



ВЫЧИСЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУШНОЙ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВО ВРЕМЯ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ВО ФРИЗЕРЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТТАИВАНИЯ КРЯЖЕЙ

Ненчо Делийски – Наталия Тумбаркова – Райко Станев –
Изабела Радкова

Abstract

Equations for the computation of the experimentally determined change in the processing air medium temperature T_m in freezer during freezing and subsequent defrosting of logs have been suggested. The decreasing of T_m during the freezing and the increasing of T_m during the subsequent defrosting of the logs is approximated by exponential equations, which after determined processing time go into linear equations.

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 about 20 °C to about –30 °C during separately many hours freezing in freezer and subsequent defrosting at about 25 °C of two beech logs with diameter of 240 mm and length of 480 mm.

The suggested equations are necessary for participation in the boundary conditions of mathematical models, which describe the logs' freezing and defrosting processes at concrete values of the processing air medium's parameters.

Key words: *mathematical description, processing air medium, beech log, freezing, defrosting*

ВВЕДЕНИЕ

При разнообразных технологических и инженерных расчетах приходится определять степень льдистости деревянных сортиментов в зависимости от температуры воздействующей на них воздушной среды и от продолжительности этого воздействия. Такие расчеты можно производить при помощи математических моделей, которые адекватно описывают весьма сложный процесс замерзания и оттаивания гигроскопически связанной и свободной воды в древесине.

В граничных условиях таких моделей участвует температура обрабатываемой (воздействующей на сортименты) воздушной среды T_m (Steinhagen 1991, Делийски – Дзуренда 2010, Deliiski 2013). Поэтому, для решения таких моделей необходимо включить в них достаточно точное математическое описание T_m .

Целью настоящей работы является составление уравнений, которые аппроксимируют изменение температуры обрабатываемой воздушной среды T_m во фризере во время замораживания и оттаивания в нем кряжей, а также использование этих уравнений для вычисления экспериментально установленного изменения T_m для случаев замораживания во фризере и последующего оттаивания буковых кряжей с конкретными параметрами.

МЕХАНИЗМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В КРЯЖАХ

Во время охлаждения кряжей с целью их замораживания, а также во время их оттаивания, кроме чисто тепловых процессов осуществляется обмен влагой между обрабатывающей средой и кряжами. Известно, что величина коэффициента теплопроводности древесины в сотни раз меньше ее коэффициента температуропроводности (Чудинов 1968, Шубин 1990, Виделов 2003). Благодаря этому во время замораживания и оттаивания древесины происходит незначительное изменение ее влажности по сравнению с изменением ее температуры. Этот факт позволяет пренебречь обменом влажности между обрабатывающей средой и кряжами и изменение температуры в них во время замораживания и последующего оттаивания рассматривать как результат обмена только теплом между ними, а также принять, что распространение тепла в кряжах происходит единственно путем теплопроводности.

Поэтому механизм распространения тепла в подвергнутых замораживанию и последующему оттаиванию кряжах можно описать математически при помощи уравнения теплопроводности. В цилиндрических координатах при постоянных значениях теплофизических характеристик древесины его можно представить следующим образом в одномерном (1D) варианте, описывающем распространение тепла только по радиусу подвергнутых замораживанию и оттаиванию кряжей (Делийски 1979, Steinhagen 1991, Khattabi – Steinhagen 1993, Ławniczak 1995, Trebula – Klement 2002, Делийски – Дзуренда 2010, Deliiski 2013):

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

с начальным условием

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

и граничным условием, описывающим конвективное тепловое взаимодействие между поверхностью кряжей и окружающей воздушной средой:

- во время замораживания кряжей:

$$\frac{dT(0, \tau)}{dr} = \frac{\alpha_{r-fr}(\tau)}{\lambda_{r-fr}(0, \tau)} [T(0, \tau) - T_{m-fr}(\tau)], \quad (3)$$

