

УДК 647.047

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ

О. Г. РУДАК

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Приведены результаты исследования механизмов начального прогрева древесины сосны в ненасыщенной среде. Получены зависимости, отражающие характер изменения температуры и влажности на поверхности и внутри древесины во времени. Определены закономерности изменения величины перепада температуры и влажности образцов, имеющих различные параметры от степени насыщенности и температуры обрабатывающей среды, начальной влажности и толщины образцов. Обращено внимание на то, что в период прогрева древесины в ненасыщенной среде наблюдается заметный перепад температур как по толщине пиломатериала, так и между температурой поверхности образца и температурой обрабатывающей среды.

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

Ключевые слова: прогрев, температура древесины, перепад температур, перепад влажности.

INVESTIGATION OF MECHANISMS OF INITIAL HEATING OF PINE WOOD IN UNSATURATED ENVIRONMENT

O. G. RUDAK

Educational Institution "Belarusian State Technological University", Minsk

The author presents the results of investigation of mechanisms of initial heating of pine wood in unsaturated medium. The author obtained dependencies reflecting the nature of changes in temperature and humidity on the surface and inside the wood over time. He determined the patterns of change in the value of temperature difference and humidity of samples, having different parameters from the degree of saturation and temperature of the treatment medium, initial humidity and thickness of samples. The author drew attention to the fact that during the period of wood heating in unsaturated medium there is a noticeable temperature difference both in lumber thickness and between the temperature of the sample surface and the temperature of the treatment medium.

The results of studies can be used in the development of initial heating modes that improve the quality of products and reduce the energy costs of this process.

Keywords: heating, wood temperature, temperature drop, humidity drop.

Введение

В настоящее время удельный вес производства изделий из древесины в общем объеме промышленного производства Республики Беларусь составляет 4,8 %. На производство конкретно пиломатериалов приходится 27,4 %, или 5355 тыс. м³; на окна и двери из древесины – 2081 тыс. м², паркет – 848 тыс. м² [1]. Подготовка пиломатериалов к производству изделий подразумевает превращение древесины из природного сырья в промышленный материал с коренным улучшением ее свойств [2]. Сушка пиломатериалов – одна из важнейших операций в технологическом процессе лесопиления и деревообработки. Сушка предохраняет древесину от поражения деревоокрашивающими и дереворазрушающими грибами в процессе ее хранения и транспортировки, предупреждает размеро- и формоизменяемость древесины

в процессе хранения и эксплуатации изделий из нее, улучшает качество отделки и склеивания древесины.

Технологический процесс сушки древесины в основном состоит из шести обязательных этапов или фаз, первой из которых является *начальный прогрев*. Начальный прогрев проводится с целью доведения температуры высушиваемого материала до уровня температуры сушильного агента. Во время прогрева повышается теплопроводность древесины (за счет снижения вязкости влаги в капиллярах), в результате чего влага интенсивно перемещается из центральной зоны к поверхности материала. В конце данной операции древесина равномерно прогревается по толщине и ее теплопроводящая система подготовлена к началу сушки [4].

Существует два основных способа проведения начального прогрева в камерах с увлажнителем:

- 1) водяной пар;
- 2) холодная диспергированная вода.

В первом случае в сушильной камере создается высокая степень насыщенности среды φ , близкая к 1 ($\Delta t = 0,5-1,5$ °С). Во втором случае степень насыщенности среды φ в среднем поддерживается на уровне 0,8–0,85 ($\Delta t = 2,5-3,5$ °С).

Современные технологии сушки предполагают использование режимов начального прогрева, при которых степень насыщенности обрабатываемой среды $\varphi < 1$ (разница показаний психрометра Δt должна быть не более 5 °С). Продолжительность прогрева должна быть не менее 6 ч в зависимости от породы и толщины. Температура прогрева в большинстве случаев не превышает 70 °С. Изучением данного явления занимались многие ученые, среди них А. В. Лыков, Г. С. Шубин, Б. С. Чудинов [5]–[7]. Однако работы этих авторов предполагали изучение явлений теплопереноса для условий нагревания древесины в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$), т. е. прогрев в камерах с сушильным агентом – паром. Исследования же механизмов проведения начального прогрева в ненасыщенной среде ($\varphi < 1$) малочисленны [8], носят частный характер, недостаточно изучены и требуют дополнений.

Под механизмом начального прогрева следует понимать особенности протекания процесса и закономерности изменения температуры и влажности прогреваемого материала по его объему и во времени.

