

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак, аспирант (БГТУ);**В. Б. Снопков**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ В ПЕРИОД ПРОГРЕВА
В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ**

Исследованы теплофизические характеристики сосновой древесины комплексным методом. Получены зависимости, отражающие характер изменения температуры на поверхности и внутри древесины во времени. Определены закономерности изменения коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, коэффициента температуропроводности древесины во времени при прогреве в ненасыщенной среде.

Investigated the thermophysical characteristics of pine wood by the method of the complex. The dependencies that reflect the character of temperature changes on the surface and inside the wood over time. The regularities of changes in the coefficient of thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity of wood over time when heated in an unsaturated environment.

Введение. Первой технологической операцией процесса сушки пиломатериалов является начальный прогрев, который проводится с целью доведения температуры высушиваемого материала до уровня температуры сушильного агента.

В современных сушильных камерах операцию прогрева проводят при степени насыщенности обрабатываемой среды меньше 1, т. е. в ненасыщенной среде. В таких условиях прогрев древесины сопровождается испарением влаги с ее поверхности и, как следствие, уровнем температуры поверхностных слоев меньше температуры обрабатываемой среды. Данный факт можно объяснить тем, что при прогреве в ненасыщенной среде в древесине возникают два совместно протекающих процесса переноса тепла: теплопроводность, направленная от поверхностных слоев сортамента к внутренним, и влагопроводность во встречном направлении. Таким образом, при начальном прогреве будут изменяться как температура, так и влажность древесины, что повлечет за собой изменение и других физических свойств древесины. В этой связи исследования, направленные на измерение текущих значений теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности, представляют несомненный практический интерес.

Существующие методы исследования тепловых свойств древесины дают возможность их определения лишь в конкретных стационарных условиях, т. е. в условиях, когда тепловой поток, проходящий через древесину, сохраняется постоянным во времени. Начальный прогрев древесины относится к нестационарным процессам, поскольку имеет место изменяющаяся во времени и по сечению температура самого сортамента и температура агента обработки. Поэтому авторами был применен метод исследования, основанный на способе комплексного определения теплофи-

зических характеристик при теплообмене тел в среде с линейно изменяющейся температурой. Один из способов комплексного определения теплофизических характеристик в режиме линейного нагрева состоит в использовании системы тел, одно из которых имеет известные теплофизические свойства. Этот метод был впервые реализован Е. П. Шурыгиной [1].

Цель работы. Целью настоящей работы было определение характера изменения тепловых свойств древесины во времени в период начального прогрева, а также скорости изменения температуры на поверхности и внутри древесины.

Методика проведения исследований. Принципиальная схема экспериментальной установки тепловых свойств древесины в период начального прогрева в ненасыщенной среде представлена на рис. 1.

Пластина из древесины сосны толщиной $2l_1$ соприкасается с двумя стальными пластинами, каждая из которых имеет толщину l_2 . Теплофизические свойства крайних пластин тождественны, но отличны от свойств средней пластины.

Для определения температуры внутри и на поверхности древесины применяли измерительную систему, имеющую четыре температурных датчика DS18S20. На металлическую пластину, поверхность которой контактирует с воздухом, устанавливается термодатчик T_1 , а на поверхность, граничащую с древесиной, – термодатчик T_2 . На глубине, соответствующей половине толщины образца из древесины, располагается термодатчик T_3 , а на поверхности древесины, соприкасающейся с другой металлической пластиной, – термодатчик T_4 . Все датчики были изолированы пастой КПП-8 во избежание влияния обрабатывающего агента на результаты измерений. Начальная температура всех элементов системы была одинаковой и равной температуре окружающей среды $t_0 = 15\text{--}20^\circ\text{C}$.

