

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОВЛАГОПРОВОДНОСТИ
ПРИ ПРОГРЕВЕ ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ**

В статье приведены результаты исследования термовлагопроводности древесины комплексным методом. Получены зависимости, отражающие характер изменения температуры на поверхности и внутри древесины во времени. Определены закономерности изменения коэффициента термовлагопроводности от условий обрабатываемой среды во времени.

В период прогрева древесины наблюдается заметный перепад температур на поверхности и внутри образца, что является причиной формирования неравномерного температурного поля по сечению древесины.

В свою очередь, возникновение разницы температур является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты. Задача операции прогрева заключается в подготовке влагонепроводящей системы древесины к равномерному испарению влаги.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что на величину коэффициента термовлагопроводности влияние оказывают следующие переменные факторы: температура прогрева, степень насыщенности обрабатываемой среды, начальная влажность образца.

В результате исследования определен характер изменения величины термоградиентного коэффициента для образцов различной толщины и начальной влажности в зависимости от температуры и степени насыщенности обрабатываемой среды во времени.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке режимов начального прогрева, повышающих качество продукции и снижающих энергозатраты на проведение данного процесса.

Ключевые слов: начальный прогрев, режим прогрева, перепад температур, термовлагопроводность, коэффициент, влагонепроводность, степень насыщенности.

O. G. Rudak

Belarusian State Technological University

**RESEARCH OF THE PHENOMENON OF THERMAL CONDUCTIVITY
DURING WOOD HEATING IN UNSATURATED MEDIUM**

The article presents the results of the research of thermal conductivity of wood by a complex method. Relationships reflecting the nature of temperature change over time and within wood were obtained. Regularities of thermal conductivity coefficient change from conditions of processing medium in time are determined.

During the period of wood warming, there is a marked temperature difference on the surface and inside the sample, which causes the formation of an uneven temperature field along the cross-section of the wood.

In turn, the occurrence of temperature differences causes moisture to move in the direction of heat flow. The purpose of the warm-up operation is to prepare the moisture conducting system of the wood for uniform evaporation of moisture.

The obtained experimental data show that the value of the thermal conductivity coefficient is influenced by the following variable factors: the temperature of the heat, the degree of saturation of the processing medium, the initial humidity of the sample. As a result of the study, the nature of the change in the value of the thermogenic coefficient for samples of different thickness and initial humidity depending on the temperature and degree of saturation of the processing medium over time was determined.

The results of the research can be used in the development of initial warm-up modes, which improve the quality of the product and reduce the energy consumption for this process.

Key words: initial warming up, warming up mode, temperature difference, thermomisture pro-water content, coefficient, moisture pro-water content, saturation degree.

Введение. Главная цель сушки – это превращение древесины из природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением ее свойств [1]. Таким образом, сушка является обязательным процессом в производстве не только изделий мебели, но и столярно-строительных деталей, оконных и дверных блоков, фанеры и др.

Сушка древесины – это сложный процесс, поскольку:

- 1) древесина различных пород имеет разные физико-механические свойства;
- 2) анизотропия строения древесины предполагает различные значения основных механических и физических свойств;

3) используются различные по размерам древесные сортаменты;

4) различны качественные требования к сушильному процессу;

5) имеет место сложность физических процессов, возникающих при сушке;

6) большая длительность процесса [2].

Известно, что первой технологической операцией, предшествующей сушке, является начальный прогрев.

Основная цель операции начального прогрева – это подготовка влагопроводящей системы древесины к операции сушки. Для этого необходимо создать условия (определить оптимальные параметры сушильного агента) для равномерного испарения влаги по толщине пиломатериала.

В процессе прогрева протекают три совместно действующих явления тепломассопереноса:

– перемещение тепла по материалу – теплопроводность;

– перемещение влаги по материалу – влагопроводность;

– термовлагопроводность.

Результаты исследований первых двух явлений были представлены в работах [3], [4].

Под термином «термовлагопроводность» принято понимать свойство древесины перемещать влагу под действием перепада (градиента) температур.

Изучением данного явления занимались многие ученые – Лыков А. В. [5], Шубин Г. С. [6], Чудинов Б. С. [7]. Однако работы этих авторов предполагали изучение явления термовлагопроводности для условий нагревания древесины в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$), т. е. прогрев в камерах с сушильным агентом – паром, пропаривание и проваривание сортаментов перед строганием и лушением.

