

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак

Белорусский государственный технологический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ (ОБЗОР)

В статье приводятся результаты аналитического обзора научной литературы по вопросам технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде перед конвективной сушкой. Анализ результатов научных исследований в области технологии сушки древесины свидетельствует о наличии фундаментальных знаний в области тепломассопереноса, что является основной теоретической базой для моделирования тепловых процессов в период прогрева, а также прогнозирования динамики изменения свойств пиломатериалов. Отмечено, что переход на новый вид теплоносителя, кардинальное изменение вида ограждающих конструкций лесосушильных камер повлекли за собой изменение технологии проведения начального прогрева древесины в среде ненасыщенного влагой воздуха. Большинство предприятий деревообрабатывающей отрасли Республики Беларусь перешло на использование более дешевого и простого в эксплуатации теплоносителя – горячей воды, что предполагает проведение операции начального прогрева при степени насыщенности среды φ на уровне 0,80–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5$). Сделан вывод об отсутствии на сегодняшний день единого подхода к технологии начального прогрева в ненасыщенной среде. С целью повышения технико-экономической эффективности процесса прогрева древесины предлагается разработать математическую модель определения продолжительности данной операции; установить характер и величину внутренних напряжений в древесине; рассчитать расход энергии для различных условий нагревания; определить влияние технологических факторов на величину перепадов температуры и влажности древесины при прогреве; изучить характер изменения тепловых свойств древесины во времени в нестационарных условиях; выявить закономерности изменения температуры и влажности пиломатериала во времени в период прогрева в ненасыщенной среде.

Ключевые слова: начальный прогрев, теплоноситель, тепломассоперенос, технология, сушка, древесина, продолжительность.

Для цитирования: Рудак О. Г. Современные представления о технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 193–203. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-22.

O. G. Rudak

Belarusian State Technological University

CURRENT UNDERSTANDING OF THE TECHNOLOGY OF INITIAL HEATING OF WOOD IN AN UNSATURATED ENVIRONMENT (REVIEW)

The article presents the results of an analytical review of the scientific literature on the technology of initial heating of wood in unsaturated medium before convective drying. The analysis of the results of scientific research in the field of wood drying technology shows the existence of fundamental knowledge in the field of heat and mass transfer, which is the main theoretical basis for modeling thermal processes during the heating period, as well as predicting the dynamics of changes in the properties of lumber. It is noted that the transition to a new type of coolant, a radical change in the type of enclosure structures of timber drying chambers led to a change in the technology of the initial heating of wood. The majority of the enterprises in woodworking industry of Belarus has passed to the use of cheaper and easy-to-use heat-carrier – hot water, which supposes the carrying out of the initial heating operation at the level of the medium saturation φ at 0,8–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5$). It is concluded that to date there is no unified approach to the technology of initial heating in an unsaturated medium. To improve the technical and economic efficiency of the process of heating wood it is proposed to develop a mathematical model to determine the duration of this operation, establish the nature and value of the internal stress in wood, determine the energy consumption for different heating conditions, determine the impact of technological factors on the value of the temperature and humidity differences in the wood during heating, to study the nature of the thermal properties of wood in time in non-stationary conditions, establish the patterns of change.

Keywords: initial heating, heat transfer medium, heat and mass transfer, technology, drying, wood, duration.

For citation: Rudak O. G. Current understanding of the technology of initial heating of wood in an unsaturated environment (review). *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 193–203. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-22 (In Russian).

Введение. В Республике Беларусь древесина является одним из основных возобновляемых природных ресурсов и важнейших национальных богатств. Площадь земель, покрытых лесами, составляет около 8333,2 тыс. га, или 40,1% [1, 2]. Породный состав лесного фонда страны состоит на 58,5% из хвойных пород, 49% из которых составляет древесина сосны [3].

Деревообрабатывающая отрасль является одной из крупнейших производственных отраслей Беларуси и включает в себя полный цикл переработки: от заготовки делового сырья до процесса отделки готового изделия. Известно, что в структуре объема промышленного производства доля обрабатывающей промышленности нашей страны составляет 89,4% [4]. Также стоит отметить, что удельный вес по виду экономической деятельности «Производство изделий из дерева и бумаги; полиграфическая деятельность и тиражирование записанных носителей информации» в общем объеме промышленного производства Республики Беларусь составляет 6,4% (6-я позиция рейтинга), где в том числе на производство изделий из древесины приходится 43,4%, на пиломатериалы – 26,9% (4278 тыс. м³ пиломатериалов в год) [4].

Немаловажен и тот факт, что в настоящее время серьезно поднимается вопрос не только рационального использования древесных ресурсов, но и сокращения экологических рисков и деградации окружающей среды [5], обсуждаются перспективы перехода к «зеленой» экономике [6], что в совокупности является одним из основополагающих направлений устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь [7].

