

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак

Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ

В статье приведены результаты исследования механизмов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде. Установлены основные параметры технологического процесса нагревания пиломатериалов, влияющие на продолжительность прогрева и на величину внутренних напряжений (качественная оценка). Получены графические зависимости изменения температуры и влажности поверхностных и внутренних слоев образцов во времени, которые характеризуют кинетику начального прогрева древесины. Для планирования эксперимента по определению продолжительности операции начального прогрева применяли В-план второго порядка. Построены двумерные поверхности функции отклика, представленной в виде квадратичной трехфакторной регрессионной модели. Приведены результаты аналитического расчета величины внутренних напряжений, возникающих на поверхности древесины в процессе прогрева в ненасыщенной среде. Произведен анализ влияния технологических факторов, таких как температура и степень насыщенности обрабатываемой среды, начальная температура и влажность древесины, толщина пиломатериалов, на основные закономерности нагревания древесины. На основе результатов исследований разработаны рекомендации по технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде. В данной работе обращается внимание на то, что при повышенной степени насыщенности и температуре обрабатываемой среды выше 50°C микроструктурные элементы древесины приобретают эластичность и пластичность, что, в свою очередь, способствует открытию пор и, соответственно, подготавливает влагопроводящую систему древесины к последующей сушке.

Ключевые слова: прогрев, технология, продолжительность, перепад температур, степень насыщенности.

Для цитирования: Рудак О. Г. Исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 268–276.

O. G. Rudak

Belarusian State Technological University

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE INITIAL WOOD HEATING TECHNOLOGY IN AN UNSATURATED ENVIRONMENT

The article presents the results of a study of the mechanisms of the initial heating of wood in an unsaturated environment. The main parameters of the technological process of heating sawn timber, which affect the duration of heating and the value of internal stresses (qualitative assessment), have been established. The graphical dependences of the temperature and humidity changes of the surface and inner layers of the samples in time were obtained, which characterize the kinetics of the initial heating of wood. To plan the experiment to determine the duration of the initial warm-up operation, the B-plan of the second order was used. Two-dimensional surfaces of the response function are constructed, presented in the form of a quadratic three-factor regression model. The results of an analytical calculation of the value of internal stresses arising on the surface of wood during heating in an unsaturated environment are presented. The analysis of the influence of technological factors, such as the temperature and degree of saturation of the processing environment, the initial temperature and moisture content of the wood, the thickness of lumber, on the basic laws of wood heating is carried out. Based on the research results, recommendations were developed for the technology of the initial heating of wood in an unsaturated environment. This work draws attention to the fact that with an increased degree of saturation and a temperature of the processing medium above 50°C, the microstructural elements of wood acquire elasticity and plasticity, which, in turn, contributes to the opening of pores, and, accordingly, prepares the moisture-conducting system of wood for subsequent drying.

Key words: heating, technology, duration, temperature difference, degree of saturation.

For citation: Rudak O. G. Study of the parameters of the initial wood heating technology in an unsaturated environment. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 268–276 (In Russian).

Введение. Одним из важнейших показателей экономической эффективности производства является снижение себестоимости готовой продукции без потерь ее качественных характеристик. Как известно, одной из наиболее энергозатратных операций деревообработки является сушка пиломатериалов. При этом существенная часть энергии расходуется не на саму сушку, а на проведение начального прогрева.

Основным назначением операции начального прогрева является повышение температуры пиломатериалов, предназначенных для сушки, до уровня температуры сушильного агента, а также подготовка влагопроводящей системы древесины к испарению влаги.

В настоящее время на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь широко используются сушильные камеры как зарубежных, так и отечественных производителей. Сушильные камеры марок СПЛК, СПВ, ВК и других были разработаны в 70-х гг. XX века. В качестве теплоносителя в таких сушильных установках выступал перегретый водяной пар, поэтому для таких условий были разработаны рекомендации по проведению камерной сушки древесины РТМ [1]. Однако в связи с существенными энергетическими затратами на производство перегретого водяного пара, сложностью в регулировке температуры теплоносителя, сложностью оборудования для производства и эксплуатации водяного пара применение такого неэкономичного теплоносителя на сегодняшний день является нецелесообразным.

Современные сушильные камеры в своем большинстве в качестве теплоносителя используют горячую воду. Технологические режимы, используемые в программном обеспечении систем автоматизации данных камер, позволяют производить сушку пиломатериалов при условии минимизации энергозатрат и вероятности возникновения брака в процессе сушки. Немаловажен и тот факт, что количественные значения параметров режима прогрева каждая фирма-производитель устанавливает согласно своим требованиям, соответственно, и технология прогрева разная. Однако, в связи с тем, что технологические режимы для данных камер разрабатывались на территории стран, климат в которых, в той или иной степени, отличается от климатических условий Республики Беларусь, при разработке данных режимов не были учтены некоторые факторы, характерные для белорусских деревообрабатывающих предприятий. Например, не учитывается, что на участки сушки в зимний период поступает замороженная древесина с $t_0 < 0^\circ\text{C}$.

