

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ОСИНОВЫХ ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ: МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Г.Н. Колесников, А.В. Кантышев, М.И. Зайцева, Т.А. Гаврилов, Ю.В. Никонова

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), 185910, Российская Федерация, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

gavrilov@petsu.ru

Сушка является необходимым звеном в технологии подготовки древесины к дальнейшему использованию в строительстве, мебельном производстве и в других областях производства. Известно множество способов сушки. В настоящее время чаще других используется конвективная сушка, как наиболее приемлемая по критериям технической возможности ее осуществления и экономической целесообразности. Для количественной оценки изменений влажности древесины в процессе сушки использован сушильно-весовой метод, в качестве характеристики влажности в теоретической части представленной работы рассматривается относительная влажность. Объект исследования — процесс изменения влагосодержания при конвективной сушке тонкомерных (толщиной до 22 мм) заготовок из осины, предназначенных для получения элементов ограждающих конструкций. Методы исследования — системный анализ технологического процесса сушки древесины, эксперименты в лабораторных условиях и математическое моделирование. При решении задач исследования использованы известные ранее результаты, а также полученные авторами в предыдущих работах. Эксперименты по сушке образцов выполнены с использованием анализатора влажности Shimadzu MOC-120H. Новизна работы заключается в построении физической модели процесса изменения влагосодержания при сушке древесины, а также в обосновании математического описания физической модели и экспериментальной проверке адекватности результатов моделирования.

Ключевые слова: конвективная сушка древесины, математическая модель, эксперимент

Ссылка для цитирования: Колесников Г.Н., Кантышев А.В., Зайцева М.И., Гаврилов Т.А., Никонова Ю.В. Конвективная сушка осиновых заготовок малой толщины: модель и эксперименты // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 3. С. 87–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94

Сушка является необходимым звеном в технологии подготовки древесины к дальнейшему использованию в строительстве, мебельном производстве и в других областях производства [1]. Известно множество способов сушки [2, 3], однако в настоящее время чаще других используется конвективная сушка, как наиболее приемлемая по критериям технической возможности ее осуществления и экономической целесообразности [4]. Для количественной оценки влажности древесины используют сушильно-весовой метод [5], теоретический анализ которого выполнен в работе [6].

Необходимо заметить, что для количественной оценки влажности в литературе по теме данной работы используют абсолютную влажность W_a и относительную влажность W_r (таблица), которые связаны соотношениями:

$$W_r = 100W_a / (100 + W_a), W_a = 100W_r / (100 - W_r).$$

Соотношение W_r и W_a
Correlation W_r and W_a

W_r (%)	0,0	5,0	10,0	25,0	50,0	70,0
W_a (%)	0,0	5,3	11,1	33,3	100,0	233,3

Особенность данной работы заключается в том, что рассматривается сушка тонкомерных осиновых элементов [7], используемых в ограждающих конструкциях [8], для которых необходима защита как от воздействий огня [9], так и от биодеструкции при микогенном поражении древесины [10–12]. К основным способам защиты древесины относится пропитка. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что предварительная сушка при определенных условиях позволяет повысить эффективность пропитки [13], однако для уточнения закономерностей сушки в целях совершенствования данного технологического процесса необходима разработка соответствующих математических моделей и проверка их адекватности с учетом известного опыта [14–16].

Влага в древесине содержится в стенках клеток и заполняет внутриклеточные и межклеточные пространства. Влага, содержащаяся в стенках клеток, называется связанной, или гигроскопической. Влага, заполняющая внутриклеточные и межклеточные пространства, называется свободной, или капиллярной. При сушке любого лесоматериала влага мигрирует из внутренней его области к поверхности, затем испаряется. Прежде всего испаряется свободная влага, затем связанная. Влага из воздуха поглощается стенками клеток до состояния равновесной влажности [6, 17].

Механизм взаимодействия основных компонентов древесины (целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз) с влагой исследован в работе [18], в которой показано, что в количественном отношении связанная влага в древесине находится в метастабильном состоянии, зависящем от влажности воздуха. В рамках данной работы важно обратить внимание на минимальное и максимальное содержание физически связанной влаги в древесине.