- во время оттаивания замороженных кряжей:

$$\frac{dT(0, \tau)}{dr} = -\frac{\alpha_{r-dfr}(\tau)}{\lambda_{r-dfr}(0, \tau)} [T(0, \tau) - T_{m-dfr}(\tau)], \quad (4)$$

где c_e – эффективная удельная теплоемкость древесины, учитывающая отсутствие или наличие льда в соответствующих точках объема кряжей во время их замораживания или оттаивания, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; λ_r , $\lambda_{r-fr}(0, \tau)$, $\lambda_{r-dfr}(0, \tau)$ – коэффициент теплопроводности древесины в радиальном направлении соответственно внутри кряжей и на их поверхности во время замораживания и оттаивания, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ – плотность древесины, $kg \cdot m^{-3}$; q_v – внутренний объемный источник тепла, отражающий выделение латентного тепла воды в древесине во время кристаллизации при ее замерзании, $W \cdot m^3$; $\alpha_{r-fr}(0, \tau)$, $\alpha_{r-dfr}(0, \tau)$ – коэффициент теплопередачи в радиальном направлении между поверхностью кряжей и окружающей воздушной средой соответственно во время замораживания и оттаивания, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; r –

радиальная координата, с которой решается математическая модель: $0 \leq r \leq R$, m ; R – радиус подвергнутых замораживанию и оттаиванию кражей, m ; T – температура, K ; T_0 – начальная температура кражей перед их замораживанием, K ; $T(0, \tau)$ – температура поверхности кражей во время их замораживания и оттаивания, K ; T_{m-fr} , T_{m-dfr} – температура обрабатывающей воздушной среды во время соответственно замораживания и оттаивания кражей, K ; τ – время, s .

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕМПЕРАТУР T_{m-fr} И T_{m-dfr}

Для компьютерного решения математической модели (1) ÷ (4) необходимо располагать математическим описанием участвующих в уравнениях (3) и (4) температур воздействующей на кражи воздушной среды соответственно T_{m-fr} и T_{m-dfr} .

При экспериментальном исследовании процессов замораживания во фризере и последующего оттаивания кражей нами установлено, что T_{m-fr} и T_{m-dfr} изменяются по сложным криволинейным зависимостям во времени. Эти зависимости с достаточной для расчетов точностью могут быть представлены посредством переходящих одну в другую экспоненциальной кривой и прямой линией (рис. 1).

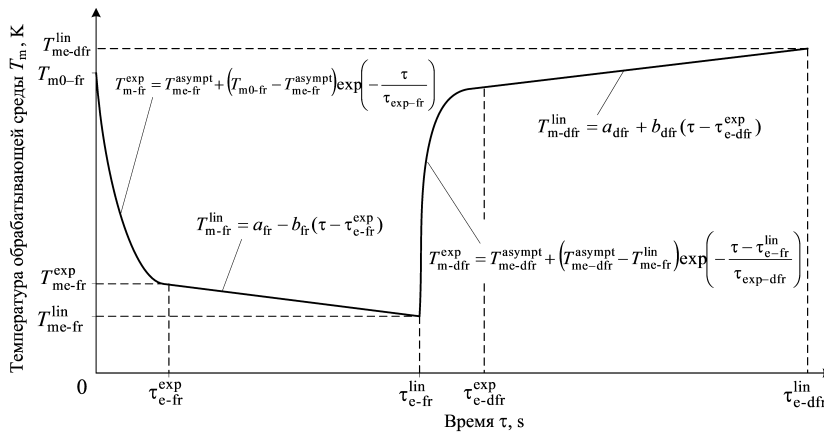


Рис. 1. Изменение на T_{m-fr} и T_{m-dfr} во время замораживания во фризере и последующего оттаивания кражей