Целью настоящей работы являлись исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде

во времени при различных условиях обрабатываемой среды.

Задача исследования – установить математическую зависимость продолжительности начального прогрева от степени насыщенности и температуры обрабатываемой среды, а также начальной температуры и влажности древесины.

Объектом исследования является технология начального прогрева пиломатериалов в ненасыщенной среде.

Предметом исследования выступает древесина как капиллярно-пористый коллоидный материал.

Основная часть. Согласно Руководящим техническим материалам по технологии камерной сушки древесины РТМ [1], для интенсивного начального прогрева древесины пар подают через увлажнительные трубы при включенных калориферах, работающих вентиляторах и закрытых приточно-вытяжных каналах. Кроме этого, для безопасного начального прогрева перед сушкой в камере создается высокая степень насыщенности среды при повышенной, по сравнению с первой ступенью режима сушки, температуре. Для создания высокой степени насыщенности психрометрическую разность поддерживают на уровне $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$ ($\varphi = 0,93\text{--}0,97$). Использование пара действительно легко позволяло достичь значений насыщенности сушильного агента, близких к 100%. Однако в современной литературе [2] степень насыщенности среды при прогреве в камерах с теплоносителем и увлажнителем водяного пара предлагают устанавливать иначе: для древесины с начальной влажностью более 25% – в пределах $0,98\text{--}1,00$, а для древесины с влажностью менее 25% – $0,90\text{--}0,92$.

Температуру среды $T_{\text{пр}}$ при прогреве пиломатериалов из древесины мягких хвойных пород (сосны, ели, кедра, пихты) поддерживают в зависимости от толщины и категории режима сушки по специализированной таблице. При прогреве пиломатериалов из других пород древесины температура среды на $5\text{--}8^\circ\text{C}$ выше температуры начальной ступени режима сушки (но не выше 100°C) [1].

Продолжительность процесса прогрева предлагают ориентировочно принимать равной: для мягких хвойных пород – 1,5 ч на каждый сантиметр толщины пиломатериалов; для мягких лиственных пород это время увеличивают на 25%; для твердых лиственных пород – на 50%, т. е. $\tau_{\text{нп. хв}} = 1,5 \cdot S$; $\tau_{\text{нп. л. лств}} = 1,5 \cdot S \cdot 1,25$; $\tau_{\text{нп. тв. лств}} = 1,5 \cdot S \cdot 1,5$.

Древесину выдерживают при указанных параметрах до тех пор, пока разность между температурой среды и температурой в центре доски не достигнет 3°C . После этого температура среды снижается до уровня первой ступени

сушки без отключения циркуляционной системы сушильной камеры. При соблюдении такого режима прогрева не происходит снижения влажности поверхностных слоев древесины и, следовательно, накопления в материале напряжений. Это делает операцию начального прогрева безопасной, но удлиняет процесс, так как собственно сушка на данной стадии не происходит [3].

На сегодняшний день большинство предприятий деревообрабатывающей отрасли перешло на использование более дешевого и простого в эксплуатации теплоносителя – горячей воды. Выбор обусловлен преимуществами воды как теплоносителя: высокая плотность, удельная теплоемкость, сравнительно низкая вязкость, высокие значения коэффициента теплоотдачи, низкая химическая активность, нетоксичность, дешевизна и доступность, возможность регулирования уровня температуры.

Однако переход на воду предсказуемо повлек за собой изменение традиционной технологии начального прогрева. Так, при увлажнении сушильного агента в период прогрева вода подается в пространство камеры в диспергированном виде через систему форсунок, установленных на увлажнительной трубе.

Таким образом, само увлажнение получается не прямым, как в случае пара, а опосредованным, происходящим в процессе перехода диспергированной влаги в парообразное состояние. Данный метод менее эффективен и не позволяет быстро достигать высоких значений насыщенности сушильного агента. Поэтому фактически прогрев пиломатериалов в камерах, использующих в качестве теплоносителя воду, происходит в ненасыщенной среде. Предварительные исследования показали, что значение насыщенности воздуха при этом колеблется в диапазоне $\phi = 70\text{--}90\%$. Следует также отметить, что применение в качестве теплоносителя горячей воды с температурой 95°C обеспечивает максимальную температуру обрабатывающего агента внутри камеры не более $80\text{--}83^\circ\text{C}$. Данный факт показывает, что максимальная температура как сушки, так и прогрева не может превышать 80°C . Также следует обратить внимание, что продолжительность операции начального прогрева строго не регламентируется. Более того, у разных производителей при одинаковых толщинах пиломатериалов, температуре прогрева и степени насыщенности обрабатывающей среды продолжительность нагревания устанавливается от 6 до 14 ч [4]. Кроме того, одни производители проводят начальный прогрев в условиях, близких к насыщению, а другие – при параметрах среды, соответствующих первой ступени сушки.