В работе [5, с. 111] установлено, что равновесная влажность древесины не может быть меньше 0,72–1,15 %. Максимальное содержание физически связанной влаги в древесине хвойных и лиственных пород составляет около 30 % [18, с. 159]. При этом, согласно [18], «только связанная вода (молекулы воды, внедрившиеся в водородные связи компонентов древесины) вызывает разбухание древесины и способствует изменению ее физико-механических свойств ... При внедрении молекулы воды в водородную связь расстояние между макромолекулами увеличивается, что приводит к разбуханию кристаллической структуры целлюлозы на 12 %». Это необходимо учитывать при регламентировании качества сушки древесины.

Обоснование предложений по совершенствованию системы требований к качеству сушки пиломатериалов выполнено в работе [2]. Одно из требований ограничивает перепад влажности по толщине пиломатериалов, однако для элементов малой толщины (до 22 мм) перепад незначителен. В то же время необходимо обеспечить соответствие средней влажности высушенных материалов заданной конечной влажности, а также гарантировать величину отклонений влажности отдельных заготовок от средней влажности в штабеле [2, с. 134]. Выполнение этих требований и обеспечение достаточной эффективности конвективной сушки во многом определяется возможностями прогнозирования результатов переноса тепла и влаги в древесине и оперативного управления этим процессом, что предполагает применение методов математического моделирования.

Однако процессы переноса тепла и влаги при сушке древесины как анизотропного капиллярно-пористого материала с учетом естественной вариативности физических свойств и их изменений в процессе сушки остаются источником сложных прикладных задач для моделирования. Тем самым объясняется актуальность проблемы совершенствования технологий сушки с использованием современных возможностей математического моделирования. В рамках данной проблемы выполнено множество исследований, посвященных моделированию различных способов сушки древесины [3, 19–22] и способам верификации моделей [4, 5, 14–16].

Как правило, на стадиях построения физической модели сушки древесины и математического описания физической модели появляется необходимость использования ряда параметров, определение числовых значений которых затруднительно. В этой связи к приоритетным задачам в данной области прикладных исследований может быть отнесена задача построения математической модели конвективной сушки с относительно небольшим (необходимым и достаточным) числом параметров.

Сушка древесины требует определенных затрат энергии, времени и ресурсов оборудования. Режимы сушки лесоматериалов из древесины сосны, ели, кедра, пихты, осины, липы, тополя, березы, ольхи толщиной до 100 мм регламентированы в действующем ГОСТ 19773–84. Сушка до получения влажности, дозированной в соответствии с назначением пиломатериалов [2], позволяет повысить качество изделий из древесины без избыточных затрат на ее переработку. Применительно к рассматриваемым в данной статье изделиям [7, 8] в соответствии с ГОСТ 20022.6–93, достаточна их сушка до получения предпропиточной абсолютной влажности 30 %, что соответствует относительной влажности, равной 23 %.

Как отмечено выше, целям рационального использования ресурсов отвечает использование возможностей математического моделирования для прогнозирования и управления параметрами технологического процесса сушки древесины [2, 4, 5]. Известен ряд моделей и технологий сушки, каждая из которых наиболее эффективна в определенной области [4, 6, 14, 19–22, 23].

Цель работы

Целью работы является разработка математической модели конвективной сушки тонкомерных заготовок из древесины осины с относительно небольшим числом параметров.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — процесс изменения влагосодержания при конвективной сушке тонкомерных (толщиной до 22 мм) заготовок из осины, предназначенных для получения элементов ограждающих конструкций [7, 8]. Методы исследования — системный анализ технологического процесса сушки древесины, эксперименты в лабораторных условиях [13] и математическое моделирование зависящего от времени влагосодержания при конвективной сушке тонкомерных заготовок из осины. При решении задач данного исследования использованы известные ранее результаты, а также полученные авторами в предыдущих работах [7, 13]. При определении влажности определялась масса образца, отдающего влагу агенту сушки с некоторой конечной интенсивностью [6, с. 109].



