите на променливите, участващи в предложените уравнения за случаите на понижаване на T_m в диапазона от 20 °C до -30 °C по време на поотделното 40 h и 50 h замразяване на два обли букови материала с диаметър 240 mm и дължина 480 mm.

Предложените уравнения са необходими за участие в граничните условия на математичен модел, който описва процеса на замръзване на обли дървени материали при конкретни стойности на параметрите на въздушната обработваща среда.

Литература

1. Виделов, X. (2003). Сушене и топлинно обработване на дървесината. ЛТУ, София.
2. Делийски, Н. (1979). Математично моделиране на процеса на нагряване чрез топлопроводност на цилиндрични дървени сортименти. Научни трудове на ВЛТИ, серия МТД, т. XXV, С., Земиздат: 21–26.

3. Делийски, Н., Дзуренда, Л. (2010). Моделиране на топлинни процеси в технологиите за обработване на дървесина. Изд. "Авангард Прима", София.
4. Шубин, Г. С. (1968). Сушка и тепловая обработка древесины, Лесная промышленность, Москва.
5. Чудинов, Б. С. (1968). Теория тепловой обработки древесины. Наука, Москва.
6. Deliiski, N. (2013). Modelling of the energy needed for heating of capillary porous bodies in frozen and non-frozen states., Lambert Academic Publishing, Scholars' Press, Saarbrücken, Germany, 116 p., <http://www.scholars-press.com/system/covergenerator/build/1060>.
7. Khattabi, A., Steinhagen, H. P. (1993). Analysis of transient nonlinear heat conduction in wood using finite-difference solutions. Holz als Roh- und Werkstoff, № 4, 1993.
8. Ławniczak, M. (1995). Zarys hydrotermicznej i plastycznej obróbki drewna. Część I. Warzenie i parzenie drewna. Poznań.
9. Steinhagen, H. P. (1991). Heat transfer computation for a long, frozen log heated in agitated water or steam

– a practical recipe. Holz als Roh- und Werkstoff, № 7–8, 1991.

10. Trebula, P., Klement, I. (2002). *Drying and hydrothermal treatment of wood*. TU Zvolen, Slovakia (In Slovak).

COMPUTATION OF THE CHANGE IN THE PROCESSING AIR MEDIUM TEMPERATURE IN FREEZER DURING FRIEZING OF BEECH LOGS

Nencho Deliiski, Natalia Tumbarkova, Rayko Stanev
University of Forestry, Sofia, Bulgaria

Abstract

Equations for the computation of the experimentally determined change in the processing air medium temperature T_m in freezer during friezing in it of logs have been suggested. The decreasing of T_m during the friezing of the logs is approximated by exponential equation, which after determined processing time goes into linear equation. The values of the variables in the suggested equations have been determined in the work for the case of the change in T_m from 20 °C to –30 °C during separately 40 h and 50 h friezing of two beech logs with diameter of 240 mm and length of 480 mm.