Таким образом, возникает необходимость разработки технологии начального прогрева

древесины в ненасыщенной среде, которая будет соответствовать реальным производственным условиям в Республике Беларусь. Режимы начального прогрева должны быть основаны на рациональном использовании энергоресурсов и учитывать качество получаемой продукции.

Технологический процесс начального прогрева характеризуется следующими обязательными контролируемыми параметрами обрабатывающего агента [5]:

- 1) температура T , $^\circ\text{C}$;
- 2) степень насыщенности ϕ ;
- 3) психрометрическая разность ΔT , $^\circ\text{C}$.

У прогреваемых пиломатериалов основными параметрами являются порода древесины, начальная влажность и температура, толщина [6].

Изучение механизмов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде проводили в климатической камере модели ТХВ, оснащенной датчиками влажности и температуры обрабатывающего агента, а также измерительной установкой, состоящей из датчиков, фиксирующих влажность и температуру древесины, с выводом результатов на экран (рис. 1) [7].



Рис. 1. Общий вид измерительной установки

В качестве экспериментального материала для исследования изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины в процессе начального прогрева в ненасыщенной среде использовались сосновые образцы смешанной распиловки толщиной $S = 20, 40, 60$ мм. Ширина пиломатериалов b равнялась 250 мм. Начальная влажность опытных образцов измерялась электровлагомером GANN HT 85.

Фиксируемыми параметрами в этом эксперименте являлись температура и влажность поверхностных и внутренних слоев древесины, а также продолжительность прогрева τ в минутах. Эксперимент проводился для четырех разных условий: начальной влажности образцов $W_{\text{нач}} < 30\%$, $W_{\text{нач}} > 30\%$ и начальной температуре $t_0 > 0^\circ\text{C}$, $t_0 < 0^\circ\text{C}$.

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 2–3°C.

Условия проведения экспериментальных исследований, а именно параметры обрабатывающего агента были определены на основе анализа априорной информации как теоретического, так и практического материала. Результатом данного анализа выступает определение экспериментальной области факторного пространства, которое заключается в выборе основного (нулевого) уровня и интервалов варьирования факторов. Минимальная температура начального прогрева устанавливалась на уровне 40°C, а максимальная – 80°C (исходя из возможностей теплоносителя). Степень насыщенности обрабатывающей среды устанавливали в диапазоне от 0,7 до 0,9. Выбор такого диапазона влажности воздуха обусловлен не только возможностями создания определенной степени насыщенности диспергированной водой, но и многочисленными исследованиями процессов сушки древесины, в ходе которых установлено, что при низких значениях ϕ

происходит интенсивная сушка поверхностных слоев древесины, что противоречит основной цели самой операции начального прогрева.

По результатам экспериментов были построены графические зависимости изменения температуры и влажности поверхностных и внутренних слоев образцов во времени, которые характеризуют кинетику начального прогрева. Общий вид кинетических кривых температуры и влажности древесины приведен на рис. 2 и 3.

Математическое планирование эксперимента применяется для повышения эффективности проведения исследований. С учетом существующих рекомендаций авторов [8] для получения регрессионных моделей, с помощью которых описывают выходные характеристики процесса нагрева древесины, наиболее удобно использовать планы второго порядка типа B_k . Варьируемыми факторами являлись:

- 1) температура обрабатывающей среды ($T = X_1$);
- 2) толщина пиломатериалов ($S = X_2$);
- 3) степень насыщенности обрабатывающей среды ($\phi = X_3$).

