

УДК 674.04.047.3

О. Г. Рудак

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
ПРИ ПРОГРЕВЕ ДРЕВЕСИНЫ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ**

В статье описываются результаты исследования механизма прогрева пиломатериалов в ненасыщенной среде. Отмечено, что при начальном прогреве изменяется как температура, так и влажность древесины на поверхности образца. Сделан вывод о том, что при нагревании в древесине возникают два совместно протекающих процесса переноса тепла: теплопроводность, направленная от поверхностных слоев сортамента к внутренним, и влагопроводность во встречном направлении. В данной работе обращается внимание на то, что начальный прогрев древесины относится к нестационарному режиму, поскольку имеет место изменяющаяся во времени и по сечению температура самого образца (поверхность – внутренний слой), а также температура агента обработки. Процесс начального прогрева древесины в ненасыщенной среде характеризуется образованием по толщине образца трех зон: диффузной с влажностью ниже $W_{пр}$; зоны испарения свободной влаги (средняя влажность древесины здесь выше $W_{пр}$); капиллярной зоны с примерно одинаковой по всей толщине влажностью выше $W_{пр}$. Поскольку по сечению (толщине) образца в период прогрева образуется перепад как температур, так и влажности, то общий поток влаги учитывает суммарное действие градиентов влагосодержания и температуры. Из основного закона перемещения влаги и закона теплопроводности для древесины была получена система уравнений, позволяющая моделировать перемещение теплоты и влаги в процессе прогрева в ненасыщенной среде.

Ключевые слова: прогрев, термовлагопроводность, тепломассоперенос, градиент температур, уравнение, теплопроводность.

Для цитирования: Рудак О. Г. Исследование процессов тепломассопереноса при прогреве древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 277–283.

O. G. Rudak

Belarusian State Technological University

**RESEARCH OF THE PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER
DURING HEATING OF WOOD IN AN UNSATURATED ENVIRONMENT**

The article describes the results of a study of the heating mechanism in an unsaturated environment. It is noted that during the initial heating, both the temperature and the moisture content of the wood on the sample surface change. It is concluded that in the process of heating in wood, two jointly occurring processes of heat transfer occur: thermal conductivity directed from the surface layers of the assortment to the inner ones, and moisture conductivity in the opposite direction. In this work, attention is drawn to the fact that the initial heating of wood refers to a non-stationary regime, since there is a time-varying and cross-sectional temperature of the sample itself (surface – inner layer), as well as the temperature of the treatment agent. The process of initial heating of wood in an unsaturated environment is characterized by the formation of three zones along the thickness of the sample: diffuse with a moisture content below W_{lg} ; zone of evaporation of free moisture (the average moisture content of wood here is higher than W_{lg}); capillary zone with approximately the same moisture content throughout the thickness above W_{lg} . Since both a temperature difference and a humidity difference are formed over the cross section (thickness) of the sample during the heating period, the total moisture flow takes into account the total effect of the moisture content and temperature gradients. From the basic law of moisture movement and the law of thermal conductivity for wood, a system of equations was obtained that allows simulating the movement of heat and moisture during heating in an unsaturated environment.

Key words: heating, thermal and moisture conductivity, heat and mass transfer, temperature gradient, equation, thermal conductivity.

For citation: Rudak O. G. Research of the processes of heat and mass transfer during heating of wood in an unsaturated environment. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature management. Processing of Renewable Resources*, 2021, no. 2 (246), pp. 277–283 (In Russian).

Введение. Технологический процесс камерной сушки пиломатериалов в конвективных камерах периодического действия предусматривает обязательное проведение операции начального прогрева. Основная цель данной операции – доведение температуры высушиваемого материала до уровня температуры сушильного агента и подготовка влагопроводящей системы древесины к последующему испарению влаги.

В современных сушильных камерах операцию прогрева проводят при степени насыщенности обрабатываемой среды меньше 1, т. е. в ненасыщенной среде. В таких условиях прогрев древесины неизбежно сопровождается испарением влаги с ее поверхности и, как следствие, уровнем температуры поверхностных слоев меньше температуры обрабатываемой среды [1]. Данный факт можно объяснить тем, что при прогреве в ненасыщенной среде в древесине возникают два совместно протекающих процесса переноса тепла: теплопроводность, направленная от поверхностных слоев сортамента к внутренним, и влагопроводность во встречном направлении [2, 3]. Таким образом, при начальном прогреве будут изменяться как температура, так и влажность древесины, что повлечет за собой изменение и других физических свойств древесины [4, 5].