Деревообрабатывающая промышленность является одной из традиционных отраслей экономики Беларуси. Пути повышения эффективности использования древесины неразрывно связаны с многочисленными исследованиями, необходимыми для разработки и внедрения прогрессивных инновационных технологий, позволяющих сокращать энергетические затраты, снижать образование значительного количества отходов и повышать качественные характеристики готовой продукции, что в конечном итоге позволяет получать конкурентоспособную продукцию с высокой добавленной стоимостью.

Глобальная тенденция цифровизации общества и перехода на цифровую экономику диктует основные направления трансформации индустриальных процессов. Исследования в области деревообработки способствуют накоплению огромного массива данных (Big Data), необходи-

мых для дальнейшего создания наукоемких технологий [8].

Производство конкурентоспособной продукции из древесины невозможно без наличия качественного древесного сырья. Поэтому одним из обязательных и самых важных технологических этапов подготовки сырья к производству изделий является сушка древесины.

Огромный вклад в развитие теории и практики сушки древесины внесли ученые А. В. Лыков, Г. С. Шубин, П. С. Серговский, И. В. Кречетов, А. И. Расев, Н. С. Селюгин, Н. Н. Чулицкий, А. Г. Гороховский, Б. С. Чудинов, В. А. Сычевский, П. В. Болдырев, Б. Н. Уголев, Р. Г. Сафин и др.

Анализ результатов научных исследований в области технологии сушки древесины свидетельствует о наличии фундаментальных знаний в области тепломассопереноса, что является основной теоретической базой для моделирования тепловых процессов в период прогрева, а также прогнозирования динамики изменения свойств пиломатериалов.

Переход на новый вид теплоносителя, кардинальное изменение вида ограждающих конструкций лесосушильных камер обуславливают необходимость проведения дополнительных исследований существующих механизмов прогрева и сушки, а также разработки новых математических моделей прогнозирования продолжительности процесса сушки, что в дальнейшем позволит получить высококачественную продукцию при минимальных затратах энергии.

Кроме того, полученные в результате исследований закономерности тепломассопереноса, установленные зависимости показателей качества древесины от технологических факторов, разработанные математические модели могут послужить базой для создания новейшей цифровой технологии прогнозирования, управления и контроля технологического процесса сушки древесины.

Основная часть. Древесина как объект исследования представляет собой капиллярно-пористый коллоидный материал [9], стенки капилляров которого обладают свойствами ограниченно набухающих гелей. Это означает, что содержание в древесине связанной влаги, находящейся в клеточных стенках, не может превышать некоторого максимума, называемого пределом насыщения клеточных стенок (приблизительно равен $W_{\text{пр}} = 30\%$) [10, 11]. Также древесина является гигроскопичным материалом, способным поглощать (либо отдавать) влагу из окружающей среды, поэтому влажность древесины изменяется

при изменении влажности и температуры окружающего воздуха [12]. Характерной особенностью структуры древесины является специфическая ориентация в ней различных тканей – анизотропия [13, 14].

В технологическом процессе деревообработки сушка древесины (или «обезвоживание») – один из важнейших и наиболее энергозатратных этапов [15–17]. Кроме того, проведение операции сушки предохраняет древесину от поражения дереворастворителями 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 [18].

Интересен тот факт, что развитие дереворастворяющих грибов происходит при температуре окружающего воздуха от 5 до 35°C [19, 20]. Дальнейшее повышение температуры от 35 до 55°C ведет к гибели грибки. Следовательно, минимальной температурой сушильного агента при проведении технологических операций камерной сушки древесины является 35–40°C.

Сушка представляет собой сложный энергоемкий процесс, связанный с протеканием физических явлений, относящихся к классу явлений переноса:

- 1) поглощение тепла поверхностью материала – теплообмен;
- 2) перемещение тепла по материалу – теплопроводность;
- 3) испарение влаги с поверхности материала – влагообмен;
- 4) перемещение влаги по материалу – влаготеплопроводность [21, 22].

Процесс сушки древесины нагретым воздухом состоит из трех последовательных этапов: нагревания влажных пиломатериалов (2–6% от общей продолжительности сушки), собственно сушки (95–85%) и охлаждения высушенной древесины (2–6%).

Первым технологическим этапом сушки древесины является *начальный прогрев* [23]. Основное назначение операции начального прогрева – это повышение температуры пиломатериалов, предназначенных для сушки, до уровня температуры сушильного агента, а также подготовка влаготеплопроводящей системы древесины к испарению влаги [24].

Во время прогрева повышается влаготеплопроводность древесины (за счет снижения вязкости влаги в капиллярах), в результате чего влага интенсивно начинает перемещаться из центральной зоны к поверхности материала. В конце данной операции древесина равномерно прогревается по толщине и ее влаготеплопроводящая система подготовлена к началу сушки [25, 26].

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 [27, 28]. 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.