Цель исследования – определение механизмов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде с учетом влияния параметров агента обработки.

Основная часть

При проведении начального прогрева обязательными контролируемыми параметрами обрабатываемой среды являются [2], [4]: температура $T_{\text{ср}}$, °С; степень насыщенности φ ; психрометрическая разность Δt , °С.

Непосредственно для самих пиломатериалов основными параметрами являются: порода древесины, начальная влажность $W_{\text{нач}}$, %; температура T , °С; толщина S , мм [9], [10].

Методика проведения исследований

Изучение механизмов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде проводили в климатической камере модели ТХВ, оснащенной датчиками влажности древесины, а также датчиками влажности и температуры обрабатываемого агента. В комплекте климаткамеры предусмотрены датчики влажности, позволяющие фиксировать ее изменение с точностью ± 1 %. Частота измерения – каждые 5 с. Все значения выводятся на экран контроля камеры.

Для исследования температуры внутри и на поверхности древесины в период проведения эксперимента применяли оригинальную измерительную систему – авто-

матический измеритель температуры, имеющий восемь температурных датчиков модели DS18S20 с точностью измерения до 0,1 град. Частота измерения – каждые 5 с. Все значения выводятся на экран данного измерителя температур. Начальная влажность опытных образцов измерялась электровлагомером GANN HT 85.

В качестве экспериментального материала для исследования изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины в процессе начального прогрева в ненасыщенной среде использовались сосновые образцы радиальной распиловки толщиной $S = 20, 40, 60$ мм. Ширина пиломатериалов b равнялась 250 мм, что существенно превосходит их толщину, и, следовательно, перемещение тепла и влаги при прогреве происходило в основном в направлении, перпендикулярном пласти досок. Торцы образцов были изолированы.

Датчики влажности и температуры устанавливались на глубину 2–3 мм на поверхности и на $\frac{1}{2}$ толщины образца. Все датчики были изолированы пастой КПТ-8 во избежание влияния обрабатывающего агента на результаты измерений. Начальная температура всех элементов системы была одинаковой и равной температуре окружающей среды $t_0 = 15–20$ °С. Скорость воздуха была постоянной и составляла 1 м/с.

Экспериментальные образцы помещались в климатическую камеру, где производился их прогрев в ненасыщенной среде по установленному режиму. Прогрев проводили до тех пор, пока разница температур окружающей среды и внутренних слоев древесины не составляла 1–2 °С. Фиксируемыми параметрами в этом эксперименте являлись температура и влажность поверхностных и внутренних слоев древесины, а также продолжительность прогрева. Принципиальная схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Условия проведения экспериментальных исследований отражены в таблице.

Условия проведения эксперимента

Характеристика образцов			Характеристика обрабатывающего агента		
Размер сечения, мм		$W_{нач}$ %	Размер сечения, мм	$W_{нач}$ %	Размер сечения, мм
S	b				
20/40/60	250	> 30 %	40	0,7	12
				0,8	15,5
				0,9	21
			60	0,7	11
				0,8	14
				0,9	19
			80	0,7	9,7
				0,8	12
				0,9	16
20/40/60	250	< 30 %	40	0,7	12
				0,8	15,5
				0,9	21
			60	0,7	11
				0,8	14
				0,9	19
			80	0,7	9,7
				0,8	12
				0,9	16

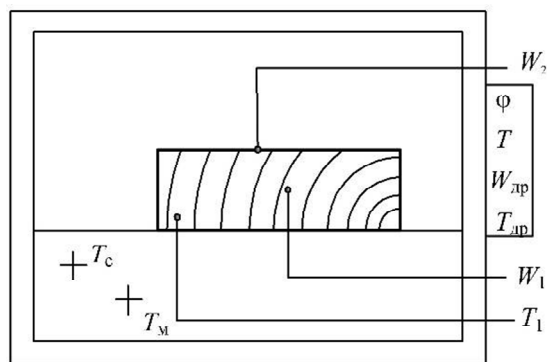


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Результаты исследований по условиям таблицы представлены в виде графических зависимостей на рис. 2–6. Поскольку характер изменения температурных и влажностных кривых по толщине образцов для одинаковых условий прогрева был идентичным, то для анализа показаны зависимости при граничных условиях режима.