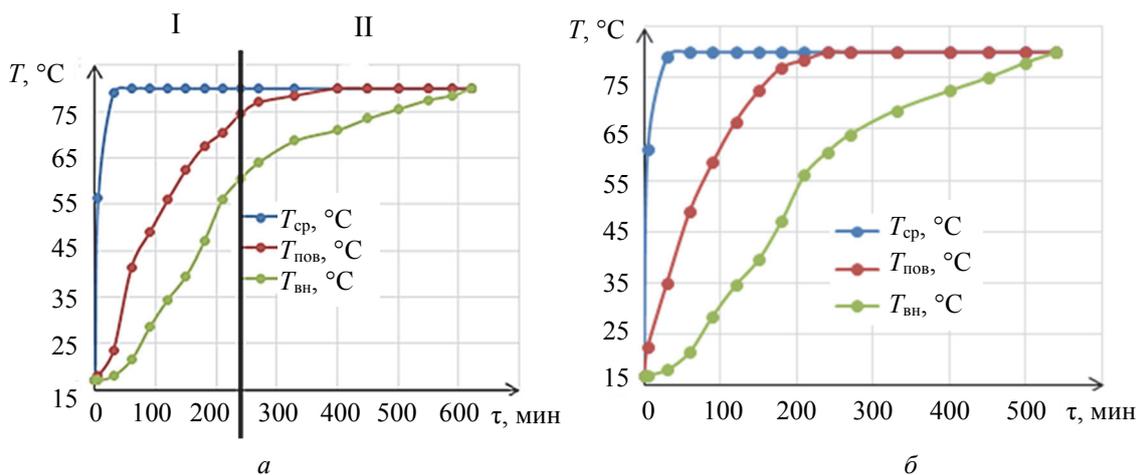


Рис. 2. Характер изменения температурных кривых при прогреве с $T = 80^\circ\text{C}$, $W_{\text{нач}} = 55\%$, $S = 60$ мм:
 а – прогрев при $\phi = 0,7$; б – прогрев при $\phi = 0,9$

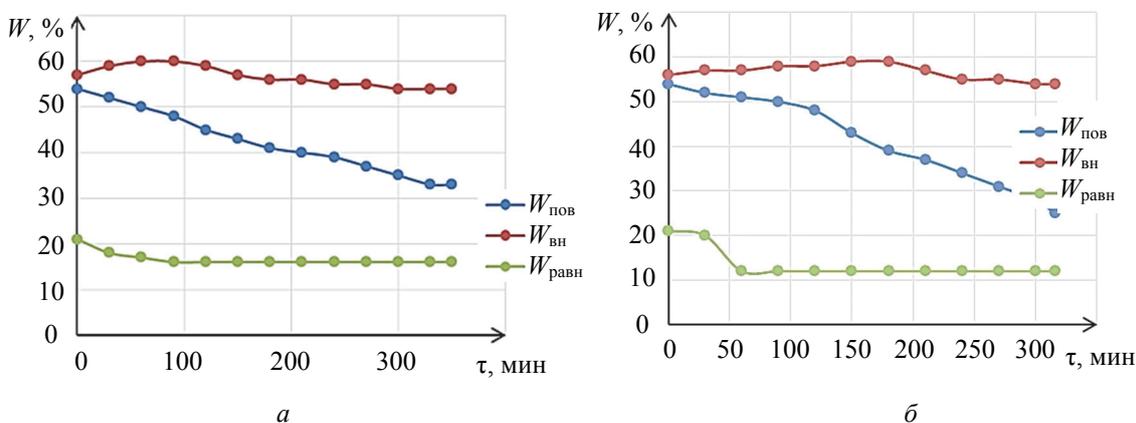


Рис. 3. Характер изменения кривых влажности при прогреве, $W_{\text{нач}} = 55\%$, $S = 20$ мм:
 а – прогрев при $T_{\text{ср}} = 40^\circ\text{C}$ и $\phi = 0,7$; б – прогрев при $T_{\text{ср}} = 80^\circ\text{C}$ и $\phi = 0,9$

В качестве функции отклика рассматривалась продолжительность достижения центрального слоя древесины температуры среды. В соответствии с методикой [8] каждый фактор варьировался на трех уровнях, т. е. принимал в каждом опыте одно из трех значений: наименьшее X_{\min} , наибольшее X_{\max} либо среднее $X_{\text{ср}} = (X_{\min} + X_{\max}) / 2$. Таким образом, при диапазоне варьирования 40–80°C температура в эксперименте устанавливалась на уровнях 40, 60, 80°C. Диапазон изменения толщин составил 20–60 мм, уровни варьирования соответственно 20, 40 и 60 мм [9]. Диапазон изменения влажности воздуха 0,7–0,9%, уровни варьирования соответственно 0,7; 0,8 и 0,9%.

На основе экспериментальных данных были определены регрессионные зависимости функции отклика от независимых факторов. Для условий эксперимента при начальной влажности пиломатериалов $W_{\text{нач}} < 30\%$ и их начальной температуре $t_0 > 0^\circ\text{C}$ математическая модель продолжительности прогрева в натуральных величинах имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau = & 1418,6 - 4,4 \cdot t + 1,34 \cdot S - 2725,6 \cdot \varphi + \\ & + 0,04975 \cdot t \cdot S - 6,0625 \cdot S \cdot \varphi - 1,25 \cdot t \cdot \varphi + \\ & + 0,049 \cdot t^2 + 0,055 \cdot S^2 + 1760 \cdot \varphi^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – температура обрабатывающей среды, °C; φ – степень насыщенности обрабатывающей среды, %; S – толщина пиломатериалов, мм.