Экспоненциальное понижение T_{m-fr} в начале процесса замораживания кражей и экспоненциальное повышение T_{m-dfr} в начале процесса оттаивания кражей могут быть описаны математически при помощи следующих уравнений:

$$T_{m-fr}^{exp} = T_{me-fr}^{asymp} + (T_{m0-fr} - T_{me-fr}^{asymp}) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{exp-fr}}\right) @ 0 \leq \tau \leq \tau_{e-fr}^{exp}, \quad (5)$$

$$T_{m-dfr}^{exp} = T_{me-dfr}^{asymp} + (T_{me-dfr}^{asymp} - T_{me-fr}^{lin}) \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{e-fr}^{lin}}{\tau_{exp-dfr}}\right) @ \tau_{e-fr}^{lin} \leq \tau \leq \tau_{e-dfr}^{exp}, \quad (6)$$

где T_{m0-fr} – начальное значение T_{m-fr} , K ; T_{me-fr}^{asymp} – асимптотическое значение T_{m-fr} в конце ее экспоненциального понижения, K ; ; T_{me-dfr}^{asymp} – асимптотическое значение T_{m-dfr}

T_{m-fr} в конце ее экспоненциального повышения, К; T_{me-fr}^{lin} – конечное (последнее) значение линейного понижения T_{m-fr} , К; τ – текущее значение времени совмещенных процессов замораживания и оттаивания кряжей, с; τ_{exp-fr} – постоянная времени экспоненты $T_{m-fr}^{exp} = f(\tau)$, с; $\tau_{exp-dfr}$ – постоянная времени экспоненты $T_{m-dfr}^{exp} = f(\tau)$, с; τ_{e-fr}^{exp} – текущее время в конце экспоненциального понижения T_{m-fr} , с; τ_{e-fr}^{lin} – текущее время в конце линейного понижения T_{m-fr} , с; @ – при выполнении условия.

Линейное понижение T_{m-fr} после истечения времени τ_{e-fr}^{exp} (рис. 1) можно представить при помощи следующего уравнения:

$$T_{m-fr}^{lin} = a_{fr} - b_{fr}(\tau - \tau_{e-fr}^{exp}) \quad @ \quad \tau_{e-fr}^{exp} < \tau \leq \tau_{e-fr}^{lin}, \tag{7}$$

где $a_{fr} = T_{me-fr}^{exp}$, (8)

$$b_{fr} = \frac{T_{me-fr}^{exp} - T_{me-fr}^{lin}}{\tau_{e-fr}^{lin} - \tau_{e-fr}^{exp}}. \tag{9}$$

Линейное повышение T_{m-dfr} после истечения времени τ_{e-dfr}^{exp} (см. рис. 1) можно представить при помощи уравнения

$$T_{m-dfr}^{lin} = a_{dfr} + b_{dfr}(\tau - \tau_{e-dfr}^{exp}) \quad @ \quad \tau_{e-dfr}^{exp} < \tau \leq \tau_{e-dfr}^{lin}, \tag{10}$$

где $a_{dfr} = T_{me-dfr}^{exp}$, (11)

$$b_{dfr} = \frac{T_{me-dfr}^{lin} - T_{me-dfr}^{exp}}{\tau_{e-dfr}^{lin} - \tau_{e-dfr}^{exp}}. \tag{12}$$

Переменные в уравнениях (7) ÷ (12), которые не пояснены выше после уравнений (5) и (6), означают следующее: T_{me-fr}^{exp} , T_{me-fr}^{lin} , T_{me-dfr}^{exp} и T_{me-dfr}^{lin} – конечные значения соответственно T_{m-fr} и T_{m-dfr} при их экспоненциальном и линейном изменениях в процессах замораживания и оттаивания кряжей (см. рис. 1), К.