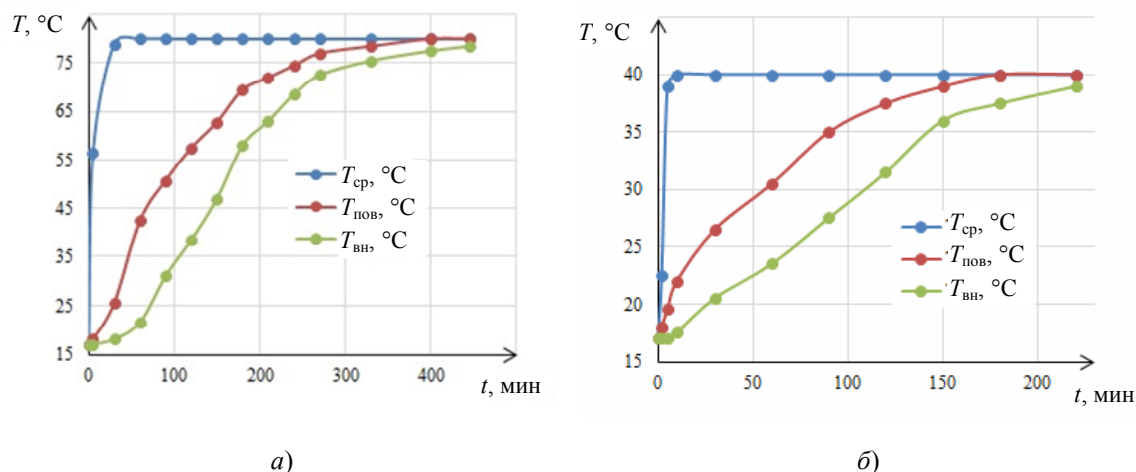


Рис. 2. Характер изменения температурных кривых при прогреве образцов толщиной $S = 20$ мм, $W_{\text{нач}} = 54\text{--}56\%$, $\varphi = 0,7$:
а – прогрев при $T = 40$ °С; б – прогрев при $T = 80$ °С

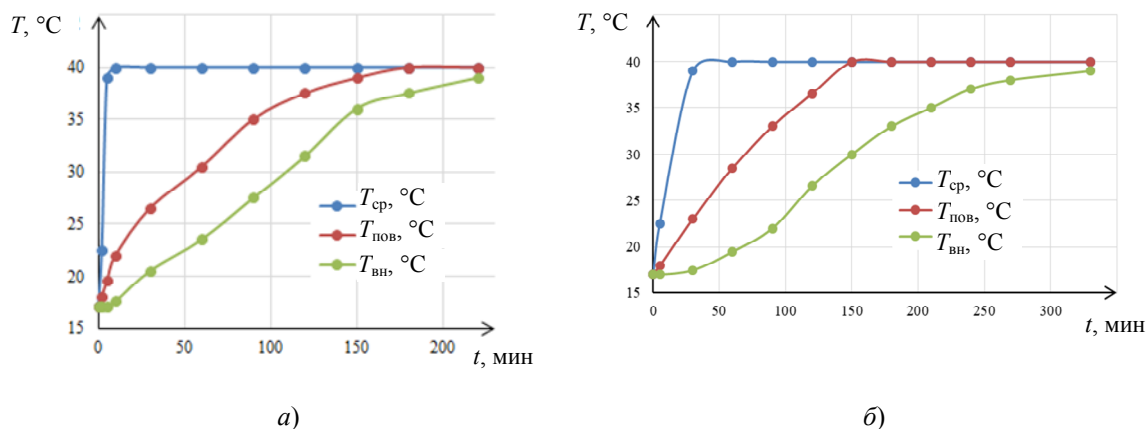


Рис. 3. Характер изменения температурных кривых при прогреве при $T_{\text{ср}} = 40$ °С, $W_{\text{нач}} = 54\text{--}56\%$, $\varphi = 0,7$:
а – прогрев при $S = 60$ мм; б – прогрев при $S = 20$ мм