Рис. 1. Анализатор влажности Shimadzu MOC-120H
Fig. 1. Humidity analyzer Shimadzu MOC-120H

Новизна представленной работы заключается в построении физической модели процесса изменения влагосодержания при сушке древесины, а также в обосновании математического описания физической модели и экспериментальной проверке результатов моделирования. Эксперименты по сушке образцов выполнены с использованием анализатора влажности Shimadzu MOC-120H (рис. 1), в котором в процессе сушки образцов при постоянной температуре 100 °С выполнялось автоматическое взвешивание через каждые 30 с. Результаты измерений автоматически фиксировались в памяти компьютера. Указанная температура выбрана для того, чтобы исключить изменение цвета (потемнение) древесины при температуре выше 100 °С [24], нежелательное в данном случае [8].

Результаты и обсуждение

Моделируя процесс изменения влагосодержания при сушке древесины, рассмотрим некоторый образец массой M . Пусть M_b — масса свободной и связанной влаги в капиллярно-пористом материале образца. Тогда $C_b = M_b / M$ — относительная влажность материала образца. Обозначим C_{b0} — начальная относительная влажность материала образца. Сушка выполняется при температуре T . При этом с течением времени, за счет уменьшения влажности, M_b и M уменьшаются на одну и ту же величину ΔM_b . Тогда в моменты времени t и $t^* = t + \Delta t$ масса влаги равна, соответственно, M_b и $(M_b - \Delta M_b)$; масса образца в те же моменты времени равна M и $(M - \Delta M_b)$. Относительная влажность в те же моменты времени:

$$C_b = \frac{M_b}{M}, \quad C_b^* = \frac{M_b - \Delta M_b}{M - \Delta M_b}. \quad (1)$$

С физической точки зрения правомерно предположить, что величина ΔM_b пропорциональна

Δt и M_b . С другой стороны, величина ΔM_b зависит от технологических параметров сушки, породы древесины и других факторов, суммарное влияние которых учтем технологическим параметром модели τ . Таким образом,

$$\Delta M_b = \frac{\Delta t}{\tau} M_b. \quad (2)$$

Параметр τ имеет размерность времени, и его значение определяется с использованием экспериментальных данных.

Перейдем к безразмерным параметрам. Обозначим $\theta = t / \tau$, тогда

$$\Delta \theta = \Delta t / \tau. \quad (3)$$

Используя (1)–(3), выразим C_b^* :

$$C_b^* = \frac{M_b - \Delta M_b}{M - \Delta M_b} = \frac{M_b - \Delta \theta M_b}{M(1 - \Delta \theta C_b)} = \frac{C_b - \Delta \theta C_b}{1 - \Delta \theta C_b}. \quad (4)$$

Определим изменение относительной влажности на отрезке времени Δt : $\Delta C_b = C_b^* - C_b$. Учитывая (1), (4) и $\Delta C_b \Delta \theta \approx 0$, получим после преобразований:

$$\Delta C_b = -\Delta \theta C_b (1 - C_b). \quad (5)$$

Как отмечено выше, влажность древесины не может быть меньше 0,72–1,15 % [5, С. 111], т. е. примерно 1 %. При столь малых значениях количественные выражения абсолютной и относительной влажности почти совпадают. Таким образом, значения относительной влажности в формуле (5) находятся в интервале $0,01 < C_b < 1$, или, в процентном выражении, $1 \% < C_b < 100 \%$. Как известно, сплавная древесина имеет относительную влажность 0,6 и более, свежесрубленная — примерно 0,5. Требования к влажности лесоматериалов хвойных и лиственных пород, а также технологические параметры сушки определены в ГОСТ 19773–84 (с изменениями № 1, 2).

Соотношение (5) позволяет численно найти приближенное значение C_b для конечных приращений $\Delta \theta$ и ΔC_b . Чтобы найти аналитическое (точное) выражение для определения относительной влажности C_b , решим дифференциальное уравнение, которое получим из соотношения (5) при $\Delta \theta \rightarrow 0$:

$$\frac{dC_b}{C_b(1-C_b)} = -d\theta. \quad (6)$$

Интегрируя (6), получим $\ln(C_b / (1 - C_b)) = -\theta + A$. Определив константу интегрирования A из условия, что начальная относительная влажность известна на старте процесса сушки при $\theta \rightarrow 0$, т. е. $C_b = C_{b0}$, получим после несложных преобразований:

$$C_b = \frac{\exp(-\theta)}{C_{b0}^{-1} - 1 + \exp(-\theta)}. \quad (7)$$

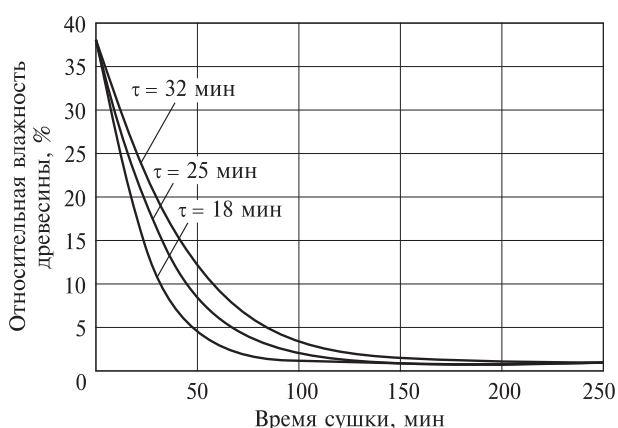


Рис. 2. Зависимость относительной влажности древесины от продолжительности сушки

Fig. 2. Dependence of the relative wood humidity on the drying duration

Оценивая физическую адекватность результатов вычислений по формуле (7), необходимо отметить следующее. Если продолжительность сушки, а значит и параметр $\Delta\theta$ (3) стремятся к бесконечности, то влажность по формуле (7) стремится к нулю. Однако реальные значения относительной влажности C_b находятся в интервале $0,01 < C_b < 1$. Таким образом, в формуле (7) не учтено ограничение на минимальное значение влажности $C_b = C_{b\infty}$, которое достигается при увеличении времени сушки, т. е. если $t \rightarrow \infty$, то и параметр $\theta = t / \tau \rightarrow \infty$.

Чтобы учесть данное обстоятельство, дополним правую часть (7) мультипликативной поправкой, которая зависит от значения исследуемой величины C_b , а именно равна нулю при $\theta = 0$ и $C_b \rightarrow C_{b\infty}$ при $\theta \rightarrow \infty$:

$$C_b = \frac{\exp(-\theta)}{C_{b0}^{-1} - 1 + \exp(-\theta)} + C_{b\infty} \left(1 - \frac{C_b}{C_{b0}} \right). \quad (8)$$

Из соотношения (8) найдем

$$C_b = \left(\frac{\exp(-\theta)}{C_{b0}^{-1} - 1 + \exp(-\theta)} + C_{b\infty} \right) / \left(1 + \frac{C_{b\infty}}{C_{b0}} \right). \quad (9)$$

Графики функции (9) при некоторых значениях указанного параметра τ (3) приведены на рис. 2.

Относительная влажность может рассматриваться как количественная оценка изменения массы древесины при сушке. На рис. 3 представлены в графической форме результаты экспериментов и вычислений по формуле (9).

Сушка осинового образца с начальной относительной влажностью 38 % выполнялась с использованием возможностей сушильной камеры анализатора влажности Shimadzu MOC-120H (см. рис. 1) при температуре 100 °С и автоматическом измерении массы каждые 30 с.

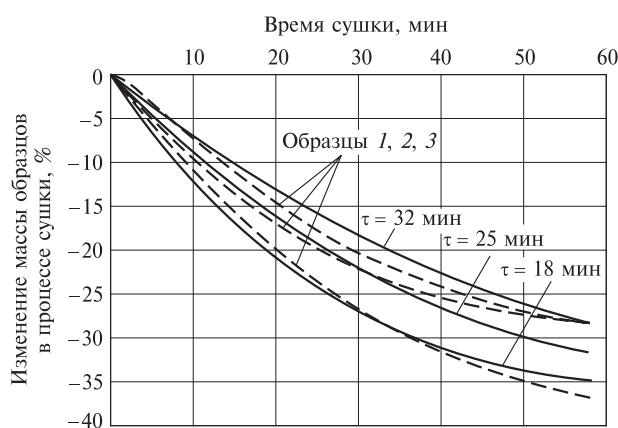


Рис. 3. Зависимость снижения массы образцов от продолжительности сушки: 1, 2, 3 — результаты экспериментов