Для обеспечения наилучшего соответствия между экспериментально установленными и вычисленными по уравнениям (5) ÷ (12) значениями T_{m-fr} и T_{m-dfr} они сопоставлены друг с другом. В качестве критерия наилучшего соответствия между сравниваемыми значениями T_{m-fr} и T_{m-dfr} использовано минимальное значение σ_{n-1}^{min} среднеквадратической ошибки, вычисляемой по уравнению:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (T_n^{calc} - T_n^{experim})^2}{N-1}}, \tag{13}$$

где посредством T_n^{calc} и $T_n^{experim}$ обозначены соответственно вычисленные и экспериментальные значения T_{m-fr} и T_{m-dfr} , а n – очередной номер моментов прососоов замораживания и оттаивания, в которых производится сравнение между ними: $0 \leq n \leq N$.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ В УРАВНЕНИЯХ ДЛЯ T_{m-fr} И T_{m-dfr}

Для вычисления переменных в приведенном выше математическом описании T_{m-fr} и T_{m-dfr} , а также для вычисления минимального значения среднеквадратической ошибки σ_{n-1}^{min} , нами составлена компьютерная программа в вычислительной среде MS Excel. Вычисляемые значения T_{m-fr} , T_{m-dfr} и среднеквадратической ошибки σ_{n-1} (рис. 2) располагаются в таблицах. Анализ получаемых результатов позволяет установить значение σ_{n-1}^{min} и соответствующие ей значения переменных в уравнениях (5) ÷ (12).

Текушо време, h	Текушо време, s	Экспериментални стойности на t_m , °C	Экспериментални стойности на $T_{m,K}$	T_{m0-fr}, K	T_{m1-fr}, K	$\tau_{c-fr,exp}, s$	τ_{exp-fr}, s	$T_{m,calc}, K$	$t_{m,calc}, °C$	ΔT_m	$\sigma_{fr,exp}$
0	0	21.82	294.97	294.97	253.05	0	4560	294.97	21.82	0.0000	0.9595
0.25	900	18.57	291.72	294.97	253.05	900	4560	287.46	14.31	18.1058	
0.5	1800	9.17	282.32	294.97	253.05	1800	4560	281.30	8.15	1.0347	
0.75	2700	2.64	275.79	294.97	253.05	2700	4560	276.24	3.09	0.2059	
1	3600	-1.77	271.38	294.97	253.05	3600	4560	272.09	-1.06	0.4942	
1.25	4500	-5.27	267.88	294.97	253.05	4500	4560	268.68	-4.47	0.6404	
1.5	5400	-8.03	265.12	294.97	253.05	5400	4560	265.88	-7.27	0.5764	
1.75	6300	-10.18	262.97	294.97	253.05	6300	4560	263.58	-9.57	0.3728	
2	7200	-11.86	261.29	294.97	253.05	7200	4560	261.69	-11.46	0.1635	
2.25	8100	-13.20	259.95	294.97	253.05	8100	4560	260.15	-13.00	0.0384	
2.5	9000	-14.32	258.83	294.97	253.05	9000	4560	258.88	-14.27	0.0020	
2.75	9900	-15.23	257.92	294.97	253.05	9900	4560	257.83	-15.32	0.0078	
3	10800	-16.01	257.14	294.97	253.05	10800	4560	256.98	-16.17	0.0271	
3.25	11700	-16.70	256.45	294.97	253.05	11700	4560	256.27	-16.88	0.0316	
3.5	12600	-17.28	255.87	294.97	253.05	12600	4560	255.70	-17.45	0.0306	
3.75	13500	-17.79	255.36	294.97	253.05	13500	4560	255.22	-17.93	0.0192	
4	14400	-18.25	254.90	294.97	253.05	14400	4560	254.83	-18.32	0.0086	
4.25	15300	-18.59	254.56	294.97	253.05	15300	4560	254.51	-18.64	0.0022	
4.5	16200	-18.93	254.22	294.97	253.05	16200	4560	254.25	-18.90	0.0010	
4.75	17100	-19.16	253.99	294.97	253.05	17100	4560	254.04	-19.11	0.0021	
5	18000	-19.43	253.72	294.97	253.05	18000	4560	253.86	-19.29	0.0194	
5.25	18900	-19.60	253.55	294.97	253.05	18900	4560	253.71	-19.44	0.0270	
5.5	19800	-19.80	253.35	294.97	253.05	19800	4560	253.60	-19.55	0.0602	
5.75	20700	-19.96	253.19	294.97	253.05	20700	4560	253.50	-19.65	0.0947	
6	21600	-20.10	253.05	294.97	253.05	21600	4560	253.42	-19.73	0.1351	