Во время прогрева пиломатериалов стремятся избежать как испарения влаги из материала, так и его увлажнения. Для этого создают в камере такие условия, при которых влага во время прогрева не могла бы испаряться из древесины, так как преждевременное испарение влаги с поверхностных слоев может вызвать появление напряжений. Избежать испарения влаги из материала можно, если давление водяного пара в воздухе p_n будет равно давлению пара на поверхности древесины, т. е. $p_n = p_d$. Направление процесса (сорбция или десорбция) и его скорость можно установить по температуре и равновесной влажности древесины на поверхности материала. Таким образом, при $p_d > p_n$ влага будет испаряться из материала, а при $p_d < p_n$ влага будет переходить на поверхность древесины, увлажняя ее [25].

На сегодняшний день существует два основных способа проведения начального прогрева в камерах с увлажнителем в виде:

- 1) водяного пара;
- 2) холодной диспергированной воды.

В первом случае в сушильной камере создается высокая степень насыщенности среды φ , близкая к 1 ($\Delta t = 0,5–1,5^\circ\text{C}$).

Во втором случае степень насыщенности среды φ поддерживается на уровне 0,80–0,85 ($\Delta t = 2,5–3,5^\circ\text{C}$) [29, 30].

Необходимо отметить, что для проведения операции начального прогрева в насыщенной среде (случай 1) применяются лесосушильные камеры отечественного производства таких марок, как СПЛК, СПВ, ВК и других, разработанные в 70-х гг. XX в. В качестве теплоносителя и увлажнителя в таких сушильных установках выступает водяной пар [31, 32]. В сушильное пространство камеры для интенсивного начального прогрева древесины пар подают через увлажнительные трубы при включенных калориферах, работающих в вентиляторах и закрытых приточно-вытяжных каналах. В соответствии с общепринятой практикой и Руководящими техническими материалами (далее – РТМ) по технологии камерной сушки древесины [33] 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 Δt поддерживают на уровне $0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$ ($\varphi = 0,93\text{--}0,97$) [34].

В современной литературе [35] степень насыщенности среды при прогреве в камерах с теплоносителем и увлажнителем в виде водяного пара предлагают устанавливать иначе: для древесины с начальной влажностью более 25% – в пределах $0,98\text{--}1,0$, 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 в соответствии с данными, отраженными в специализированной таблице [36]. 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 сушки на данной стадии не происходит [37].

Нагревать материал можно с любой скоростью; температурные напряжения в древесине в отличие от влажностных ничтожны [38]. Ориентировочно продолжительность прогрева мягких хвойных пород составляет $1\text{--}1,5$ ч летом и $1,5\text{--}2$ ч зимой на каждый сантиметр толщины пиломатериала, считая от момента достижения в камере заданной температуры для прогрева древесины. Для пиломатериалов мягких лиственных пород эта продолжительность увеличивается на 25%, для твердых пород – на 50% [39]. Также в РТМ предлагается аналитический способ расчета продолжительности начального прогрева по специализированной формуле.

Существенный вклад в исследование процессов нагревания древесины внес Г. С. Шубин. Метод расчета продолжительности прогрева, разработанный Г. С. Шубиным, позволил учесть явление замедления прогрева штабеля путем введения коэффициента замедления $C_{\text{пр}}$, представляющего собой отношение длительности прогрева в наиболее отстающей зоне штабеля к длительности прогрева единичного сортимента на входе агента сушки в штабель [40, 41]. Данный метод опирается на основные уравнения теории теплопроводности и учитывает начальную температуру сортимента. Результаты мно-

гочисленных расчетов объединены в специальную номограмму [42]. Также были сделаны выводы о том, что коэффициент замедления прогрева зависит от характера циркуляции и длительности его цикла Δt , степени насыщенности среды φ и темпа подъема температуры среды при помещении в нее сушильного штабеля. Коэффициент $C_{\text{пр}}$ не зависит от влажности древесины W и ее начальной температуры ($t_0 > 0^\circ\text{C}$ и $t_0 < 0^\circ\text{C}$).

Кроме того, Г. С. Шубиным и А. В. Чемодановым был разработан следующий способ предварительной тепловой обработки древесины перед сушкой. Штабель пиломатериалов продувался воздухом, увлажненным водяным паром; психрометрическая разность поддерживалась на уровне $\Delta t = 0,5\text{--}1,5^\circ\text{C}$, а температура прогрева $t_{\text{пр}}$ рассчитывалась по формуле [43]

$$t_{\text{пр}} = a + b \cdot S,$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от категории режима последующей сушки; S – толщина пиломатериала, см.

Теми же авторами был предложен еще один способ начальной обработки пиломатериалов перед сушкой [44]. Штабель пиломатериалов продувался воздухом, увлажненным водяным паром; температура прогрева устанавливалась в соответствии с технологическим режимом. С целью интенсификации процесса обработки осуществляли одностороннюю продувку штабеля агентом обработки с разной скоростью в зависимости от температуры обработки и толщины пиломатериалов. Также предлагалось проводить продувку с изменением направления при скоростях, превышающих верхний предел указанных интервалов для пиломатериалов соответствующей толщины [45].