Цель работы – изучение явления тепломассопереноса в древесине при прогреве в ненасыщенной среде.

Задача исследования – установить математическую зависимость перемещения влаги и тепла по сечению пиломатериалов в период 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. 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%).

Проведенный ряд исследований механизмов начального прогрева пиломатериалов в ненасыщенной среде позволил получить общий характер изменения температурных и влажностных кривых во времени, а также произвести оценку влияния технологических факторов на величину перепадов температуры и влажности по толщине образца.

Таким образом, при прогреве в ненасыщенной среде возникают и совместно протекают следующие явления переноса тепла и массы (влаги) [6]:

- 1) поглощение тепла от агента обработки поверхностью материала – теплообмен;
- 2) перемещение тепла по материалу – теплопроводность;
- 3) испарение влаги с поверхности материала – влагообмен;
- 4) перемещение влаги по материалу – влагопроводность (при начальной влажности пиломатериалов ниже $W_{пр}$).

Древесина представляет собой многофазную систему. Перенос тепла внутри древесины характеризуется коэффициентами теплопроводности λ (Вт/м·°С) и температуропроводности a (м²/с), связанными между собой через удельную теплоемкость c (Дж/кг·°С) и плотность ρ (кг/м³) известным соотношением:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (1)$$

Из теории теплопроводности известно, что тепловой поток q внутри твердого тела пропорционален градиенту температуры $\partial t / \partial x$ в направлении x потока и коэффициенту теплопроводности λ :

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (2)$$

Знак минус показывает, что поток направлен в сторону понижения температуры тела.

Режим теплового потока может быть стационарным и нестационарным [7].

Особый интерес представляет нестационарный режим, который характеризуется переменным в пространстве и времени температурным полем в нагреваемом теле. Начальный прогрев древесины относится к нестационарному режиму, поскольку имеет место изменяющаяся во времени и по сечению температура самого сортамента (поверхность – внутренний слой) и температура агента обработки. Если в процессе нагревания прекратилось влияние параметров начального теплового состояния тела, а температура среды сохраняется неизменной, тепловой режим тела называется *регулярным*.

При рассмотрении процессов нагревания в ненасыщенной среде (увлажнитель – диспергированная вода, $\phi \neq 1$) необходимо раскрыть закономерности распределения температурного поля в поперечном сечении, в первую очередь по толщине пиломатериала (доски).

Для того чтобы найти температурное поле внутри тела в любой момент времени, необходимо

решить дифференциальное уравнение теплопроводности по формуле

$$\gamma c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3)$$

где γ – плотность древесины, кг/м³; c – удельная теплоемкость древесины, Дж/(кг·°C); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); t – температура в произвольной точке тела, °C.

Это уравнение называется дифференциальным уравнением теплопроводности или уравнением Фурье и лежит в основе математической теории теплопроводности [8]. Для решения конкретной задачи необходимо к дифференциальному уравнению присоединить математическое описание частных ее особенностей. Эти дополнительные данные, которые характеризуют конкретное единичное явление, называются крайними условиями или условиями однозначности.

Для решения данного уравнения необходимо знать распределение температуры внутри тела в начальный момент времени (начальное условие), геометрическую форму тела и закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела (граничное условие).

Совокупность начального и граничного условий называется крайними условиями; начальное условие называется временным крайним условием, а граничное – пространственным крайним условием.

Начальное условие определяется заданием закона распределения температуры внутри тела в начальный момент времени, т. е.

$$t(x, y, z, 0) = f(x, y, z), \quad (4)$$

где $f(x, y, z)$ – известная функция.