Fig. 3. The dependence of the mass reduction of samples on the drying time: 1, 2, 3 — the results of experiments

Относительно небольшое различие результатов моделирования с применением соотношения (9) и экспериментальных данных для образцов 1, 2 и 3 (см. рис. 3) объясняется влиянием таких факторов, как вариативность начальной влажности и плотности древесины в стволе дерева [25], изменение физико-механических свойств древесины при термической обработке [26] и т. п. Таким образом, разработанная модель достаточно адекватна и может быть рекомендована для прогнозирования закономерностей процесса сушки древесины в зависимости от начальной влажности C_{b0} , продолжительности сушки t и технологического параметра τ .

Уточнение значений данного параметра в зависимости от температуры сушки, породы и начальной влажности древесины может составить предмет дальнейших исследований по теме выполненной работы.

Выводы

Выполнено теоретическое исследование технологического процесса сушки тонкомерных элементов из древесины осины. Как результат исследования, разработано математическое описание изменения влажности древесины в процессе сушки. Обоснована расчетная формула для прогнозирования значений влажности в зависимости от продолжительности сушки.

Адекватность результатов вычислений по предложенной методике подтверждена согласованностью с известными ранее экспериментальными данными, а также полученными авторами статьи.

Практическое значение работы определяется применимостью результатов выполненного исследования при обосновании технологических параметров сушки древесины.

Перспективы дальнейших исследований по теме представленной работы связаны с уточнением значений технологического параметра модели в зависимости от температуры сушки, породы и начальной влажности древесины.

Список литературы

- [1] Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Хабибуллин И.Г., Зиятдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов // Вестник Казанского технологического университета, 2015. Т. 18. № 21. С. 90–93.
- [2] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А., Булатов С.В. Совершенствование системы требований к качеству сушки пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 2 (34). С. 133–138.
- [3] Мелехов В.И., Шульгин В.А. Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2015. Т. 19. № 5. С. 135–145.
- [4] Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 : защищена 28.06.16. Екатеринбург, 2016. 336 с.
- [5] Расев А.И. Сушка древесины. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 410 с.
- [6] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А., Булатов С.В. Теоретическое исследование сушильно-весового метода контроля влажности древесины // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 3 (35). С. 107–112.
- [7] Борисов А.Ю., Колесников Г.Н. Переработка короткомеров осины на дранку в условиях лесопромышленного склада // Resources and Technology, 2014. Т. 11. № 2. С. 152–161.
- [8] Борисов А.Ю. Древесина осины как материал для устройства кровли // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2014. № 8–1 (145). С. 87–90.
- [9] Колесников Г.Н., Борисов А.Ю. Огнезащита тонкомерных элементов кровель из осины и сосны // Безопасность в техносфере, 2016. Т. 5. № 3. С. 58–64.
- [10] Saito H. Application of the Wood Degradation Model to an Actual Roof Assembly subjected to Rain Penetration // Energy Procedia, 2017, v. 132, pp. 399–404.
- [11] Gabriel J., Švec K. Occurrence of indoor wood decay basidiomycetes in Europe // Fungal Biology Reviews, 2017, no. 31 (4), pp. 212–217.
- [12] Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д. Химический метод оценки степени биодegradации древесины конструктивных элементов // Инженерно-строительный журнал, 2014. № 3. С. 77–89.
- [13] Кантышев А.В., Борисов А.Ю., Колесников Г.Н. Сушка и пропитка тонкомерных осинового образцов // Инновационные подходы в решении проблем современного общества / под ред. Г.Ю. Гуляева. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. С. 237–244.
- [14] Sandoval-Torres S., Pérez-Santiago A., Hernández-Bautista E. Drying model for softwood and moisture patterns measured by magnetic resonance imaging // Drying Technology, 2018, no. 1–10. DOI:10.1080/07373937.2018.1457050
- [15] René Herrera-Díaz, Víctor Sepúlveda-Villaruel, Natalia Pérez-Peña, Linette Salvo-Sepúlveda, Carlos Salinas-Lira, Rodrigo Llano-Ponte & Rubén A. Ananías. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine // Drying Technology, 2018, no. 36 (5), pp. 537–544. DOI:10.1080/07373937.2017.1342094
- [16] Xu K., Lu J., Gao Y., Wu Y., Li X. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance // Drying Technology, 2017, no. 35 (15), pp. 1909–1918.
- [17] Wong E.H. Characterising the kinetics of the free and the bound water using non-isothermal sorption technique // Drying Technology, 2016, no. 35 (1), pp. 46–54. DOI:10.1080/07373937.07372016.01158722
- [18] Врублевская В.И., Матусевич В.О., Кузнецова В.В. Обоснование механизма взаимодействия компонентов древесины с влагой // Лесной журнал, 2017. № 3. С. 152–163. DOI:10.17238/issn0536-1036.2017.3.152
- [19] Куницкая О.А., Шапиро В.Я., Бурмистрова С.С., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Обоснование исходных требований математической модели обезвоживания древесины в процессе прессования и сушки // Известия высших учебных заведений – Лесной журнал, 2012. № 1 (325). С. 70–79.
- [20] Сафин Р.Р., Шамсутдинова А.И., Илалова Г.Ф., Мухтарова А.Р. Вакуумная СВЧ сушка древесины: формулирование математической модели // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2017. № 50. С. 53–56.
- [21] Земцовский А.Е., Сидоров Г.И. Разработка концепции математической модели прогнозирования качества сушки пиломатериалов // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 2 (34). С. 129–132.
- [22] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Математическая модель конвективной сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов при давлении ниже атмосферного // Вестник Казанского технологического университета, 2004. № 1. С. 266–273.
- [23] Курьшов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка пиломатериалов из древесины бука в конвективных сушильных камерах // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2018. Т. 22. № 2. С. 76–80. DOI:10.18698/2542-1468-2018-2-76-80
- [24] Ермоченков М.Г., Хроменко А.В. Изменение цвета древесины березы при тепловом воздействии // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 15–21.
- [25] Михеевская М.А. Вариативность влажности и плотности древесины осины в стволе дерева // Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития / Отв. редактор А.А. Сукиасян. Уфа: Омега Сайнс, 2017. С. 89–91.
- [26] Королев А.С., Шапкина А.В., Разинов А.С., Цветкова Е.М. Изменение физико-механических свойств древесины липы и осины после термической обработки // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая, 2014. № 2. С. 213–218.