Стоит отметить, что в своих работах Г. С. Шубин [27] четко определил технологические факторы, оказывающие влияние на древесину в процессе прогрева: порода, толщина пиломатериала S , см, и его начальная температура t_0 , $^\circ\text{C}$, температура прогрева $T_{\text{пр}}$, $^\circ\text{C}$, степень насыщенности среды φ , скорость циркуляции агента обработки ω , м/с; уровень достигаемой в центре сортимента температуры $t_{\text{ц}}$, $^\circ\text{C}$.

Вышеприведенный анализ источников литературы [21–27] показал, что изучение процесса начального прогрева древесины основывается на явлениях тепломассопереноса для условий нагревания в насыщенной среде ($\varphi \approx 1$), что соответствует прогреву в камерах с паром в качестве увлажнителя.

Однако особенностью таких камер является малая вместимость (в среднем от 16 до 70 м^3 условного пиломатериала), повышенная энергоемкость (установленная мощность электродви-

гателей составляет от 18 до 45 кВт) и неэффективная аэродинамика [45–48].

Обращает на себя внимание и тот факт, что в связи с существенными энергетическими затратами на производство перегретого водяного пара, сложностью регулировки температуры теплоносителя, технической сложностью оборудования для производства и эксплуатации водяного пара применение такого неэкономичного теплоносителя на сегодняшний день является нецелесообразным [49].

Также необходимо обратить внимание на то, что исследование механизмов проведения начального прогрева и особенностей явлений тепло-массопереноса в ненасыщенной среде ($\varphi < 1$) малочисленны [50, 51], носят частный характер, недостаточно изучены и требуют дополнений.

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 и удельная теплоемкость, сравнительно низкая вязкость, высокие значения коэффициента теплоотдачи, низкая химическая активность, нетоксичность, дешевизна и доступность, возможность регулирования уровня температуры.

Широкое распространение получили конвективные сушильные камеры как зарубежных, так и отечественных производителей, в которых в качестве теплоносителя используют непосредственно 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.

Очевидно, что 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 значе-

ние насыщенности воздуха φ при этом колеблется в диапазоне 70–90%.

Необходимо подчеркнуть, что применение в качестве теплоносителя горячей воды с температурой 95°C обеспечивает максимальную температуру обрабатываемого агента внутри камеры не более 80–83°C. Данный факт свидетельствует о том, что максимальная температура как сушки, так и прогрева не может превышать 80°C. Также при использовании системы водяного нагрева «теплоноситель – вода с температурой 74°C» процесс сушки является наиболее экономичным [52].

Кроме вышесказанного следует отметить, что количественные значения параметров режима прогрева каждый производитель камер устанавливает согласно своим требованиям, основанным на собственных экспериментальных данных. Соответственно, отсутствует единый подход к технологии прогрева. Также немаловажен и тот факт, 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 режимов сушки и прогрева не были учтены некоторые факторы, характерные для белорусских деревообрабатывающих предприятий. Например, не учитывалось, что на участки сушки в зимний период поступает замороженная древесина с $t_0 < 0^\circ\text{C}$; базисная плотность древесины сосны для нашего климата $\rho_{\text{баз}} = 400 \text{ кг/м}^3$, в то время как у других производителей она принимается 320 и 480 кг/м^3 [53–55]. Также средняя начальная влажность $W_{\text{нач}}$ и температура t_0 прогреваемых пиломатериалов существенно отличаются в южных и северных широтах.

Соответственно, количественные значения параметров режимов и продолжительности прогрева не всегда могут быть эффективно применены для наших условий, а в некоторых случаях приводят к возникновению значительного процента брака, а также повышению стоимости сушки.

Также вызывает интерес то обстоятельство, что в современных сушильных камерах взаимосвязь между температурой, степенью насыщенности обрабатываемого агента и начальной влажностью пиломатериала отображают как значение равновесной влажности, которая на экране пульта управления обозначается английскими буквами EMC.

Примеры режимов начального прогрева древесины сосны для сушильных камер марок SECAL (Италия), CAT HILD (Франция), LAUBER (Германия), INCOPLAN (Италия) отражены в таблице ниже.

Режимы начального прогрева

Толщина S , мм	Равновесная влажность EMC, %	Параметры режима прогрева			Продолжительность прогрева τ , ч
		φ	Δt	T , °C	
Фирма SEKAL					
30–60	14	0,77	4,0	40	3–6
> 60	16	0,82	3,0	38	8–10
Фирма CATHILD					
< 35	14	0,81	4,0	65	3
35–60	14,5	0,83	3,5	65	6
Фирма LAUBER					
36–75	15,5	0,83	3,5	35	6
> 75	15	0,81	3,5	35	8
Фирма INCOPLAN					
30–60	18	0,86	2,5	45	6–8
> 60	19	0,87	2,0	45	10

Анализируя данные таблицы, можно заметить, как отличается интервал параметров режима прогрева: одни производители проводят начальный прогрев в условиях, близких к насыщению, а другие – при параметрах среды, соответствующих первой ступени сушки. Также очевиден и тот факт, что продолжительность прогрева варьируется в пределах 3–8 ч для пиломатериалов толщиной до 60 мм и 6–10 ч для пиломатериалов толщиной более 60 мм. Причем производитель сушильных камер CATHILD в практическом руководстве предлагает определять продолжительность операции по специальной формуле.