Граничное условие характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

В условиях начального прогрева в ненасыщенной среде имеет место изменяющееся во времени и по сечению образца температурное поле (нестационарный процесс теплообмена), поэтому между поверхностью тела и потоком воздуха условная толщина пограничного слоя будет зависеть не только от скорости агента обработки и его физических свойств, но и от теплофизических свойств тела, а также будет непрерывно изменяться с течением времени. Следовательно, в данном случае необходимо остановиться на граничных условиях третьего рода, когда задаются температурой окружающей среды t_c и законом теплоотдачи между поверхностью тела и окружающей средой – закон Ньютона – Рихмана [8, 11].

По закону сохранения энергии количество тепла $q_n(\tau)$, отданного поверхностью тела, равно

количеству тепла, которое подводится изнутри к поверхности тела в единицу времени к единице площади поверхности путем теплопроводности, т. е.

$$q_n(\tau) = \alpha[t_n(\tau) - t_c(\tau)] = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n, \quad (5)$$

где t_n – температура поверхности тела, °C; α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплообмена, Вт/(м²·K).

Коэффициент теплообмена численно равен количеству теплоты, отдаваемому или воспринимаемому единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в один градус. Этот коэффициент учитывает все особенности явлений теплообмена, происходящие между поверхностью тела и окружающей средой. Для общности постановки задачи температура t_c считается переменной, а коэффициент теплообмена приближенно принят постоянным.

Таким образом, граничное условие при начальном прогреве древесины рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha[t_n(\tau) - t_c(\tau)] + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n = 0. \quad (6)$$

Перепишем последнее уравнение в виде

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot (t_n - t_c). \quad (7)$$

Таким образом, получаем математическую формулировку граничных условий третьего рода. В результате решения уравнения (7) можно найти температурное поле, а на основании закона Фурье – соответствующие тепловые потоки.

Дифференциальное уравнение теплоотдачи имеет вид

$$\alpha = -\frac{\lambda}{(t_n - t_c)} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (8)$$

Полученные уравнения тепломассообмена могут быть использованы при разработке способов компьютерного моделирования процесса начального прогрева древесины в ненасыщенной среде на основе анализа решения системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Следует обратить внимание, что при неизотермических условиях в древесине имеет место перенос влаги из мест с большей температурой в места с меньшей [9]. Если образец древесины с влажностью, одинаковой по сечению, поместить в неравномерное температурное поле, в результате чего будет наблюдаться перепад

температур на противоположных сторонах образца, то начнется перераспределение влажности на поверхности и внутри. На участках с меньшей температурой влажность древесины увеличится, а с большей – уменьшится. При этом в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги. Влага по объему сортамента всегда движется в сторону убывающей влажности.

Совместное протекание процессов теплообмена и массообмена называется *тепломассообменом*.

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

Известно, что влага, находящаяся в клетках древесины, делится на свободную и связанную [9]:

1) свободная вода – так называется вода, заполняющая полости клеток и удерживаемая в них механически; она первой удаляется из древесины. Это большая часть воды, содержащейся в древесине. Процесс удаления влаги протекает быстро и оказывает незначительное влияние на свойства древесины, требует невысоких температур;

2) связанная вода – содержащаяся в стенках клеток, удерживаемая в основном физико-химическими связями. Изменение ее содержания существенно отражается на большинстве свойств древесины. Ее удаление значительно труднее и требует более высоких температур.

Кроме того, передвижение влаги в древесине происходит как в виде пара, так и в виде жидкости по двум системам водопроводящих путей в древесине: по системе макрокапилляров, заполненных воздухом (полости клеток, разделенные мембранами пор, межклеточные пространства), и по системе микрокапилляров в клеточных оболочках [10].

По макрокапиллярам влага перемещается в виде пара под действием градиента его парциального давления (при прогреве с $W_{нач} > 30\%$). Передвижение влаги по микрокапиллярам в клеточной оболочке носит более сложный характер

и происходит как в виде пара, так и в виде жидкости; этот случай передвижения влаги в древесине называется диффузией проницаемостью (при прогреве с $W_{нач} < 30\%$).