Сведения об авторах

Колесников Геннадий Николаевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра общетехнических дисциплин, Институт лесных, горных и строительных наук, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», kgn@petsu.ru

Кантышев Антон Владимирович — аспирант, кафедра общетехнических дисциплин, Институт лесных, горных и строительных наук, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», kantyshev.a@yandex.ru

Зайцева Мария Игоревна — канд. техн. наук, доцент, кафедра технологии и организации строительства, Институт лесных, горных и строительных наук, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», 2003bk@bk.ru

Гаврилов Тиммо Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра общетехнических дисциплин, Институт лесных, горных и строительных наук, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», gavrilov@petsu.ru

Никонова Юлия Васильевна — канд. техн. наук, доцент, кафедра технологии и организации строительства, Институт лесных, горных и строительных наук, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», juli4455@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2019.

Принята к публикации 25.02.2019.

CONVECTIVE SEASONING OF SMALL THICKNESS ASPEN WORKPIECES: MODEL AND EXPERIMENTS

G.N. Kolesnikov, A.V. Kantyshev, M.I. Zaitseva, T.A. Gavrilov, Yu.V. Nikonova

Petrozavodsk State University (PetrSU), 33, Lenina pr., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

gavrilov@petsu.ru

Drying is a necessary link in the technology of preparation of wood for further use in construction, furniture production and for other purposes. There are many methods of drying, of which are currently more often used convective drying, as the most acceptable on criteria for the technical feasibility of its implementation and economic feasibility. To quantify the changes in the moisture content of wood in the drying process used drying-weight method, as a characteristic of humidity in the theoretical part of the present work used relative humidity. Purpose: development of a mathematical model of convective drying of thin-gauge billets of aspen wood with a relatively small number of parameters. The object of study — the process of changing the moisture content in the convective drying of thin (up to 22 mm thick) billets from aspen, designed to produce elements of enclosing structures. Research methods-system analysis of the technological process of wood drying, experiments in the laboratory and mathematical modeling. In solving the problems of the study, the results are used, both known from the literature and obtained by the authors in previous works. The experiments on drying the samples were performed using Shimadzu MOC-120H moisture analyzer. The novelty of the work lies in the construction of a physical model of the process of changing the moisture content in the drying of wood, as well as in the justification of the mathematical description of the physical model and experimental verification of the adequacy of the simulation results.