Кроме того, современные технологии сушки рекомендуют проводить начальный прогрев пиломатериалов при высокой влажности агента обработки в сушильной камере, разница показаний психрометра должна быть не более 5°C, а продолжительность прогрева – не менее 6 ч в зависимости от породы и толщины пиломатериала [56].

Следует обратить внимание на нетрадиционные способы начальной обработки пиломатериалов перед сушкой. Элдер Денни (США) [55] предлагает нагревать древесину в камере с температурой более 68,8°C и далее охлаждать в охлаждающей жидкости для удаления не менее 5% влаги из древесины. При таком способе подготовки древесины достигается ее ускоренная сушка по сравнению с общепринятой.

Дождковым С. В. [57] предлагается способ тепловой обработки высоковлажных пиломатериалов перед сушкой путем погружения их в горячую воду и прогрева в ней в течение 10–30 мин. Вода в ванне находится в кипящем состоянии.

Однако вышеописанные нетрадиционные методы начального прогрева не нашли широкого

применения. Очевиден и тот факт, что на сегодняшний день отсутствует единый подход к технологии проведения прогрева древесины в ненасыщенной среде.

Выводы. Проведенный аналитический обзор состояния вопроса начального прогрева древесины подтвердил актуальность необходимости дальнейших исследований в данном направлении и позволил обосновать основные аспекты совершенствования процесса нагревания пиломатериалов. Современные представления о технологии камерной сушки отчетливо демонстрируют запрос на изучение механизмов прогрева древесины в ненасыщенной среде. Требуется установить закономерности изменения температуры и влажности пиломатериала во времени в период прогрева в ненасыщенной среде, определить влияние технологических факторов на величину перепадов температуры и влажности древесины при прогреве, изучить характер изменения тепловых свойств древесины во времени в нестационарных условиях. Также необходимо теоретически обосновать модель процесса теплопереноса в древесине в период начального прогрева в ненасыщенной среде.

С целью повышения технико-экономической эффективности процесса сушки древесины следует разработать математическую модель определения продолжительности прогрева; установить характер и величину внутренних напряжений в древесине (один из показателей качества сушки древесины) в период прогрева в ненасыщенной среде и оценить безопасность данного процесса с точки зрения обеспечения целостности прогреваемой древесины; определить расход энергии для различных условий прогрева.

Список литературы

1. Статистический обзор ко дню работников леса от 15.09.2022. Статистический буклет // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/statobzor_forest-2022.pdf (дата обращения: 02.03.2023).

2. Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь // Лесной фонд. URL: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (дата обращения: 01.03.2023).
3. Павел Абрамович. День лесного хозяйства: пять фактов о лесах Беларуси и работниках Минлесхоза // Точка. URL: https://tochka.by/articles/life/den_lesnogo_khozyaystva_pyat_faktov_o_lesakh_belarusi_i_rabotnikakh_minleskhoza/ (дата обращения: 01.03.2023).
4. Промышленность Республики Беларусь (2022). Статистический буклет // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/254/6n0355kev4y4cnpqrt0p2886gl0f1j4b.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).
5. Неверов А. В., Водопьянова Т. П. Экономика природопользования. Минск: БГТУ, 2019. 116 с.
6. Дорожная карта по реализации ЦУР в Республике Беларусь // Цели устойчивого развития Беларуси. URL: https://sdgs.by/kcfinder/upload/files/FINAL_Дорожная_карта_ЦУР_RU_25_06.pdf (дата обращения: 03.03.2023).
7. Национальная платформа представления отчетности по показателям Целей устойчивого развития (ЦУР) // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/home.html> (дата обращения: 04.03.2023).
8. Стратегия «Наука и технологии: 2018–2040» // Нац. акад. наук Беларуси. URL: https://gknt.gov.by/upload/Deyatelnost/Meropriyatia/strategy_2018-2040.pdf (дата обращения: 03.03.2023).
9. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
10. Снопков В. Б., Федосенко И. Г. Гидротермическая обработка и защита древесины. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2015. 114 с.
11. Чудинов Б. С. Вода в клеточной стенке древесины. Красноярск: СО АН СССР, 1978. 44 с.
12. Расев А. И. Сушка древесины. СПб.: Лань, 2010. 416 с.
13. Чудинов Б. С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 267 с.
14. Перельгин Л. М. Строение древесины. М.: Гослесбумиздат, 1954. 200 с.
15. Гороховский А. Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. СПб., 2008. 263 с.
16. Соломонов В. Д. Проблемы совершенствования техники и технологии для сушки древесины и эффективные пути их решения // Деревообрабатывающая промышленность. 2003. № 5. С. 19–25.
17. Данилов О. Л. Научно-технические основы интенсификации сушки и энергосбережения в сушильных установках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. М., 1996. 39 с.
18. Серговский П. С. Режимы и проведение камерной сушки пиломатериалов. М.: Лесная промышленность, 1976. 136 с.
19. Ермолина Т. В. Защитная обработка древесины. Красноярск: СибГТУ, 2015. 214 с.
20. Семенова И. Г. Фитопатология. Дереворазрушающие грибы, гнили и патологические окраски древесины. М.: МГУЛ, 2001. 58 с.
21. Сычевский В. А. Процессы тепломассопереноса, деформации и подвижные границы в дисперсных системах. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2009. 227 с.
22. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 360 с.
23. Расев А. И. Тепловая обработка и сушка древесины. М.: МГУЛ, 2009. 360 с.
24. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968. 256 с.
25. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.
26. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 324 с.
27. Шубин Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 248 с.
28. Болдырев П. В. Сушка древесины. Практическое руководство. СПб.: Проффикс, 2002. 158 с.
29. 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 хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 1 (240). С. 162–169.
30. 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.
31. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
32. Соколов П. В. Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины. М.: Лесная промышленность, 1965. 331 с.
33. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 93 с.
34. Сушка древесины. Общие положения тепловой сушки древесины. Тверь: Спецмонтаж, 2003. 47 с.