Исследования характера изменения влажности поверхностных и внутренних слоев древесины в период прогрева в ненасыщенной среде позволили выявить следующие закономерности. Нагревание пиломатериалов с начальной влажностью $W_{нач} > 30\%$ сопровождается изменением (снижением) влажности поверхностных слоев образца, однако это значение выше влажности предела гигроскопичности $W_{п.г.}$. Следовательно, пока влажность на поверхности будет выше $W_{п.г.}$, влага в древесине перемещаться не будет. Ее движение начнется только тогда, когда вся свободная влага будет удалена с поверхности. С этого момента между внутренними слоями древесины, где влага находится в полостях клеток, и поверхностью, где влага содержится только в клеточных стенках, появится разность капиллярных давлений. Разность давлений обеспечит подачу свободной влаги к поверхности по мере ее испарения.

При прогреве древесины с начальной влажностью $W_{нач} < 30\%$, а также с $W_{нач} > 30\%$ при высоких температурах и низких значениях степени насыщенности обрабатываемого агента наблюдается снижение влажности поверхностных слоев образца ниже $W_{п.г.}$, что однозначно свидетельствует об удалении связанной влаги. Можно считать, что по толщине образца образуются две зоны: наружная, с влажностью ниже предела гигроскопичности, и внутренняя, имеющая влажность выше предела гигроскопичности.

Следует отметить, что в наружной зоне плотность потока влаги пропорциональна перепаду влажности. В научной литературе такую зону принято называть зоной влагопроводности. Во внутренних слоях древесины по-прежнему движению свободной влаги идет за счет разности капиллярных давлений, но только к внутренней границе зоны влагопроводности.

Таким образом, процесс начального прогрева древесины в ненасыщенной среде характеризуется образованием по толщине образца трех зон:

1) диффузная зона, или зона влагопроводности с влажностью ниже $W_{п.г.}$; скорость передвижения связанной влаги в этой зоне определяется градиентом влажности;

2) зона испарения свободной влаги; средняя влажность древесины здесь выше $W_{п.г.}$ и постепенно повышается по направлению к центру сортамента;

3) капиллярная зона с примерно одинаковой по всей толщине влажностью выше $W_{п.г.}$; перемещение свободной влаги происходит в этой зоне под влиянием разности капиллярных натяжений.

Толщина перечисленных зон может заметно изменяться в процессе испарения в зависимости от начальной влажности древесины, ее теплопроводности и капиллярной проницаемости, однако механизм передвижения влаги и общий характер распределения влажности по зонам одинаковы для древесины всех пород. В любом случае интенсивность испарения влаги из поверхностных слоев древесины лимитируется скоростью передвижения влаги в диффузной зоне, где это передвижение зависит от теплопроводности.

Следует обратить внимание на тот факт, что уравнение теплопроводности справедливо лишь в диапазоне гигроскопической влажности, т. е. $W_{др} < 30\%$. Если влажность по всему объему сортамента выше 30%, то, независимо от того, равномерно она распределена по нему или нет, перепад влажности не вызывает влагопереноса.

Однако особым случаем влагопереноса, связанного с перепадом влажности в древесине, является движение свободной влаги под действием сил капиллярного натяжения, появляющихся на границе соприкосновения клеток, как содержащих, так и не содержащих свободную влагу. Капиллярное натяжение ничтожное в полости клеток, становится весьма заметным при освобождении полостей и заглаблении менисков жидкости в микрокапилляры стенок клеток [11, 12].

Влага, имеющая физико-механическую связь, удерживается в капиллярах и в зависимости от режима нагревания может перемещаться в виде жидкости или в виде пара. Внутри влажного материала влага перемещается в направлении потока теплоты. Это создает в высушиваемом материале градиент влагосодержания.

Плотность потока жидкости и пара, проходящих через единицу поверхности, перпендикулярной направлению перемещения, в единицу времени, пропорциональна градиенту влагосодержания в древесине:

$$G_u = -D \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial n}\right), \quad (9)$$

где G_u – плотность потока жидкости и пара, кг/(м²·с); D – коэффициент диффузии для жидкости и пара; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; $\partial u / \partial n$ – градиент влагосодержания, %/м. Знак минус указывает, что в направлении нормали влагосодержание уменьшается.

Данное соотношение является основным законом перемещения влаги в древесине при прогреве как в виде пара, так и в виде жидкости при наличии градиента влагосодержания.