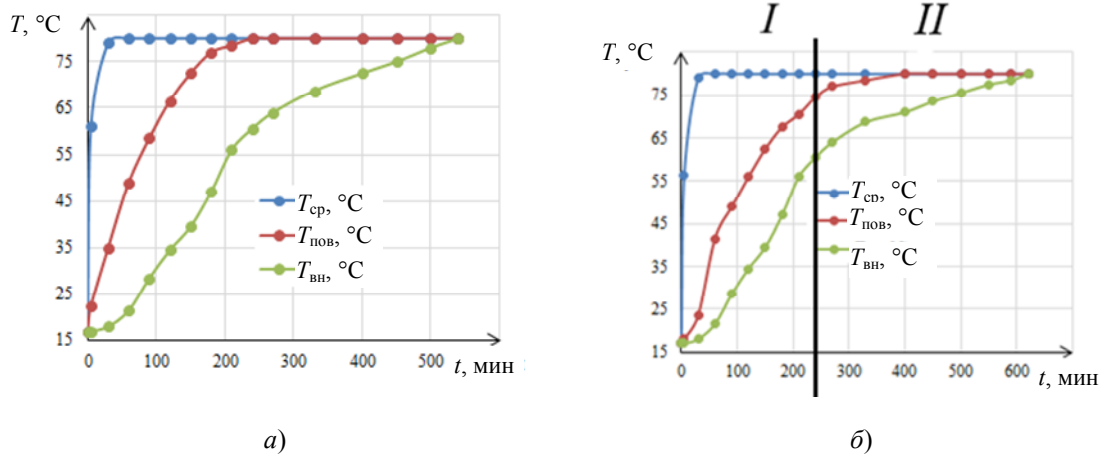


Рис. 4. Характер изменения температурных кривых при прогреве при $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{нач}} = 55\%$, $S = 60\text{ мм}$:
 а – прогрев при $\varphi = 0,7$; б – прогрев при $\varphi = 0,9$

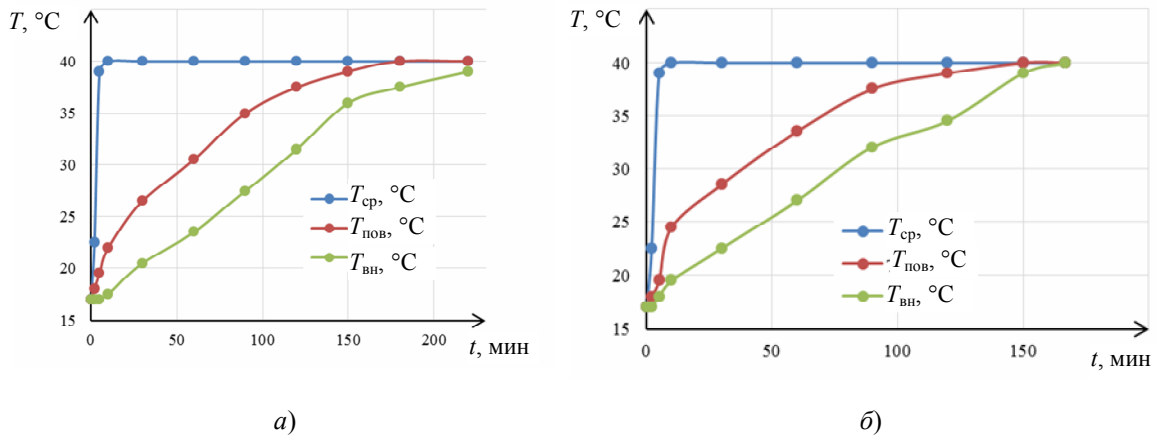


Рис. 5. Характер изменения температурных кривых при прогреве при $T_{\text{ср}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 0,7$, $S = 20\text{ мм}$:
 а – прогрев при $W_{\text{нач}} = 54\text{--}56\%$; б – прогрев при $W_{\text{нач}} = 28\text{--}29\%$