Рис. 2. Экспериментально установленное (колонки 3 и 4) и вычисленное по уравнению (5) экспоненциальное понижение на T_{m-fr} во время 6-ти часового замораживания кряжа (колонки 9 и 10), обеспечивающее получение $\sigma_{n-1} = 0.9595$ °C (колонка 12)

При помощи компьютерной программы определены значения переменных в уравнениях (5) ÷ (12) по отношению к экспериментально установленному изменению T_{m-fr} и T_{m-dfr} во время замораживания в горизонтальном фризере и последующему оттаиванию при открытой крышке фризера буковых кряжей с диаметром 0.24 m и длиной 0.48 m (рис. 3). Автоматическое измерение и запись данных о понижении температуры T_{m-fr} и о повышении T_{m-dfr} во время экспериментов осуществлялось при помощи Data Logger-а типа HygrologNT швейцарской фирмы ROTRONIC с заданным интервалом через 15 min.

Продолжительность как процесса замораживания, так и процесса оттаивания одного из кряжей составляла 50 h, а другого – 40 h. Это означает, что количество экспериментальных точек N в уравнении (13) для одного кряжа равнялось 200, а для другого кряжа 160 как при замораживании, так и при оттаивании.

В таблице 1 приведены вычисленные при помощи экселевской программы значения переменных, которые участвуют в уравнениях (5), (7), (8) и (9) для случаев поотдельного замораживания двух буковых кряжей, обозначенных как Кряж Б1 и

Кряж Б2. В соответствии с приведенными в этой таблице значениями переменных уравнения (5) и (7) получают следующий вид:



Рис. 3. Измерение T_m во время замораживания и последующего оттаивания кряжей

Таблица 1. Значения переменных в уравнениях (5), (7), (8) и (9) при замораживании во фризере буковых кряжей с диаметром 0.24 м и длиной 0.48 м

№	Наименование переменных	Обозначение	Единица СИ	Значение переменных	
				Кряж Б1	Кряж Б2
Переменные экспоненциального понижения T_m в процессе замораживания кряжей					
1.	Измеренное значение T_{m-fr} в начале процесса замораживания кряжей	T_{m0-fr}	К	297.12 (23.97°C)	292.86 (19.71°C)
2.	Экспериментальное асимптотическое значение T_m , к которому стремится T_{m-fr} при ее экспоненциальном понижении	T_{me-fr}^{asympt}	К	252.65 (-20.5°C)	252.15 (-21.0°C)
3.	Постоянная времени экспоненц. понижения T_{m-fr} в процессе заморажив.	τ_{exp}	s	4 980	5 100
4.	Текущее время в конце экспоненц. понижения T_{m-fr} в процессе заморажив.	τ_{e-fr}^{exp}	s	28 800 (8 h)	28 800 (8 h)
5.	Вычисленное по уравнению (5) значение T_{m-fr} в конце ее экспоненц. понижения в течение 8 h	T_{me-fr}^{exp}	К	252.79 -20.36°C	252.29 -20.86°C
6.	Минимальное среднеквадратическое отклонение T_{m-fr} во время ее эксп. пон.	σ_{n-1}^{min}	К	1.99	1.67
Переменные линейного понижения T_m в процессе замораживания кряжей					
7.	Начальное значение T_{m-fr} при ее линейном понижении в проц. замораж.	$a_{fr} = T_{me}^{exp}$	К	252.79	252.29
8.	Коэффициент наклона линейного понижения T_{m-fr} в процессе заморажив.	b_{fr}	К·с ⁻¹	$7.85 \cdot 10^{-5}$	$9.38 \cdot 10^{-5}$
9.	Текущее время в конце линейного понижения T_{m-fr} в процессе заморажив.	τ_{e-fr}^{lin}	s	180 000 (50 h)	144 000 (40 h)
10.	Вычисленное по уравнению (7) значение T_{m-fr} в конце ее лин. пониж.	T_{me-fr}^{lin}	К	240.92 -32.23°C	241.48 -31.67°C
11.	Минимальное среднеквадратическое отклонение T_{m-fr} во время ее лин. пониж.	σ_{n-1}^{min}	К	1.39	1.25