35. Фридман И. Н. Деревообработка. Практическое руководство. СПб.: Профикс, 2003. 543 с.
36. Богданов Е. С. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер. М.: Экология, 1993. 351 с.
37. Вилейшикова Н. В., Донченко Л. Ф., Снопков В. Б. Изучение режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2002. Вып. X. С. 177–180.
38. Ермолин В. Н. Физика древесины. Красноярск: СибГАУ, 2016. 84 с.
39. Снопков В. Б. Гидротермическая обработка и защита древесины. Примеры и задачи. Минск: БГТУ, 2005. 234 с.
40. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 335 с.
41. Шубин Г. С. О начальной обработке пиломатериалов перед сушкой // Деревообраб. пром-сть. 1982. № 1. С. 3–7.
42. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
43. Способ предварительной тепловой обработки пиломатериалов перед сушкой: а. с. СССР 1263982 / Г. С. Шубин, А. В. Чемоданов. Оpubл. 15.10.86.
44. Способ предварительной тепловой обработки пиломатериалов перед сушкой: а. с. СССР 1270509 / Г. С. Шубин, А. В. Чемоданов. Оpubл. 15.11.86.
45. Шубин Г. С. Проектирование установок для гидротермической обработки древесины. М.: Лесная пром-сть, 1983. 273 с.
46. Богданов Е. С. Справочник по сушке древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 304 с.
47. Пейч Н. Н. Повышение производительности лесосушильных камер. М.: Гослесбуиздат, 1954. 137 с.
48. Корнеев В. И. Проблемы сушки пиломатериалов и пути их решения // Woodworking news. 2005. № 5. С. 9–14.
49. Смородин С. Н., Белоусов В. Н., Лакомкин В. Ю. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 99 с.
50. Удачина О. А. Технология сушки пиломатериалов без начального увлажнения обрабатываемой среды для камер малой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Красноярск, 2007. 19 с.
51. Гороховский А. Г., Удачина О. А., Шишкина Е. Е. О начальном прогреве штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатываемой среды // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2006. № 14. С. 96–99.
52. Оти Мото Поль М. Анализ существующих способов сушки и удаления влаги из древесины // Известия С.-Петербург. лесотехн. акад. 2006. № 11. С. 98–102.
53. Acoustic properties of Scots Pine wood and genetic background / E. Konofalska [et. al.] Exploring New Discoveries and New Directions in Forests: the 3rd International Electronic Conference on Forests, 2022. DOI: 10.3390/IECF2022-13038.
54. Joanna Witkowska, Hubert Lachowicz. Analysis of variation in pure density of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) along a trunk height depending on selected factors // Prace naukowe. 2012. P. 1–6.
55. Kretschmann D. E. Mechanical properties of wood // Environments. 2010. Vol. 5. P. 34.
56. Тетерин Л. А. Как улучшить качество продукции (Часть II) // Дерево.RU. 2004. № 5. С. 50–52.
57. Способ предварительной тепловой обработки высоковлажных пиломатериалов: а. с. СССР 2069788 / С. В. Дожков. Оpubл. 31.08.76.

References

1. Statistical review for the day of working scaffolds from 09/15/2022. Statistical booklet. Available at: https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/statobzor_forest-2022.pdf (accessed 02.03.2023) (In Russian).
2. Ministry of Forestry of the Republic of Belarus. Available at: <https://mlh.by/our-main-activites/forestry/forests/> (accessed 01.03.2023) (In Russian).
3. Pavel Abramovich. Forestry Day: five facts about the forests of Belarus and employees of the Ministry of Forestry. Available at: https://tochka.by/articles/life/den_lesnogo_khozyaystva_pyat_faktov_o_lesakh_belarusi_i_rabotnikakh_minleskhoza/ (accessed 01.03.2023) (In Russian).
4. Industry of the Republic of Belarus (2022). Statistical booklet // National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/254/6n0355kev4y4cnpqr0p2886gl0flj4b.pdf> (accessed 01.03.2023) (In Russian).
5. Neverov A. V., Vodop'yanova T. P. *Ekonomika prirodopol'zovaniya* [Economics of nature management]. Minsk, BGTU Publ., 2019. 116 p. (In Russian).