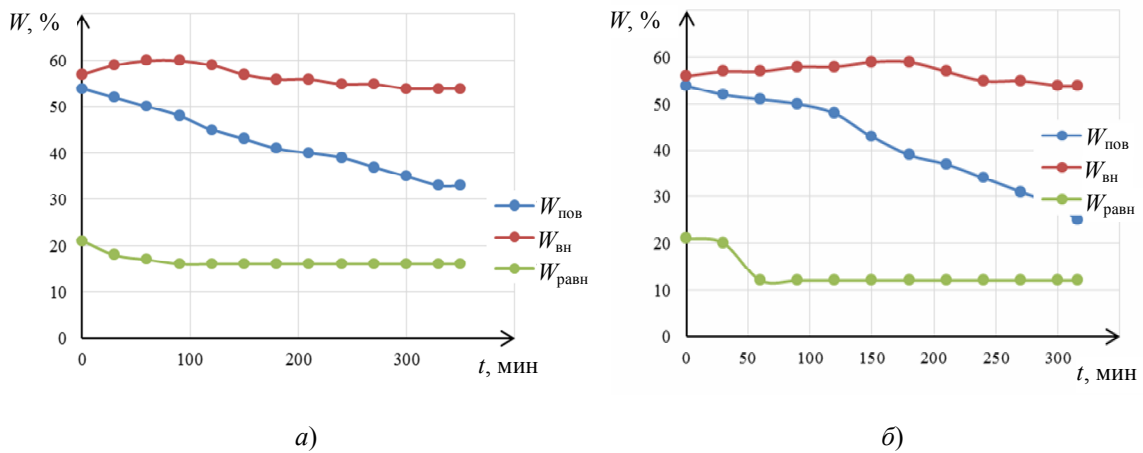


Рис. 6. Характер изменения кривых влажности при прогреве при $W_{\text{нач}} = 55\%$, $S = 20\text{ мм}$: а – прогрев при $T_{\text{ср}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 0,7$;
 б – прогрев при $T_{\text{ср}} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 0,9$

Анализ результатов исследования

Температура воздуха в климатической камере устанавливается на требуемом уровне (40–80 °С) 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.

Влияние температуры обрабатываемой среды

Анализируя данные эксперимента, представленные на рис. 2, можно заметить, что нагревание поверхностных слоев образцов древесины начинается сразу, а внутренних – с некоторым опозданием. Через 40–80 мин после начала процесса разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины и составляет 7,5 и 19,8 °С при температуре среды 40 и 80 °С соответственно. При дальнейшем нагревании различие температур поверхностных и внутренних слоев древесины постепенно убывает вплоть до момента достижения температуры поверхностных слоев температуры прогрева. 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 20 мм и начальной влажностью 54–56 % составила: 264 мин при температуре обрабатываемой среды 40 °С и 446 мин при температуре 80 °С. Также стоит отметить, что заметный перепад температур на поверхности и внутри образца является причиной формирования неравномерного температурного поля по сечению древесины. В свою очередь, возникновение разницы температур является причиной перемещения влаги по направлению потока теплоты.

Влияние толщины пиломатериала

Графические зависимости, представленные на рис. 3, показывают, что характер изменения температуры при различных толщинах образцов в одних и тех же условиях обрабатываемой среды идентичный. Разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины и составляет 7 и 11 °С при толщине пиломатериала 20 и 60 мм соответственно. Продолжительность прогрева для образца толщиной 20 мм составляет 264 мин, а для образца толщиной 60 мм – 330 мин. Таким образом, толщина образца оказывает наибольшее влияние на продолжительность прогрева, а скорость изменения температуры древесины остается практически одинаковой.

Влияние степени насыщенности обрабатывающего агента

По рис. 4 можно отследить характер изменения температурных кривых. Разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины и составляет 20 и 33 °С при $\varphi = 0,7$ и $\varphi = 0,9$ соответственно. Продолжительность прогрева $\varphi = 0,7$ составляет 621 мин, а для $\varphi = 0,9$ – 540 мин. Температура поверхности древесины достигает температуры среды через 180 мин для $\varphi = 0,9$ и 400 мин для $\varphi = 0,7$. Характер изменения температуры поверхностных слоев древесины при прогреве с $\varphi = 0,9$ близок к нагреванию в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$). Необходимо отметить, что продолжительность прогрева при $\varphi = 0,9$ меньше, чем при $\varphi = 0,7$. Данный факт можно объяснить тем, что воздух, насыщенный водяным паром, не способен воспринимать дополнительное количество воды, испарившейся из древесины. Соприкасаясь с образцом, он расходует свою тепловую энергию только на нагревание. По мере уменьшения степени насыщенности воздуха возникают два параллельно протекающих процесса: нагревание и сушка древесины.

Влияние величины начальной влажности образцов

На рис. 5 четко видно, что влияние величины начальной влажности образцов $W_{\text{нач}}$ на интенсивность нагревания значительно меньше, чем влияние геометрических размеров поперечного сечения, температуры влажности агента обработки. Наибольший перепад температур по сечению образца составляет 7,5 и 6,5 °С при $W_{\text{нач}} = 55$ и 28 % соответственно. Продолжительность прогрева для образца толщиной $W_{\text{нач}} = 55$ % составляет 264 мин, а для образца толщиной $W_{\text{нач}} = 28$ % – 177 мин. Разницу в продолжительности прогрева можно объяснить следующим образом. С поверхности более влажных образцов происходит более интенсивное испарение влаги и на это расходуется часть энергии, получаемой древесиной от обрабатывающей среды, что и приводит к более медленному прогреванию.

Обращает на себя внимание тот факт, что в процессе нагревания древесины возникает и длительное время поддерживается значительная разность 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.