Целью настоящей работы было определение характера изменения температуры и влажности древесины по сечению пиломатериала (внутри и на поверхности) во времени в период начального прогрева, а также определение коэффициента термовлагопроводности и изучение кинетики его изменения.

Основная часть. Современные технологии сушки предполагают использование режимов начального прогрева, при которых степень насыщенности обрабатываемой среды $\varphi < 1$, разница показаний психрометра Δt не превышает 5°C , а температура прогрева устанавливается на уровне, не превышающем температуру сушки на первой ступени режима сушки. Как правило, это не более 70°C . Следует отметить, что при таких условиях интенсивность испарения влаги с поверхности сортаментов и перемещение ее из внутренних более влажных слоев

к наружным значительно ниже, чем в процессе непосредственно сушки пиломатериалов.

В период начального прогрева в ненасыщенной среде происходит испарение влаги с поверхности пиломатериалов и, как следствие, уровень температуры поверхностных слоев меньше температуры обрабатываемой среды. Данный факт можно объяснить тем, что при прогреве в ненасыщенной среде возникают два совместно протекающих явления переноса тепла: теплопроводность внутри материала и теплообмен с обрабатываемой средой [8].

Свойство древесины перемещать влагу под действием перепада (градиента) температур называется термовлагопроводностью.

Свойство термовлагопроводности древесины необходимо учитывать при проведении начального прогрева, так как влага, находящаяся в наружных зонах, нагревается сильнее, чем во внутренних, и это вызывает движение ее снаружи внутрь.

В этой связи особый интерес представляет исследование изменения термовлагопроводности древесины во время прогрева в ненасыщенной среде во времени.

Известно, что при неизотермических условиях в древесине имеет место перенос влаги из мест с большей температурой в места с меньшей. Если образец древесины с влажностью, одинаковой по сечению, поместить в неравномерное температурное поле, в результате чего будет наблюдаться перепад температур на противоположных сторонах образца, то начнется перераспределение влажности на поверхности и внутри. На участках с меньшей температурой влажность древесины увеличится, а с большей – уменьшится. При этом в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги. Влага по объему сортамента всегда движется в сторону убывающей влажности. При определенном соотношении между влажностным и температурным градиентами эффект влагопроводности полностью компенсирует эффект термовлагопроводности, и по сечению образца установится стационарное поле температуры и влажности.

Отношение градиента влажности к градиенту температуры при таком стационарном состоянии $\delta = \Delta W / \Delta t$ носит название термоградиентного коэффициента. Он показывает, какому перепаду влажности эквивалентно изменение температуры на 1°C [9].

Известно, что на величину термоградиентного коэффициента влажной древесины ($W > W_{\text{п.н}}$) значительное влияние оказывает температура обрабатываемого агента. Характер

этого влияния, экспериментально установленный Г. С. Шубиным [10], иллюстрируется следующим уравнением:

$$q_{m,u} = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \Delta u, \quad (1)$$

где $q_{m,u}$ – плотность потока влаги (масса влаги, проходящая в единицу времени через единицу площади изопотенциальной поверхности – поверхности одинакового потенциала), кг влаги/(с·м²); a_m – коэффициент влагопроводности (аналог коэффициента температуропроводности a), м²/с; ρ_0 – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, кг/м³; Δu – градиент влагосодержания, представляющий собой перепад влагосодержания, приходящийся на единицу длины пути перемещения влаги.

Следует отметить, что коэффициент термо-влагопроводности является одним из основных показателей, который характеризует интенсивность перемещения потока влаги внутри древесины под действием температуры; движение влаги всегда направлено в сторону понижения температуры.

Как уже отмечалось выше, явление термо-влагопроводности является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты. Поэтому при конвективной сушке создается перепад температур по сечению образца, противоположный перепаду влажности на поверхности и внутри древесины, что мешает передвижению влаги изнутри к поверхности материала.

Существующие методы исследования тепловых свойств древесины дают возможность определения явлений теплопереноса лишь при определенных стационарных условиях, т. е. когда тепловой поток, проходящий через древесину, сохраняется постоянным во времени.