6. Roadmap for the implementation of the SDGs in the Republic of Belarus. Available at: https://sdgs.by/kcfinder/upload/files/FINAL_Дорожная_карта_ЦУП_RU_25_06.pdf (accessed 03.03.2023) (In Russian).
7. National platform for reporting on indicators of the Sustainable Development Goals (SDGs). Available at: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/home.html> (accessed 04.03.2023) (In Russian).
8. Strategy “Science and Technology: 2018–2040”. Available at: https://gknt.gov.by/upload/Deyatelnost/Meropriyatia/strategy_2018-2040.pdf (accessed 03.03.2023) (In Russian).
9. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 535 p. (In Russian).
10. Snopkov V. B., Fedosenko I. G. *Gidrotermicheskaya obrabotka i zashchita drevesiny. Laboratorny praktikum* [Hydrothermal treatment and protection of wood. Laboratory workshop]. Minsk, BGTU Publ., 2015. 114 p. (In Russian).
11. Chudinov B. S. *Voda v kletochnoy stenke drevesiny* [Water in the cell wall of wood]. Krasnoyarsk, SO AN SSSR Publ., 1978. 44 p. (In Russian).
12. Rasev A. I. *Sushka drevesiny* [Wood drying]. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2010. 416 p. (In Russian).
13. Chudinov B. S. *Voda v drevesine* [Water in wood]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 267 p. (In Russian).
14. Perelygin L. M. *Stroyeniye drevesiny* [Wood structure]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 200 p. (In Russian).
15. Gorokhovskiy A. G. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov na osnove modelirovaniya i optimizatsii protsessov teplomassoperenosa v drevesine. Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Lumber drying technology based on modeling and optimization of heat and mass transfer processes in wood. Dissertation DSc (Engineering)]. St. Petersburg, 2008. 263 p. (In Russian).
16. Solomonov V. D. Problems of improving equipment and technology for drying wood and effective ways to solve them. *Derevoobratyvvayushchaya promyshlennost’* [Woodworking industry], 2003, no. 5, pp. 19–25 (In Russian).
17. Danilov O. L. *Nauchno-tekhnicheskiye osnovy intensivatsii sushki i energosberezheniya v sushil’nykh ustanovkakh. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Scientific and technical bases of drying intensification and energy saving in drying plants. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Moscow, 1996. 39 p. (In Russian).
18. Sergovskiy P. S. *Rezhimy i provedeniye kamernoy sushki pilomaterialov* [Modes and carrying out chamber drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1976. 136 p. (In Russian).
19. Ermolina T. V. *Zashchitnaya obrabotka drevesiny* [Protective wood treatment]. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2015. 214 p. (In Russian).
20. Semenkov I. G. *Fitopatologiya. Derevorazrushayushchiye griby, gnili i patologicheskiye okraski drevesiny* [Plant pathology. Wood-destroying fungi, rot and pathological stains of wood]. Moscow, MGUL Publ., 2001. 58 p. (In Russian).
21. Sychevskiy V. A. *Protsessy teplomassoperenosa, deformatsii i podvizhnyye granitsy v dispersnykh sistemakh* [Heat and Mass Transfer Processes, Deformations, and Moving Boundaries in Dispersed Systems]. Minsk, Institut teplo- i massoobmena imeni A. V. Lykova NAN Belarusi Publ., 2009. 227 p. (In Russian).
22. Sergovskiy P. S., Rasev A. I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny* [Hydrothermal processing and preservation of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1987. 360 p. (In Russian).
23. Rasev A. I. *Teplovaya obrabotka i sushka drevesiny* [Heat treatment and drying of wood]. Moscow, MGUL Publ., 2009. 360 p. (In Russian).
24. Chudinov B. S. *Teoriya teplovooy obrabotki drevesiny* [Wood heat treatment theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 256 p. (In Russian).
25. Krechetov I. V. *Sushka drevesiny* [Drying of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1980. 432 p. (In Russian).
26. Krechetov I. V. *Sushka i zashchita drevesiny* [Drying and protecting wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1987. 324 p. (In Russian).
27. Shubin G. S. *Fizicheskiye osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical basis and calculation of wood drying processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost’ Publ., 1973. 248 p. (In Russian).
28. Boldyrev P. V. *Sushka drevesiny. Prakticheskoye rukovodstvo* [Drying wood. Practical guide]. St. Petersburg, Profiks Publ., 2002. 158 p. (In Russian).
29. 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], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 1 (240), pp. 162–169 (In Russian).
30. Rudak O. G. Study of the parameters of the technology of initial heating of wood in an unsaturated medium. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2021, no. 2 (246), pp. 268–276 (In Russian).