На нижеследующих поверхностях отклика, построенных на основе модели, можно видеть, как меняется продолжительность прогрева при фиксированном значении степени насыщенности φ (рис. 4, 5, 6).

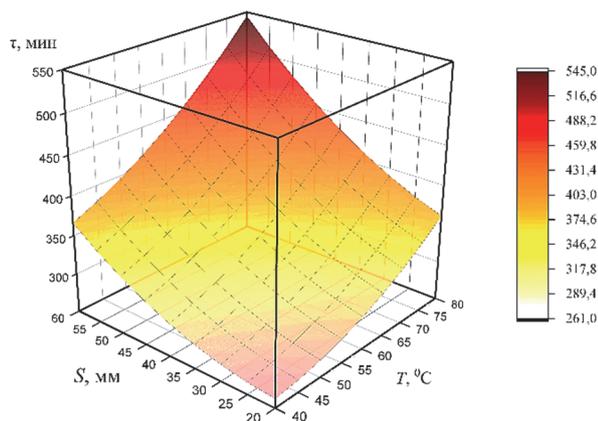


Рис. 4. Продолжительность прогрева при степени насыщенности $\varphi = 0,7$

Полученная зависимость позволяет прогнозировать продолжительность прогрева материалов при различных сочетаниях переменных факторов.

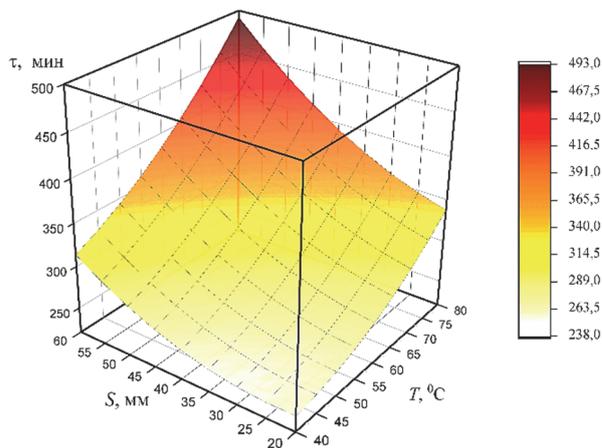


Рис. 5. Продолжительность прогрева при степени насыщенности $\varphi = 0,8$

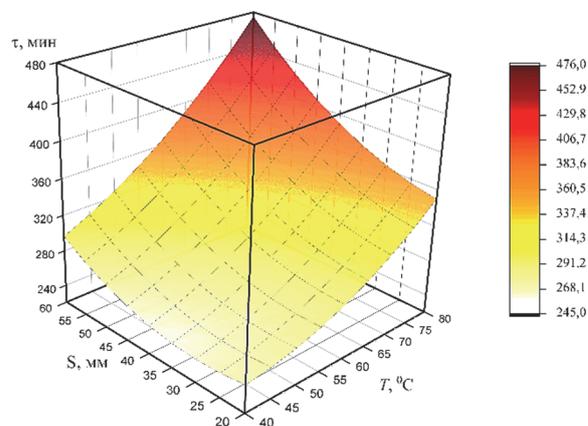


Рис. 6. Продолжительность прогрева при степени насыщенности $\varphi = 0,9$

Проверка уравнения регрессии с использованием критерия Фишера подтвердила адекватность данной модели. При анализе данных графических зависимостей температурных кривых при прогреве обращает на себя внимание тот факт, что в процессе нагревания древесины возникает и длительное время поддерживается значительная разность температур среды и поверхности образца древесины, а также поверхности и внутренних слоев образца. Это однозначно свидетельствует о том, что нагревание сопровождается испарением влаги с поверхности древесины, т. е. об одновременном протекании тепло- и влагопереноса. 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.

На рис. 3, нетрудно заметить, что стабилизация влажности на поверхности прогреваемых сортиментов происходит на уровне значения

устойчивой влажности при десорбции, соответствующей заданным параметрам обрабатываемой 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 [7].