В данной исследовательской работе особый интерес представляет нестационарный режим, который характеризуется переменным в пространстве и времени температурным полем в нагреваемом теле. Начальный прогрев древесины относится к нестационарному режиму, поскольку имеет место изменяющаяся во времени и по сечению температура самого сортамента (поверхность – внутренний слой) и температура агента обработки. Для исследования вышеописанного процесса прогрева автором предложен метод исследования, который основывается на способе комплексного определения теплофизических 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 [3].

Для определения характера изменения коэффициента термо-влагопроводности древесины δ во времени в период начального прогрева необходимо найти перепады температур Δt и влажности ΔW по сечению образца, а также определить характер влияния параметров режима начального прогрева (температура и степень насыщенности обрабатываемой среды и начальная влажность образца) на величину δ .

Величина перепадов Δt и ΔW фиксируется через равные промежутки времени, когда тепловой поток сохраняется постоянным.

Для определения температуры внутри и на поверхности древесины применяли измерительную систему, имеющую температурные датчики модели DS18S20 и датчики влажности модели HCH-1000-001 HONEY. На поверхности образца древесины устанавливается по три термодатчика T_{1-3} , W_{1-3} , а на глубине, соответствующей половине толщины образца из древесины, располагаются термодатчики T_{4-6} , W_{4-6} . Все датчики были изолированы пастой КПТ-8 во избежание влияния обрабатываемого агента на результаты измерений.

Для обеспечения нагрева образца древесины вышеописанную систему пластин помещали в климатическую камеру. Температуру и степень насыщенности обрабатываемого воздуха устанавливали и поддерживали с помощью системы автоматического контроля. Показания всех датчиков фиксировали с точностью 0,5°С с периодичностью 20 мин. Прогрев проводили до тех пор, пока разница температур на поверхности и внутри древесины не составляла 0,5°С. Влажность образцов определяли с помощью влагомера марки GANN HT 85. Условия проведения экспериментальных пластин представлены в таблице (см. далее).

В данных исследованиях в целях упрощения были приняты некоторые допущения и ограничения. В отношении распространения тепла по поперечному сечению доски древесины можно приравнять к изотропному телу, за исключением случаев, когда предопределено достаточно ориентированное направление теплового потока в радиальном или в тангенциальном направлении. Начальная температура древесины считалась одинаковой по всему объему, температура среды постоянной как над всей поверхностью материала, так и во времени. Было принято, что тепло распространяется лишь в направлении по толщине материала, имеющего форму бесконечной пластины.

Результаты исследований по условиям таблицы представлены в виде графических зависимостей на рис. 1–4.

Условия проведения эксперимента для толщины образцов 32, 40, 50 мм

Степень насыщенности ϕ	Начальная влажность, %	Температура прогрева, °C	Степень насыщенности ϕ	Начальная влажность, %	Температура прогрева, °C
$\phi = 0,73$	25	40	$\phi = 0,87$	25	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80
	50	40		50	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80
	75	40		75	40
		50			50
		60			60
		70			70
		80			80

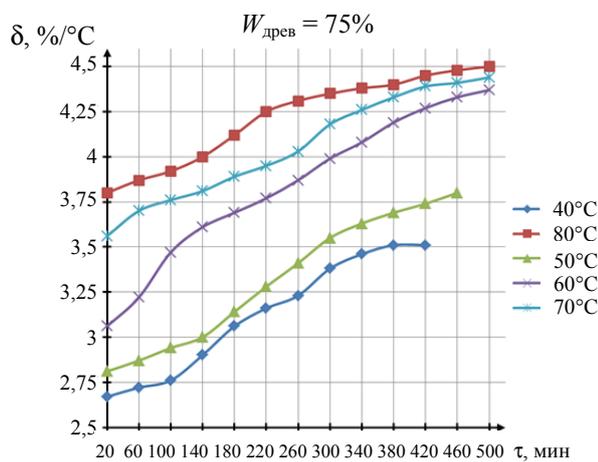


Рис. 1. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при $\phi = 0,73$ и $W_{\text{древ}} = 75\%$