31. Lebedev P. D. *Raschet i proyektirovaniye sushil'nykh ustanovok* [Calculation and design of drying plants]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962. 320 p. (In Russian).
32. Sokolov P. V. *Proyektirovaniye sushil'nykh i nagrevatel'nykh ustanovok dlya drevesiny* [Design of drying and heating installations for wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 331 p. (In Russian).
33. *Rukovodyashchiye tekhnicheskiye materialy po tekhnologii kamernoy sushki drevesiny* [Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood]. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1985. 92 p. (In Russian).
34. *Sushka drevesiny. Obshchiye polozeniya teplovoy sushki drevesiny* [Wood drying. General provisions for thermal drying of wood]. Tver, Spetsmontazh Publ., 2003. 47 p. (In Russian).
35. Fridman I. N. *Derevoobrabotka. Prakticheskoye rukovodstvo* [Woodworking. Practical guide]. St. Petersburg, Profiks Publ., 2003. 543 p. (In Russian).
36. Bogdanov E. S. *Raschet, proyektirovaniye i rekonstruktsiya lesosushil'nykh kamer* [Calculation, design and reconstruction of drying chambers]. Moscow, Ekologiya Publ., 1993. 351 p. (In Russian).
37. 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], series II, Forest and Woodworking Industry, 2002, issue X, pp. 177–183 (In Russian).
38. Ermolin V. N. *Fizika drevesiny* [Physics of wood]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2016. 84 p. (In Russian).
39. Snopkov V. B. *Gidrotermicheskaya obrabotka i zashchita drevesiny. Primery i zadachi* [Hydrothermal treatment and protection of wood. Examples and tasks]. Minsk, BGTU Publ., 2005. 234 p. (In Russian).
40. Shubin G. S. *Syshka i teployaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 335 p. (In Russian).
41. Shubin G. S. About the initial processing of lumber before drying. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 1982, no. 1, pp. 3–7 (In Russian).
42. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (In Russian).
43. Shubin G. S., Chemodanov A. V. The method of pre-heat treatment of lumber before drying. Certificate of authorship USSR 1263982, 1986 (In Russian).
44. Shubin G. S., Chemodanov A. V. The method of pre-heat treatment of lumber before drying. Certificate of authorship USSR 1270509, 1986 (In Russian).
45. Shubin G. S. *Proyektirovaniye ustanovok dlya gidrotermicheskoy obrabotki drevesiny* [Design of installations for hydrothermal wood treatment]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 273 p. (In Russian).
46. Bogdanov E. S. *Spravochnik po sushke drevesiny* [Wood Drying Handbook]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 304 p. (In Russian).
47. Peych N. N. *Povysheniye proizvoditel'nosti lesosushil'nykh kamer* [Increasing the productivity of drying chambers]. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1954. 137 p. (In Russian).
48. Korneev V. I. Problems of drying lumber and ways to solve them. *Woodworking news*, 2005, no. 5, pp. 9–14 (In Russian).
49. Smorodin S. N., Belousov V. N., Lakomkin V. Yu. *Metody energosberezheniya v energeticheskikh, tekhnologicheskikh ustanovkakh i stroitel'stve* [Energy Saving Methods in Energy, Technological Installations and Construction]. St. Petersburg, SPbGTURP Publ., 2014. 99 p. (In Russian).
50. Udachina O. A. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov bez nachal'nogo vvlazhneniya obrabatyvayushchey sredy dlya kamer maloy moshchnosti. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Lumber drying technology without initial moistening of the processing medium for low-power chambers. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Krasnoyarsk, 2007. 19 p. (In Russian).
51. Gorokhovskiy A. G., Udachina O. A., Shishkina E. E. On the initial heating of the stack during drying of lumber without artificial moistening of the processing medium. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2006, no. 3, pp. 96–99 (In Russian).
52. Oty Moto Pol' M. Analysis of existing methods for drying and removing moisture from wood. *Izvestiya St.-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News St. Petersburg forestry academy], 2006, no. 11, pp. 98–102 (In Russian).
53. Eliza Konofalska, Paweł Kozakiewicz, Włodzimierz Buraczyk, Hubert Lachowicz. Acoustic properties of Scots Pine wood and genetic background. *Exploring New Discoveries and New Directions in Forests: The 3rd International Electronic Conference on Forests*, 2022. DOI: 10.3390/IECF2022-13038.
54. Joanna Witkowska, Hubert Lachowicz. Analysis of variation in pure density of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) along a trunk height depending on selected factors. *PRACE NAUKOWO*, 2012, no. 1, pp. 1–6.

55. Kretschmann D. E. Mechanical properties of wood. *Environments*, 2010, no. 5. p. 34.
56. Teterin L. A. How to improve product quality (Part II). *Derevo.RU* [Wood.RU], 2004, no. 5, pp. 50–52 (In Russian).
57. Dozhkov S. V. Method of preliminary heat treatment of high-moisture lumber. Certificate of authorship USSR 2069788, 1976 (In Russian).

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 Gennadievna – 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 20.03.2023