Однако перепад температуры препятствует движению влаги от центра к поверхности образца и одновременно уменьшает интенсивность теплообмена с обрабатываемой средой за счет уменьшения разности температур между температурой среды и температурой поверхности материала, при этом зона испарения перемещается во внутрь пиломатериала. Известно, что при удалении свободной влаги от центра материала к поверхности она движется только под действием градиента капиллярного давления [10]. В результате испарения влаги с поверхности древесины создается «пересушенный поверхностный слой», который препятствует передаче тепла (из-за уменьшения теплопроводности древесины) от сушильного агента внутрь образца, а также – свободная влага, испаряясь, забирает часть тепла. Следовательно, отрицательный градиент температуры препятствует градиенту влажности, влагопроводность в период прогрева не изменяется, оставаясь на прежнем уровне.

Следует отметить, что при значении температуры древесины выше 56°C наступает переходный период: возрастает влагопроводность и основной движущей силой в удалении влаги становится градиент влажности. С самого начала сушильного процесса влага движется к поверхности доски (в незначительной степени) в виде жидкости и в большей – в виде диффундирующего пара. Это явление объясняется увеличением коэффициента диффузии водяного пара и снижением вязкости жидкой влаги в капиллярах древесины при повышении температуры. Молекулы воды, преодолевая сопротивление мембран пор клеточных оболочек при повышенных температурах, стимулируют стабильный поток жидкой влаги к поверхности древесины. Но вместе с этим по направлению движения теплового потока движется и влага, т. е. от поверхности к внутренним слоям древесины. Градиенты влажности и температуры направлены

противоположно, процесс непосредственного интенсивного удаления влаги осложнен.

Следовательно, начальный прогрев в ненасыщенной среде не позволяет реализовать потенциальные возможности основного закона влагопереноса, который регламентирует преобладающее влияние на плотность потока перемещения влаги именно коэффициента влагопроводности, поэтому и сушка, как таковая, отсутствует. Также стоит отметить, что интенсивность изменения влажности поверхностных слоев древесины тем больше, чем больше разность ΔT между температурой обрабатываемой среды $T_{\text{ср}}$ и температурой в центральных слоях образцов $T_{\text{вн}}$. Это можно объяснить положительным влиянием явления термовлагопроводности.

Прогрев древесины с начальной температурой $t_0 < 0^\circ\text{C}$ позволил установить, что отрицательная начальная температура пиломатериалов оказывает значительное влияние на продолжительность операции прогрева, особенно для образцов с начальной влажностью $W_{\text{нач}} > 30\%$. Исследование кинетики прогрева образцов с $W_{\text{нач}} < 30\%$ показало, что при нагреве замороженной древесины имеет место значительное отставание в росте температуры внутреннего слоя от повышения температуры поверхностных слоев, сохраняющееся в течение практически всего периода прогрева. Данный температурный градиент инициирует явление термовлагопроводности, противодействующее влагопроводности в большей степени, чем это наблюдается в древесине с положительной начальной температурой. Тем не менее эксперимент не выявил стабилизации температуры внутреннего слоя на отметке 0°C , что соответствовало бы плавлению свободной замороженной влаги в полостях клеток древесины (в отличие от образцов с $W_{\text{нач}} > 30\%$). Это подтверждает теорию о том, что содержание льда в древесине с температурой до -10°C крайне мало ввиду того, что свободная влага представляет собой раствор органических и минеральных веществ.

При подведении итогов исследования механизма проведения начального прогрева древесины в ненасыщенной среде обратил на себя внимание один интересный факт. Интенсивность изменения температуры экспериментальных образцов на протяжении всего периода обработки происходит неравномерно. Сначала прогрев древесины происходит достаточно быстро, со скоростью $30,6^\circ\text{C}/\text{ч}$, а потом резко снижается и составляет около $6,8^\circ\text{C}/\text{ч}$. Причем переход от периода быстрого нагревания к медленному происходит при достижении внутренними слоями древесины температуры, отличающейся от температуры смоченного термометра на 5°C (рис. 2, 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.

Изменение влажности поверхностных слоев древесины, описанное выше, предполагает развитие внутренних напряжений в древесине уже на этапе начального прогрева, что, в свою очередь, является причиной возникновения дефектов сушки (трещины, коробления). Следует отметить, что древесина подвергается усушке, если ее влажность меньше влажности предела насыщения клеточных стенок. Известно, что если влажность поверхностных слоев меньше влажности предела насыщения клеточных стенок, то они испытывают деформации растяжения. Влажность внутренних слоев древесины больше влажности предела насыщения клеточных стенок, и напряжения в них не возникают. Для вышеописанного напряженно-деформированного состояния древесины Б. Н. Уголевым была предложена формула (2) для расчета величины влажностных напряжений, МПа [11]:

$$\sigma = \alpha \cdot E_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta W) \times \left[\Delta W - \frac{\Delta W_{\max} \cdot x \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot \beta \cdot \Delta W_{\max})}{2R + \beta \cdot \Delta W_{\max} \cdot x} \right], \quad (2)$$

где α – коэффициент усушки; β – коэффициент, учитывающий зависимость модуля упругости E от перепада влажности; ΔW – перепад влажности, %; ΔW_{\max} – максимальный перепад влажности, %; x – глубина испарения, мм; R – половина толщины доски, мм.