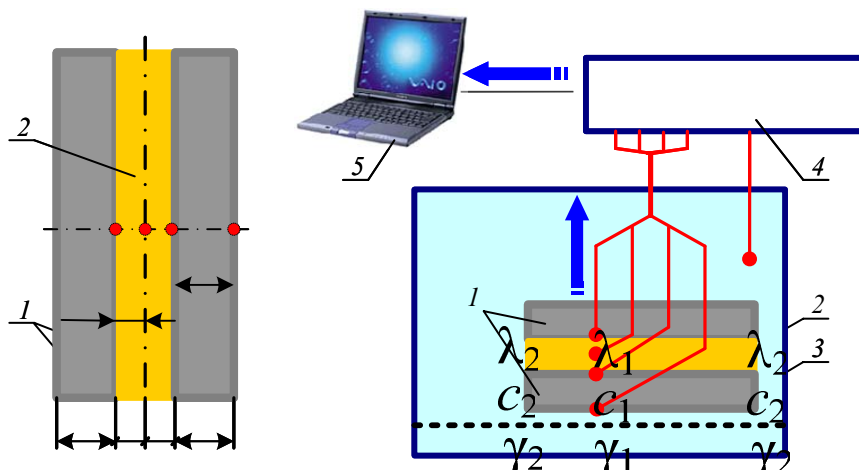


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
 1 – металлические пластины (сталь 20); 2 – образец из древесины сосны; 3 – термошкаф;
 4 – измерительная система; 5 – компьютер

Для обеспечения нагрева образца древесины вышеописанную систему пластин помещали в термошкаф (рис. 2, б). Температуру обрабатывающего воздуха контролировали с помощью термодатчика T_5 . Показания всех датчиков фиксировали с точностью $0,5^{\circ}\text{C}$ с периодичностью 5 мин в начале и 20 мин в конце процесса прогрева. Прогрев проводили до тех пор, пока разница температур на поверхности и внутри древесины не составляла $0,5^{\circ}\text{C}$. Влажность образцов определяли с помощью влагомера марки GANN HT 85. Условия проведения экспериментальных исследований и характеристика образцов из древесины и металлических пластин представлена в табл. 1 и 2 соответственно.

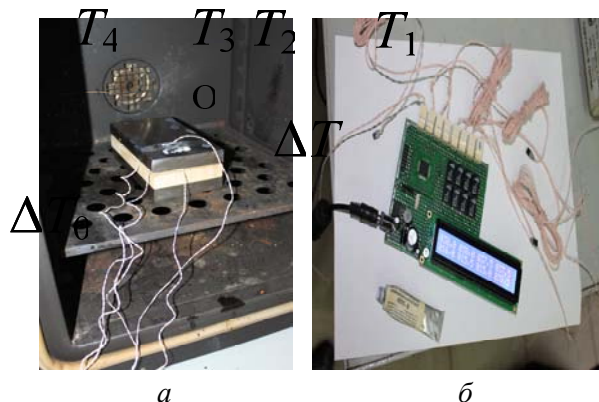


Рис. 2. Общий вид измерительной системы:
 а – система пластин; б – измерительная установка

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

Характеристики экспериментальных образцов						
Порода	Размеры, мм			Влажность $W, \%$	Направление волокон	Температура прогрева $t, ^{\circ}\text{C}$
	толщина	ширина	длина			
Сосна	20	100	200	30	радиальное	40
	20	100	200		тангенциальное	
	40	100	200		радиальное	
	40	100	200		тангенциальное	
Сосна	20	100	200	53	радиальное	60
	20	100	200		тангенциальное	
	40	100	200		радиальное	
	40	100	200		тангенциальное	

Таблица 2

Характеристика металлических пластин

Материал	Размеры, мм			Плотность $\gamma, \text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$	Удельная теплоемкость $c, \text{кДж/(кг}^{\circ}\text{C)}$
	толщина	ширина	длина			
Сталь 20	20	100	200	7853 при 40°C , 7847 при 60°C	51,65 при 40°C 51,2 при 60°C	0,486

Описанная экспериментальная установка позволяет определить в любой выбранный момент времени перепады температур по толщине металлических пластин $\Delta T = T_1(l_1, \tau) - T_2(0, \tau)$ и образца из древесины $\Delta T_0 = T_4(l_1 + l_2, \tau) - T_3(l_1, \tau)$. Используя результаты измерений, по нижеприведенным формулам можно рассчитать тепловые характеристики древесины и установить характер их изменения во времени.

$$a_1 = \frac{b \cdot l_1^2}{2 \cdot \Delta T_0}; \tag{1}$$

$$c_1 \cdot \gamma_1 = K_{c\lambda} \cdot \frac{\Delta T}{b} - h, \tag{2}$$

где

$$K_{c\lambda} = \frac{\lambda_2 \cdot 10^{-2}}{l_1 \cdot l_2}; \tag{3}$$

$$h = \frac{c_2 \cdot \gamma_2 \cdot l_2}{2 \cdot l_1}; \tag{4}$$

$$\lambda_1 = \frac{l_1^2}{2 \cdot \Delta T_0} \cdot (K_{c\lambda} \cdot \Delta T - b \cdot h), \tag{5}$$