Keywords: convective drying of wood, mathematical model, experiment

Suggested citation: Kolesnikov G.N., Kantyshev A.V., Zaitseva M.I., Gavrilov T.A., Nikonova Yu.V. *Konvektivnaya sushka osinovykh zagotovok maloy tolshchiny: model' i eksperimenty* [Convective seasoning of small thickness aspen workpieces: model and experiments]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 87–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-87-94

References

- [1] Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziatdinov R.R., Stepanova T.O. *Sovremennye napravleniya pererabotki lesnykh resursov* [Modern areas of forest resources processing]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2015, v. 18, no. 21, pp. 90–93.
- [2] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A., Bulatov S.V. *Sovershenstvovanie sistemy trebovaniy k kachestvu sushki pilomaterialov* [Improving the system of requirements for the quality of sawn timber drying]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies], 2017, no. 2 (34), pp. 133–138.
- [3] Melekhov V.I., Shul'gin V.A. *Rezonansnye yavleniya v protsesse SVCh-sushki drevesiny* [Resonance phenomena in the process of microwave drying of wood]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest Journal], 2015, v. 19, no. 5, pp. 135–145.

- [4] Shishkina E.E. *Energosberegayushchaya tekhnologiya konvektivnoy sushki pilomaterialov na osnove upravlyаемого vlazheniya v drevesine : diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.05 : zashchishchena 28.06.16*. [Energy-saving technology of convective drying of sawn timber based on controlled moisture transfer in wood. Diss. ... Dr. Sci. (Tech.): 05.21.05: Protected on 28.06.16]. Ekaterinburg, 2016, 336 p.
- [5] Rasev A.I. *Sushka drevesiny* [Drying wood]. St. Petersburg: Lan', 2014, 410 p.
- [6] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A., Bulatov S.V. *Teoreticheskoe issledovanie sushil'no-vesovogo metoda kontrolya vlazhnosti drevesiny* [Theoretical study of the weight-drying method for controlling wood moisture]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technology], 2017, no. 3 (35), pp. 107–112.
- [7] Borisov A.Yu., Kolesnikov G.N. *Pererabotka korotkomerov osiny na dranku v usloviyakh lesopromyshlennogo sklada* [Processing aspen shortcuts for shingles in a timber processing warehouse]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2014, v. 11, no. 2, pp. 152–161.
- [8] Borisov A.Yu. *Drevesina osiny kak material dlya ustroystva krovli* [Aspen wood as a material for roofing]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk State University], 2014, no. 8–1 (145), pp. 87–90.
- [9] Kolesnikov G.N., Borisov A.Yu. *Ognezashchita tonkomernykh elementov krovel' iz osiny i sosny* [Fire protection of small-sized elements of roofs made of aspen and pine]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the Technosphere], 2016, v. 5, no. 3, pp. 58–64.
- [10] Saito H. Application of the Wood Degradation Model for an Actual Roof. *Energy Procedure*, 2017, v. 132, pp. 399–404.
- [11] Gabriel J., Svec K. Occurrence of the indoor wood decay basidiomycetes in Europe. *Fungal Biology Reviews*, 2017, no. 31 (4), pp. 212–217.
- [12] Serova T.A., Titova Yu.A., Shenin Yu.D. *Khimicheskij metod otsenki stepeni biodegradatsii drevesiny konstruktivnykh elementov* [Chemical method for assessing the degree of wood biodegradation of structural elements]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and Construction Journal], 2014, no. 3, pp. 77–89.
- [13] Kantyshev A.V., Borisov A.Yu., Kolesnikov G.N. *Sushka i propitka tonkomernykh osinovykh obraztsov* [Drying and impregnation of small aspen samples]. *Innovatsionnye podkhody v reshenii problem sovremennogo obshchestva* [Innovative approaches in solving problems of modern society]. Ed. G.Yu. Gulyaev. Penza: ICSN Science and Enlightenment, 2018, pp. 237–244.