С использованием приведенной формулы и результатов предыдущего эксперимента были выполнены аналитические расчеты величины внутренних напряжений, возникающих при прогреве древесины в ненасыщенной среде. Характер изменения величины напряжений для сосновых пиломатериалов разной толщины оказался идентичным.

Результаты аналитического расчета показывают, что в процессе прогрева в ненасыщенной среде на поверхности древесины с начальной влажностью возникают растягивающие внутренние напряжения. Однако они не превышают допустимого значения $\sigma = 5,4$ МПа и, более того, меньше его в десятки раз. Это говорит о том, что имеется возможность максимально приблизить величину температуры и степень насыщенности обрабатываемой среды к параметрам режима сушки, поддерживая на безопасном уровне величину внутренних напряжений. Этот технологический прием позволит сократить общую

продолжительность процесса сушки древесины и снизить энергозатраты.

Дополнительное удаление влаги при прогреве и непосредственно на первой ступени сушки экономит расход диспергированной воды для создания требуемого параметра степени насыщенности обрабатываемой среды, причем чем выше температура прогрева, тем больше этот эффект. Также испаренная из пиломатериала влага изменит количество водяного пара в обрабатываемой среде на определенную величину [12].

На основе результатов исследований разработаны рекомендации по технологии начального прогрева.

1. Поскольку древесина является теплоизоляционным материалом, плохо поглощающим тепло, то во избежание разности температуры между поверхностью и внутренними слоями древесины рекомендуется не допускать больших ее перепадов (15–18°C), т. е. прогрев необходимо проводить медленно и равномерно.

2. Прогрев древесины при высокой температуре и низкой степени насыщенности обрабатываемой среды может приводить к такому феномену, как «цементация», или закупоривание пор, из-за интенсивного испарения с поверхности, что значительно затруднит последующий процесс продвижения влаги к поверхности и ее испарение. Во избежание этой неприятности прогрев следует проводить при высокой степени влажности воздуха ($\phi = 0,8-0,9$), так, чтобы равновесная влажность прогреваемой древесины была близка к 15–19% (с начальной степенью влажности $W_{\text{нач}} > 30\%$), а пиломатериалы с начальной влажностью $W_{\text{нач}} < 30\%$ рекомендуется прогревать в среде сушильного агента, степень насыщенности ϕ которого по диаграмме равновесной влажности соответствуют начальной влажности материала.

3. При повышенной степени влажности и температуре обрабатываемой среды микроструктурные элементы древесины приобретают эластичность и пластичность, что способствует открытию пор, а это подготавливает влагонепроницающую систему древесины к последующей сушке.

4. Многие породы древесины подвержены поражению грибком, который развивается при температурах от 10 до 45–50°C, поэтому прогревать древесину нужно выше 50°C, и быстрое прохождение этого диапазона уменьшает риск развития такого видимого дефекта, как «синева».

5. Начальный прогрев древесины при температуре выше 56°C способствует снижению вязкости влаги в капиллярах, что, в свою очередь, повышает влагонепроницаемость древесины, в результате чего влага интенсивно перемещается из центральной зоны к поверхности материала.

Следует отметить, что под действием перепада температур на поверхности и внутри древесины возникает интенсивный поток влаги от более горячих зон к более холодным даже в тех случаях, когда холодная зона оказывается более влажной [13]. Поэтому сушка не должна начинаться до полного прогрева (сквозного по толщине досок). Это значит, что температура в центре сечения досок до начала сушки должна быть не ниже температуры по мокрому термометру психрометра для 1-й ступени сушки.

6. Учитывая рекомендации, указанные в п. 3–5, температуру начального прогрева необходимо устанавливать в диапазоне 50–65°C. Более высокая температура прогрева увеличивает его продолжительность, что может приводить к завышенному расходу энергоресурсов.

7. Продолжительность начального прогрева можно выбирать согласно разработанной на основе математической модели таблицы с учетом следующих параметров: начальной температуры и влажности пиломатериала, его толщины, а также температуры и степени насыщенности обрабатываемой среды, установленных согласно режиму. Следует отметить, что данная таблица учитывает и время на нагревание древесины от отрицательной температуры до 0°C, и время на плавление льда, содержащегося в древесине.