здесь b – скорость нагревания поверхности металлических пластин, °С/ч; λ_1, λ_2 – коэффициент теплопроводности металла и древесины соответственно, Вт/(м · °С); a_1 – коэффициент температуропроводности древесины, м²/с; c_1, c_2 – удельная теплоемкость металла и древесины, Дж/(кг · °С); γ_1, γ_2 – плотность металла и древесины, кг/м³ [1].

Результаты исследований. В ходе проведенных экспериментальных исследований был определен характер изменения температуры поверхностных и внутренних слоев древесины во времени. На рис. 3 показаны графические зависимости, полученные для образцов из древесины сосны толщиной 40 мм, начальной влажностью $W_{нач} = 30\%$, прогреваемых при температуре среды $t_c = 40^\circ\text{C}$ и 60°C . Нагрев осуществлялся в радиальном направлении.

Анализ графиков, представленных на рис. 3, показывает, что температура воздуха в термощкафу устанавливается на требуемом уровне (40°C и 60°C) уже через 3–10 мин после начала нагревания. После этого она остается неизменной на протяжении всего эксперимента. Таким образом, можно считать, что нагревание древесины происходит при постоянной температуре обрабатывающей среды.

Нагревание поверхностных слоев образцов древесины начинается сразу, а внутренних – с некоторым опозданием. Через 20 мин после начала процесса разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины и составляет 4°C и 7°C при температуре среды 40°C и 60°C соответственно.

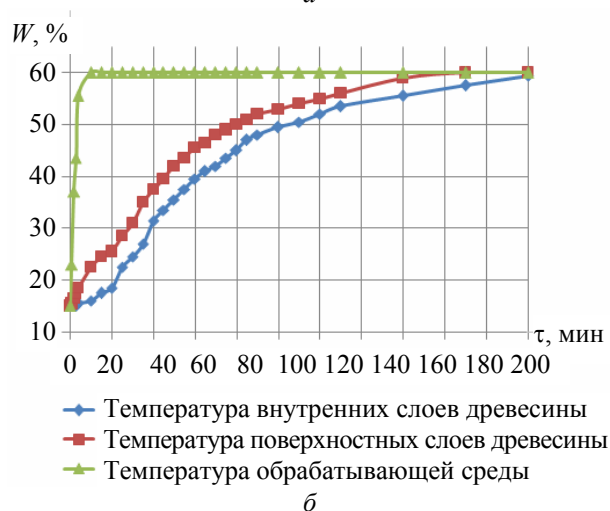
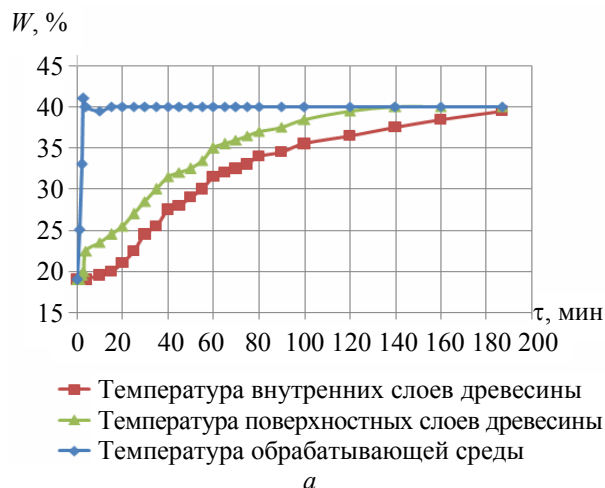


Рис. 3. Изменение температуры древесины сосны во время прогрева при температуре обрабатывающей среды: а – 40°C ; б – 60°C

При дальнейшем нагревании различие температур поверхностных и внутренних слоев древесины остается практически постоянным вплоть до момента достижения поверхностным образцом температуры обрабатывающей среды. В первом случае это произошло через 140 мин после начала процесса нагревания, во втором – через 190 мин. Далее при постоянной температуре поверхностных слоев увеличивается только температура внутри образца, что приводит к их полному выравниванию. В результате продолжительность полного прогрева образцов сосновой древесины толщиной 40 мм и начальной влажностью 30% составила: 187 мин при температуре обрабатывающей среды 40°C , 220 мин – при температуре 60°C .