Изменение влажности по сечению образца в период прогрева

Данные рис. 6 свидетельствуют, что изменение влажности поверхностных слоев образцов древесины начинается через 30–60 мин после начала прогрева, а внутренних – с некоторым опозданием. Перепад влажности на поверхности и внутри образцов ΔW достигает максимальной величины к концу процесса прогрева. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на характер изменения влажности поверхностных слоев древесины существенное влияние оказывает температура прогрева, степень насыщенности обрабатывающей среды, начальная влажность образцов. Толщина образцов оказывала влияние только на продолжительность процесса прогрева [11].

Нетрудно заметить, что стабилизация влажности на поверхности прогреваемых сортиментов происходит на уровне значения устойчивой влажности при десорбции, соответствующей заданным параметрам обрабатывающей среды. Перепад влажности по толщине пиломатериалов изменяется от 5–7 % в начале процесса до 24–29 % – в конце. Следовательно, в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги. Влага по объему пиломатериала всегда движется в сторону убывающей влажности. При определенном соотношении между влажностным и температурным градиентами эффект влагопроводности полностью компенсирует эффект термовлагопроводности, и по сечению образца устанавливается стационарное поле температуры и влажности, что мы и наблюдаем в конце эксперимента [12].

Подводя итоги исследования механизма проведения начального прогрева древесины в ненасыщенной среде, можно отметить, что интенсивность изменения температуры экспериментальных образцов на протяжении всего периода обработки происходит неравномерно. Сначала прогрев древесины происходит достаточно быстро со скоростью 30,6 °С/ч, а потом резко снижается и составляет около 6,8 °С/ч. При этом переход от периода быстрого нагревания к медленному происходит при достижении внутренними слоями древесины температуры, отличающейся от температуры

смоченного термометра на 5 °С (рис. 4, а). Следовательно, технологическая операция начального прогрева древесины в ненасыщенной среде может быть разделена на два периода – быстрого и медленного нагревания. Данный факт необходимо учитывать при разработке энергоэффективных режимов начального прогрева.

Заключение

Результаты исследования механизмов проведения начального прогрева древесины в ненасыщенной среде позволили получить следующие выводы:

1. С повышением температуры обрабатываемой среды увеличивается продолжительность процесса прогрева, а также возрастает перепад температур на поверхности и внутри древесины, что является причиной возникновения явления влагопереноса.

2. При увеличении начальной 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.

4. С повышением степени насыщенности среды уменьшается продолжительность процесса прогрева, а также возрастает скорость изменения температуры на поверхности древесины.

5. Прогрев древесины в ненасыщенной среде проходит в два периода – быстрого и медленного нагревания.

Литература

1. Снетков, А. С. Промышленность Республики Беларусь / А. С. Снетков // Статист. буклет. – Минск, 2020. – 52 с.
2. Кречетов, И. В. Сушка и защита древесины / И. В. Кречетов. – М. : Лесная пром-сть, 1987. – 324 с.
3. Болдырев, П. В. Сушка древесины : практ. рук. / П. В. Болдырев. – СПб. : Про-фикс, 2002. – 158 с.
4. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. – М. : Лесная пром-сть, 1980. – 432 с.
5. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М. : Гос-ЭнергоИздат, 1956. – 463 с.
6. Шубин, Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г. С. Шубин. – М. : Лесная пром-сть, 1990. – 335 с.
7. Чудинов, Б. С. Теория тепловой обработки древесины / Б. С. Чудинов. – М. : Наука, 1968. – 255 с.
8. Гороховский, А. Г. О начальном прогреве штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатываемой среды / А. Г. Гороховский, О. А. Удачина, Е. Е. Шишкина // Актуальные проблемы лесного комплекса : сб. науч. тр. – Брянск, 2006. – № 14. – С. 96–98.
9. Рудак, О. Г. Исследование начального прогрева древесины без дополнительного увлажнения обрабатываемой среды / О. Г. Рудак, В. Б. Снопков // Тр. БГТУ. – 2011. – № 2: Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. – С. 212–214.
10. Рудак, О. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния древесины при прогреве в ненасыщенной среде / О. Г. Рудак, Ю. А. Гуз, В. Б. Снопков //

Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф., Гродно. – Гродно : ГрГУ, 2011. – С. 30–31.

11. Рудак, О. Г. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде / О. Г. Рудак, А. Ю. Короб // Тр. БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 220–226.
12. Рудак, О. Г. Исследование явления термовлагопроводности при прогреве древесины в ненасыщенной среде / О. Г. Рудак // Тр. БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 233–238.

Получено 26.01.2021 г.