8. Прогрев древесины в ненасыщенной среде проходит в два периода – быстрого и медленного нагревания. В первом периоде преобладает градиент температуры и интенсивной сушки не происходит. Во втором периоде перепад температуры по толщине уменьшается, а перепад влажности увеличивается, а это говорит о том, что происходит движение влаги под действием градиента влажности. Интенсивность испарения ограничивается высокой степенью насыщенности обрабатываемой среды.

Заключение. В период начального прогрева древесины в ненасыщенной среде наблюдается перепад температуры и влажности на поверхности и внутри образца. В свою очередь, возникновение перепада влажности является причиной

перемещения влаги по направлению от центральных слоев к периферийным. В результате проведенных исследований разработаны рекомендации по технологии начального прогрева.

Математическое моделирование экспериментальных исследований позволило получить регрессионную модель для определения продолжительности начального прогрева в ненасыщенной среде.

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 ее температуры 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 прогрева, а также возрастает скорость изменения температуры на поверхности древесины.

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

6. Изменение влажности поверхностных слоев древесины ниже влажности предела насыщения клеточных стенок является причиной возникновения внутренних растягивающих напряжений, однако они не превышают допустимого значения $\sigma = 5,4$ МПа и, более того, меньше его в 8–10 раз.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих режимов начального прогрева древесины.

Список литературы

1. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 92 с.
2. Фридман И. Н. Деревообработка. Практическое руководство. С.-Петербург: Профикс, 2003. 543 с.
3. Вилейшикова Н. В., Донченко Л. Ф., Снопков В. Б. Изучение режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2002. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 177–183.
4. Рудак О. Г., Короб А. Ю. Исследование характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины сосны при прогреве в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (234). С. 162–169.
5. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесная пром-сть, 1980. 432 с.
6. Рудак О. Г., Снопков В. Б. Изменение тепловых свойств древесины в период прогрева в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2012. № 2 (149): Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 161–164.

7. Рудак О. Г. Исследование явления термовлагопроводности при прогреве древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (240). С. 233–238.
8. Пижурич А. А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 305 с.
9. Рудак О. Г., Мазаник Н. В., Снопков В. Б. Применение математического моделирования для определения продолжительности начального прогрева в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2013. № 2 (158): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 146–149.
10. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины: М.: Лесная пром-сть, 1987. 360 с.
11. Уголев, Б. Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. М.: Лесная пром-сть, 1971. 264 с.
12. Рудак О. Г. Изменение влажности пиломатериалов по толщине при прогреве в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 165–167.
13. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: ГосЭнергоИздат, 1956. 463 с.

References

1. *Rykovodyashchiye tekhnicheskiye materialy po tekhnologii kamernoy sushki drevesiny* [Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood]. Arhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1985. 92 p.
2. Fridman I. N. *Derevoobrabotka. Prakticheskoye rykovodstvo* [Woodworking. A practical guide]. St. Petersburg, Profiks Publ., 2003. 543 p.
3. Vileishikova N. V., Donchenko L. F., Snopkov V. B. Study of the modes of initial heating of wood in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2002, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 177–183 (In Russian).
4. Rudak O. G., Korob A. Yu. Investigation of the nature of changes in the humidity of the surface and inner layers of pine wood during heating in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2021, no. 1 (234): Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, pp. 162–169 (In Russian).
5. Krechetov I. V. *Sushka drevesiny* [Drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 432 p.
6. Rudak O. G., Snopkov V. B. Changes in the thermal properties of wood during heating in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2 (149): Forest and Woodworking Industry, pp. 161–164 (In Russian).
7. Rudak O. G. Investigation of the phenomenon of thermal and moisture conductivity during the heating of wood in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2020, no. 2 (240): Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, pp. 233–238 (In Russian).
8. Pizhurin A. A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Fundamentals of scientific research in woodworking]. Moscow, GOU VPO MGUL Publ., 2005. 305 p.
9. Rudak O. G., Mazanik N. V., Snopkov V. B. Application of mathematical modeling for determining the duration of initial heating in an unsaturated medium. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 2 (158): Forest and Woodworking Industry, pp. 146–149 (In Russian).
10. Sergovsky P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny* [Hydrothermal processing and preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p.
11. Ugolev, B. N. *Deformativnost' drevesiny i napryazheniya pri sushke* [Deformativeness of wood and stress during drying]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 264 p.
12. Rudak O. G. Change in the moisture content of lumber by thickness when heated in an unsaturated environment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 165–167 (In Russian).
13. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow, GosEnergoIzdat Publ., 1956. 463 p.

Информация об авторе

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр технических наук, старший преподаватель 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, Senior 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

Поступила 22.03.2021