Поскольку в процессе прогрева по толщине древесины образуется перепад температур, то также будет наблюдаться и поток влаги, обусловленный температурным градиентом,

плотность потока которого пропорциональна этому градиенту:

$$G_t = -D \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right), \quad (10)$$

где δ – термоградиентный коэффициент, 1/°С; $\partial t / \partial n$ – градиент температуры, °С/м.

Данное уравнение является выражением закона термовлагопроводности и описывает массоперенос при прогреве древесины с $W_{нач} > 30\%$.

Общий поток влаги равен сумме потоков:

$$G = G_u + G_t = -D \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial n}\right) - D \cdot \rho_0 \cdot \delta \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right). \quad (11)$$

Уравнение (11) представляет собой обобщенный закон перемещения влаги в древесине с $W_{нач} < 30\%$.

При противоположных направлениях градиента влагосодержания и градиента температуры направление суммарного потока влаги зависит от соотношения сил теплопроводности $\partial u / \partial n$ и термовлагопроводности $\delta \cdot (\partial t / \partial n)$ [12].

Например, вследствие прогрева материала с $W_{нач} < 30\%$ с поверхности испаряется влага и внутри высушиваемого материала возникнет градиент влагосодержания $\partial u / \partial n$, направленный от поверхности к середине материала, а вследствие термовлагопроводности – градиент термовлагосодержания $\delta \cdot (\partial t / \partial n)$, направленный от середины к поверхности материала. В результате возникнут два противоположных направления потока влаги – за счет теплопроводности G_u к поверхности, и за счет термовлагопроводности G_t – к середине.

При термовлагопроводности движение влаги всегда направлено в сторону понижения температуры. А теплопроводность обуславливает движение связанной влаги под действием градиента влагосодержания в сторону его понижения (т. е. от центра к поверхности).

При большей интенсивности теплопроводности по сравнению с термовлагопроводностью влага будет перемещаться от внутренних слоев материала к поверхностным, и термовлагопроводность будет препятствовать перемещению потока влаги.

При большей интенсивности термовлагопроводности влага будет перемещаться по направлению потока теплоты, т. е. в направлении увеличения влагосодержания – от поверхности материала вглубь, а теплопроводность будет снижать поток влаги.

Поскольку поток влаги от термовлагопроводности будет переносить с собой и дополнительную теплоту в направлении основного теплового потока, основной закон теплопроводности для случая нагревания древесины выражается уравнением:

$$q = -a \cdot c \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) - i \cdot G, \quad (12)$$

где $\partial t / \partial n$ – градиент температуры, °С/м; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность древесины, кг/м³; iG – количество теплоты, переносимое влагой, кДж·кг/(м²·с); i – энтальпия жидкости (влаги), кДж; G – плотность потока влаги, кг/(м²·с).

Из основного закона перемещения влаги и закона теплопроводности для древесины, содержащей связанную и свободную влагу, получают систему уравнений, моделирующих перемещение теплоты и влаги по сечению сортамента.

С учетом зависимости от температуры и влажности коэффициентов диффузии D , теплопроводности λ , термоградиентного коэффициента δ получают систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. При допущении постоянства этих коэффициентов можно использовать закон переноса массы (влаги) и преобразование Остроградского – Гаусса для получения дифференциального уравнения переноса во времени в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot (\nabla^2 \cdot u + \delta \cdot \nabla^2 \cdot t) + \varepsilon \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial \tau}\right), \quad (13)$$

где ε – коэффициент, характеризующий долю влаги, перемещающейся в виде пара (критерий внутреннего испарения или фазового превращения).

При отсутствии внутреннего испарения ($\varepsilon = 0$) влага перемещается в виде жидкости, при $\varepsilon = 1$ изменение влагосодержания в древесине происходит только за счет испарения жидкости и конденсации пара при отсутствии переноса жидкости.

Для зональной системы расчета тепломассопереноса дифференциальные уравнения переноса имеют вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t + \varepsilon \left(\frac{r}{c}\right) \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \nabla^2 \cdot u + D \cdot \delta \cdot \nabla^2 \cdot t, \quad (15)$$

где t – температура тела, °С; u – удельное влагосодержание, %; c – удельная теплоемкость древесины, Дж/(кг·°С); r – удельная теплота испарения, Дж/кг; $\partial u / \partial \tau$ – изменение влагосодержания в элементарном объеме в единицу времени вследствие испарения или конденсации внутри материала; ∇^2 – оператор Лапласа.