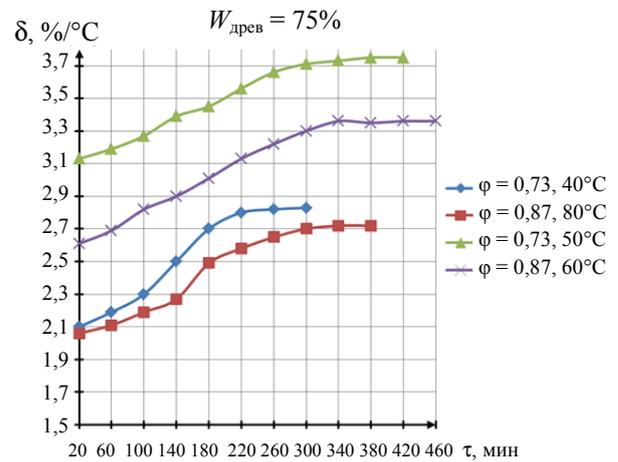


Рис. 3. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при различных режимах начального прогрева при $W_{\text{древ}} = 25\%$

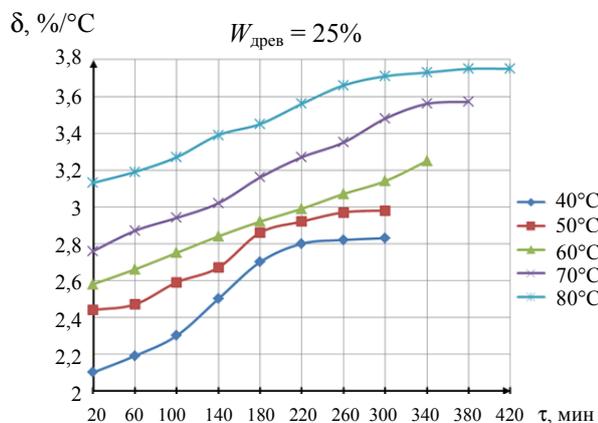


Рис. 2. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при $\phi = 0,73$ и $W_{\text{древ}} = 25\%$

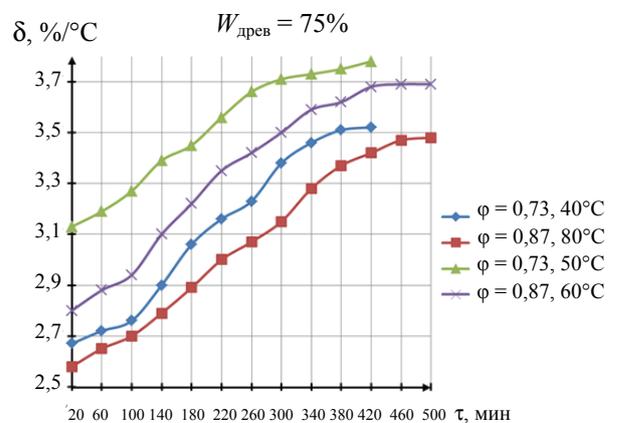


Рис. 4. Зависимость коэффициента термовлагопроводности от температуры прогрева во времени при различных режимах начального прогрева при $W_{\text{древ}} = 75\%$

Температура воздуха в климатической камере устанавливается на требуемом уровне (40–80°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 проходит при постоянной температуре обрабатываемой среды.

Нагревание поверхностных слоев образцов древесины начинается сразу, а внутренних – с некоторым опозданием. Через 60–80 мин после начала процесса разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на величину коэффициента термовлагопроводности существенное влияние оказывает температура прогрева. Так, из рис. 1 и 2 можно отметить, что при температуре 40–50°C и влажности образца $W_{\text{древ}} = 75\%$ величина δ в равные промежутки времени отличается незначительно (на десятые доли). При температуре 70–80°C наблюдается увеличение значения δ на 25%.

Интересен тот факт, что изменение значения δ при $W_{\text{древ}} = 25\%$ происходит равномерно, а при $W_{\text{древ}} = 75\%$ можно заметить некий перепад между температурами 50 и 60°C. Этот факт можно объяснить существенным изменением влагосодержания и теплосодержания обрабатываемого воздуха при температуре 50 и 60°C и $\varphi = 0,73$ (по *Id*-диаграмме).

Величина коэффициента термовлагопроводности для различных условий эксперимента изменяется в пределах от 1,9 до 4,5 %/°C. Полученные значения не противоречат сведениям, имеющимся в литературе [11].

Анализ данных на рис. 3 и 4 показывает влияние степени насыщенности обрабатываемого агента при фиксированной температуре на величину δ через равные промежутки времени. При влажности образца $W_{\text{древ}} = 25\%$ величина коэффициента δ при температуре 40°C и значениях φ 0,73 и 0,87 отличается в среднем на 8%, причем чем выше степень насыщенности, тем меньше коэффициент δ . При температуре прогрева $t = 80^\circ\text{C}$ величина коэффициента δ при $\varphi = 0,73$ больше на 20%, чем при $\varphi = 0,87$.