• Для замораживания кряжа Б1:

$$T_{m-fr}^{exp} = 252.65 + 44.47 \exp\left(-\frac{\tau}{4980}\right) @ 0 \leq \tau \leq 28800s, \quad (14)$$

$$T_{m-fr}^{lin} = 252.79 - 7.85 \cdot 10^{-5}(\tau - 28800) @ 28800s < \tau \leq 180000s, \quad (15)$$

• Для замораживания кряжа Б2:

$$T_{m-fr}^{exp} = 252.15 + 40.71 \exp\left(-\frac{\tau}{5100}\right) @ 0 \leq \tau \leq 28800s, \quad (16)$$

$$T_{m-fr}^{lin} = 252.29 - 9.38 \cdot 10^{-5}(\tau - 28800) @ 28800s < \tau \leq 144000s, \quad (17)$$

Проделав аналогичные вычисления для процесса оттаивания кряжей, получен следующий конкретизированный вид уравнений (6) и (10):

• Для оттаивания замороженного кряжа Б1:

$$T_{m-dfr}^{exp} = 290.82 + (290.82 - 240.92) \exp\left(-\frac{\tau - 180000}{3180}\right) @ 180000s \leq \tau \leq 201600s, \quad (18)$$

$$T_{m-dfr}^{lin} = 290.76 + 3.96 \cdot 10^{-5}(\tau - 201600) @ 201600s < \tau \leq 360000s, \quad (19)$$

• Для оттаивания замороженного кряжа Б2:

$$T_{m-dfr}^{exp} = 293.65 + (293.65 - 241.48) \exp\left(-\frac{\tau - 144000}{4440}\right) @ 144000s \leq \tau \leq 180000s, \quad (20)$$

$$T_{m-dfr}^{lin} = 293.63 + 3.77 \cdot 10^{-5}(\tau - 180000) @ 180000s < \tau \leq 288000s, \quad (21)$$

На рис. 3 и рис. 4 показано экспериментально установленное и вычисленное по уравнениям (14) ÷ (17) и (18) ÷ (21) изменение T_m во время замораживания и последующего оттаивания кряжей Б1 и Б2. На рисунках видна весьма хорошая точность аппроксимации экспериментальных значений T_m при помощи этих уравнений. Об этом свидетельствуют и вполне приемлемые значения среднеквадратического отклонения σ_{n-1}^{min} , которые для обоих кряжей находятся в пределах 2.0 К для экспоненциальных и 1.5 К для линейных аппроксимирующих уравнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложены уравнения для аппроксимации экспериментально установленного изменения температуры воздушной обрабатываемой среды T_m во время замораживания и оттаивания во фризере деревянных сортиментов. Понижение T_m во время замораживания сортиментов и повышение T_m во время их последующего оттаивания представлено при помощи экспоненциальных уравнений, которые после определенной продолжительности процесса переходят в линейные уравнения.

Составлена компьютерная программа на MS Excel для определения значений переменных, участвующих в предложенных уравнениях на основе обработки экспериментально установленного изменения T_m во время замораживания и оттаивания сортиментов. В качестве критерия наилучшего соответствия

вычисленных по уравнениям и соответствующих им экспериментальным значениям T_m использовано минимальное значение среднеквадратического отклонения σ_{n-1}^{\min} .