Обращает на себя внимание тот факт, что в процессе нагревания древесины возникает и длительное время поддерживается значительная разница температур среды и поверхности образца древесины. Это однозначно свидетельствует о том, что нагревание сопровождается

испарением влаги с поверхности древесины, т. е. об одновременном протекании тепло- и влагопереноса.

Графические зависимости, аналогичные представленным на рис. 3, были получены и для других условий эксперимента, указанных в табл. 1. Во всех случаях характер изменения температуры поверхностных и внутренних слоев в процессе нагревания был одинаковым. Сопоставление полученных графиков между собой позволило отметить следующее.

1. С повышением температуры увеличивается продолжительность процесса прогрева, а также возрастает скорость изменения температуры на поверхности и внутри древесины.

2. При увеличении влажности древесины скорость изменения температуры древесины уменьшается и, как следствие, возрастает продолжительность прогрева.

3. С увеличением толщины образца увеличивается продолжительность прогрева, а скорость изменения температуры древесины остается практически одинаковой.

Для определения характера изменения теплофизических характеристик древесины во времени при прогреве были выполнены расчеты величины удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности по вышеприведенным формулам.

Поскольку закономерности изменения теплофизических характеристик древесины для всех условий прогрева аналогичны, для примера в табл. 3 приведены результаты расчетов для древесины сосны толщиной 40 мм, с начальной влажностью $W_n = 30\%$, а в табл. 4 – для образцов толщиной 40 мм, начальной влажностью $W_n = 53\%$. Нагрев происходил в радиальном направлении.

Таблица 3

**Теплофизические свойства сосновой древесины
влажностью $W_n = 30\%$**

τ , мин	$T = 40^\circ\text{C}$			$T = 60^\circ\text{C}$		
	$a \cdot 10^{-6}$	c	λ	$a \cdot 10^{-6}$	c	λ
20	0,31	2,10	0,28	0,31	2,26	0,42
40	0,17	2,22	0,21	0,22	2,38	0,26
60	0,14	2,55	0,18	0,12	2,48	0,21
80	0,12	2,70	0,16	0,11	2,6	0,18
100	–	–	–	0,10	3,0	0,15
Сред.	0,19	2,39	0,21	0,18	2,54	0,24

Таблица 4

**Теплофизические свойства сосновой древесины
влажностью $W_n = 53\%$**

τ , мин	$T = 40^\circ\text{C}$			$T = 60^\circ\text{C}$		
	$a \cdot 10^{-6}$	c	λ	$a \cdot 10^{-6}$	c	λ
20	0,35	2,60	0,55	0,4	2,47	0,54
40	0,23	2,66	0,36	0,28	2,50	0,41
60	0,17	2,74	0,28	0,23	2,54	0,35
80	0,15	2,84	0,25	0,22	2,64	0,34
100	0,11	3,16	0,20	0,22	2,74	0,37
120	–	–	–	0,19	2,85	0,32
сред	0,20	2,80	0,33	0,26	2,62	0,39

Анализируя данные, представленные в табл. 3 и 4, отметим, прежде всего, что полученные значения всех теплофизических характеристик древесины не противоречат сведениям, известным в литературе [2]. При этом удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности, измеренные у древесины с начальной влажностью $W_n = 53\%$, больше, чем у более сухой древесины ($W_n = 30\%$), что также согласуется с современными представлениями о свойствах древесины: прогрев древесины сопровождается увеличением удельной теплоемкости и снижением коэффициента теплопроводности. Коэффициент температуропроводности также уменьшается.

Закключение. Для исследования теплофизических характеристик сосновой древесины применен комплексный метод, позволяющий определить теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность в нестационарных условиях. Получены зависимости, отражающие характер изменения температуры на поверхности и внутри прогреваемой древесины. Установлено, что прогрев древесины сопровождается увеличением удельной теплоемкости, а также уменьшением коэффициентов теплопроводности и температуропроводности.

Литература

1. Лыков, А. В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1973.
2. Серговский, П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П. С. Серговский, А. И. Рассев. – М.: Лесная пром-сть, 1987.

Поступила 14.03.2012