Таким образом, на интенсивность возрастания величины термоградиентного коэффициента также оказывают влияние степень насыщенности обрабатываемой среды и начальная влажность образца.

Полученные данные можно использовать при разработке режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде. Для оптимальной подготовки влагонепроводящей системы древесины к испарению влаги можно рекомендовать проводить прогрев древесины при температуре среды выше 50–60°C и $\varphi = 0,75–0,85$.

Заключение. В период прогрева древесины наблюдается заметный перепад температур на поверхности и внутри образца, что является причиной формирования неравномерного температурного поля по сечению древесины.

В свою очередь, возникновение разницы температур является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты.

В результате проведенных исследований достигнуты следующие результаты:

- определен характер изменения температуры поверхностных и внутренних слоев древесины во времени при различных условиях обрабатываемой среды;
- определен характер изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины во времени при различных условиях обрабатываемой среды;
- определен характер зависимости коэффициента термовлагопроводности от условий обрабатываемой среды во времени;
- произведена оценка влияния влажности древесины, толщины образца, степени насыщенности и температуры обрабатываемой среды на величину коэффициента термовлагопроводности и на характер ее изменения во времени.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что на величину коэффициента термовлагопроводности влияние оказывают все переменные факторы, что подтверждает необходимость разработки режимов прогрева, которые учитывают их все.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих режимов начального прогрева.

Список литературы

1. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 324 с.
2. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.
3. Рудак О. Г., Снопков В. Б. Изменение тепловых свойств древесины в период прогрева в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 46–49.
4. Рудак О. Г., Дорожко В. В., Мазаник Н. В. Особенности проведения начального прогрева замороженной древесины // Труды БГТУ. 2013. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 57–61.
5. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: ГосЭнергоИздат, 1956. 463 с.
6. Шубин Г. С. О коэффициентах переноса тепла и влаги в древесине // Деревообаб. пром-сть. 1989. № 8. С. 10–13.

7. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968. 255 с.
8. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.
9. Лыков А. В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 247 с.
10. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 335 с.
11. Шубин Г. С. О термовлагопроводности коллоидных капиллярно-пористых тел // Материалы VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену, г. Минск, 8–10 окт. 1980 г. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова. Минск, 1980. Т. VII. С. 18–25.

References

1. Krechetov I. V. *Sushka i zaschita drevesiny* [Drying and wood protection]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 324 p.
2. Krechetov I. V. *Sushka drevesiny* [Drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1980. 432 p.
3. Rudak O. G., Snopkov V. B. Change of thermal properties of wood during heating in unsaturated medium. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 181–185 (In Russian).
4. Rudak O. G., Dorozhko V. V., Mazanik N. V. Peculiarities of initial heating of frozen wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 123–128 (In Russian).
5. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass exchange in drying processes]. Moscow, GosEnergoPublishing, 1956. 463 p.
6. Shubin G. S. On heat and moisture transfer coefficient in wood. *Derevoobrabatyvayshaya promyshlennost* [Woodworking industry], 1989, no. 8, pp. 10–13 (In Russian).
7. Chudinov B. S. *Teoriya teplovoy obrabotki drevesiny* [Theory of wood heat treatment]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 255 p.
8. Sergovsky P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny: uchebnik dlya vuzov* [Hydrothermal processing and preservation of wood: textbook for universities]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1987. 360 p.
9. Lykov A. V. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods of determining thermal conductivity and thermal conductivity]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 413 p.
10. Shubin G. S. *Syshka i teployaya obrabotka drevesiny* [Drying and thermal processing of wood]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost Publ., 1990. 335 p.
11. Shubin G. S. On thermal conductivity of colloidal capillary-porous bodies. *Materialy VI Vsesoyuznoy konferentsii po teplomassoobmenu* [Materials of the VI All-union conference on heat and mass exchange]. Minsk, 1980, vol. 7, pp. 18–25 (In Russian).

Информация об авторе

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр технических наук, ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oksrudak@mail.ru

Information about the author

Rudak Oksana Gennadiyevna – Master of Engineering, Assistant Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: oksrudak@mail.ru