Эти два уравнения полностью описывают внутренний тепло- и массоперенос, и их решение при условии постоянства массообменных характеристик позволит теоретически рассчитать поля температуры и влагосодержания влажного материала.

Заключение. Технологический процесс начального прогрева древесины в ненасыщенной среде сопровождается наличием перепадов влажности и температуры между поверхностными и внутренними слоями образца, что является причиной перемещения влаги по толщине.

Поскольку по сечению (толщине) образца в период прогрева образуется как перепад температур, так и влажности, то общий поток влаги учитывает суммарное действие градиентов влагосодержания и температуры.

Для математического описания процессов тепло- и массопереноса необходимо условно разделить прогреваемый пиломатериал на зоны, в зависимости от их влажности. Нагревание влажных пиломатериалов в ненасыщенной среде происходит при совместном действии явлений теплопроводности и теплообмена, а также влагопроводности и влагообмена.

С учетом зональной системы расчета тепломассопереноса дифференциальные уравнения полностью описывают внутренний тепло- и массоперенос, что позволяет теоретически рассчитать поля температуры и влагосодержания древесины во времени в процессе начального прогрева.

Список литературы

1. 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.
2. Рудак О. Г., Снопков В. Б. Изменение тепловых свойств древесины в период прогрева в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 161–164.
3. Рудак О. Г. Исследование явления термовлагопроводности при прогреве древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (234). С. 233–238.
4. 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.
5. Рудак О. Г., Гуз Ю. А., Снопков В. Б. Исследование напряженно-деформированного состояния древесины при прогреве в ненасыщенной среде // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф. Гродно: ГрГУ, 2011. С. 30–31.
6. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: ГосЭнергоИздат, 1956. 463 с.

7. Шубин Г. С. О коэффициентах переноса тепла и влаги в древесине // *Деревообаб. пром-сть*. 1989. № 8. С. 10–13.
8. Чудинов Б. С. Теория тепловой обработки древесины. М.: Наука, 1968. 255 с.
9. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1987. 360 с.
10. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная пром-сть, 1990. 335 с.
11. Лыков А. В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 247 с.
12. Шубин Г. С. О термовлагопроводности коллоидных капиллярно-пористых тел // *Материалы VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену*. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 8–10 октября 1980 г. Минск, 1980. Т. VII. С. 18–25.

References

1. 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, issue 1 (240): Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, pp. 162–169 (In Russian).
2. 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).
3. 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 (234): Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, pp. 233–238 (In Russian).
4. 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).
5. Rudak O. G., Guz Yu. A., Snopkov V. B. Study of the stress-strain state of wood when heated in an unsaturated environment. *Energo- i materialosberegayushchiye ekologicheski chistyye tekhnologii: tez. dokl. IX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Energy- and material-saving, environmentally friendly technologies. IX international scientific and technical conference]. Grodno, 2011, pp. 30–31 (In Russian).
6. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow, GosEnergolzdats Publ., 1956. 463 p.
7. Shubin G. S. On the coefficients of heat and moisture transfer in wood *Derevoobrabatyvayushaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 1989, no. 8, pp. 10–13 (In Russian).
8. Chudinov B. S. *Teoriya teplovoy obrabotki drevesiny* [Theory of wood heat treatment]. Moscow, Nayka Publ., 1968. 255 p.
9. Sergovsky P. S., Rasev A. I. *Gidrottermicheskaya obrabotka i konservirovaniye drevesiny* [Hydrothermal processing and preservation of wood] Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ. 1987. 360 p.
10. Shubin G. S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 335 p.
11. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Methods of determining thermal conductivity and thermal conductivity]. Moscow, Energia Publ., 1973. 413 p.
12. Shubin G. S. On Thermal Conductivity of Colloidal Capillary-Porous Bodies. *Materialy VI Vsesoyuznoy konferentsii po teplomassoobmenu* [Materials of the VI All-Union Conference on Heat and Mass Exchange]. Minsk, 1980, vol. 7, pp. 18–25 (In Russian).

Информация об авторе

Рудак Оксана Геннадьевна – магистр технических наук, 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