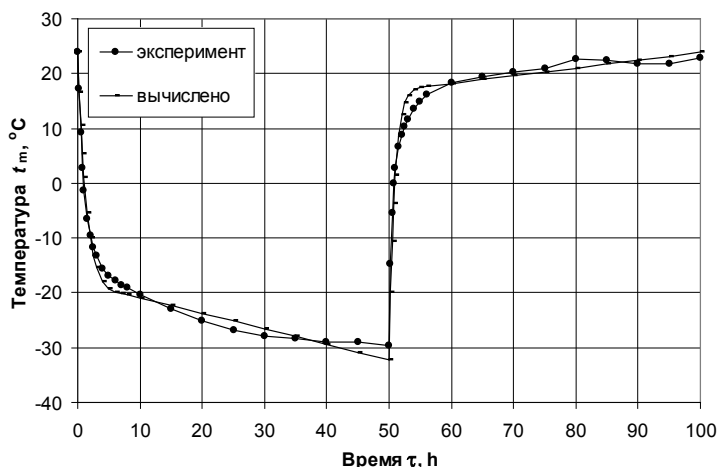


Рис. 3. Изменение t_m во время 50 h замораживания во фризере кряжа Б1 и последующего его 50 h оттаивания

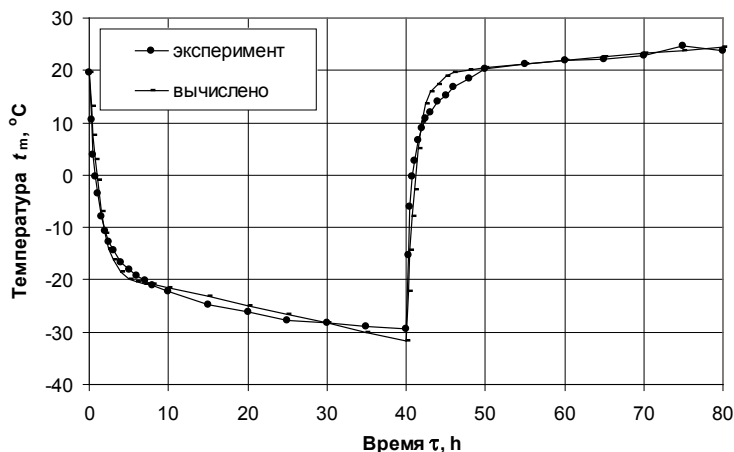


Рис. 4. Изменение t_m во время 40 h замораживания во фризере кряжа Б1 и последующего его 40 h оттаивания

При помощи компьютерной программы определены значения переменных, участвующих в предложенных уравнениях для случаев понижения T_m в диапазоне от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ во время поотдельного 40 h и 50 h замораживания буковых кряжей с диаметром 0.24 m и длинней 0.48 m, а также во время их последующего оттаивания в течение соответственно 40 h и 50 h при комнатной температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Предложенные уравнения необходимы для их участия в граничных условиях математической модели, описывающей процессы замораживания и последующего оттаивания кряжей при конкретных значениях параметров обрабатываемой воздушной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВИДЕЛОВ, Х., 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. Авангард Прима, София.
4. ШУБИН, Г. С., 1990: 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. ISBN 978-3-639-70036-7, Lambert Academic Publishing, Scholars' Press, Saarbrücken, Germany, 116 p., <http://www.scholars-press.com/system/covergenerator/build/1060>
7. КНАТТАБИ, А., STEINHAGEN, H. P., 1993: Analysis of transient nonlinear heat conduction in wood using finite-difference solutions. Holz als Roh- und Werkstoff, №4.
8. ŁAWNICZAK, M., 1995: Zarys hydrotermicznej i plastycznej obróbki drewna. Czesé 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.
10. TREBULA, P., KLEMENT, I., 2002: Drying and hydrothermal treatment of wood. TU Zvolen, Slovakia (In Slovak).