- [14] Sandoval-Torres S., Pérez-Santiago A., Hernández-Bautista E. Drying model for softwood and moisture patterns measured by magnetic resonance imaging. *Drying Technology*, 2018, no. 1–10. DOI:10.1080/07373937.2018.1457050
- [15] Herrera-Diaz R., Sepúlveda-Villarreal V., Pérez-Peña N., Salvo-Sepúlveda L., Salinas-Lira C., Llano-Ponte R., A. Ananias R. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. *Drying Technology*, 2018, no. 36 (5), pp. 537–544. DOI:10.1080/07373937.2017.1342094
- [16] Xu K., Lu J., Gao Y., Wu Y., Li X. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance. *Drying Technology*, 2017, no. 35 (15), pp. 1909–1918.
- [17] Wong E.H. Characterising the kinetics of the free and the bound water using non-isothermal sorption technique. *Drying Technology*, 2016, no. 35 (1), pp. 46–54. DOI:10.1080/07373937.07372016.01158722
- [18] Vrublevskaya V.I., Matusevich V.O., Kuznetsova V.V. *Obosnovanie mekhanizma vzaimodeystviya komponentov drevesiny s vlagoy* [Justification of the mechanism of interaction of wood components with moisture]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2017, no. 3, pp. 152–163. DOI:10.17238/issn0536-1036.2017.3.152
- [19] Kunitskaya O.A., Shapiro V.Ya., Burmistrova S.S., Grigor'ev I.V., Zemtsovskiy A.E. *Obosnovanie iskhodnykh trebovaniy matematicheskoy modeli obezvozhivaniya drevesiny v protsesse pressovaniya i sushki* [Justification of the initial requirements of the mathematical model of wood dehydration in the process of pressing and drying]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy – Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions – Forest Journal], 2012, no. 1 (325), pp. 70–79.
- [20] Safin R.R., Shamsutdinova A.I., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R. *Vakuumnaya SVCh sushka drevesiny: formulirovanie matematicheskoy modeli* [Microwave vacuum drying of wood: the formulation of a mathematical model]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2017, no. 50, pp. 53–56.
- [21] Zemtsovskiy A.E., Sidorov G.I. *Razrabotka kontseptsii matematicheskoy modeli prognozirovaniya kachestva sushki pilomaterialov* [Development of the concept of a mathematical model for predicting the quality of lumber drying]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies], 2017, no. 2 (34), pp. 129–132.
- [22] Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G. *Matematicheskaya model' konvektivnoy sushki kolloidnykh kapillyarno-poristykh materialov pri davlenii nizhe atmosfornogo* [Mathematical model of convective drying of colloid capillary-porous materials at a pressure below atmospheric]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2004, no. 1, pp. 266–273.
- [23] Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka pilomaterialov iz drevesiny buka v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh* [Pulsed drying of lumber from beech wood in convective drying chambers] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2018, v. 22, no. 2, pp. 76–80. DOI:10.18698/2542-1468-2018-2-76-80
- [24] Ermochenkova M.G., Khromenko A.V. *Izmenenie tsveta drevesiny berezy pri teplovom vozdeystvii* [The change in the color of birch wood during thermal exposure]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2017, v. 7, no. 3 (27), pp. 15–21.
- [25] Mikheevskaya M.A. *Variativnost' vlazhnosti i plotnosti drevesiny osiny v stvole dereva* [Variability of humidity and density of aspen wood in a tree trunk]. *Novaya nauka: istoriya stanovleniya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya* [New science: history of formation, current state, development prospects] Ed. A.A. Sukiasyan. Ufa: Omega Sainz, 2019, pp. 89–91.
- [26] Korolev A.S., Shapkina A.V., Razinov A.S., Tsvetkova E.M. *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny lipy i osiny posle termicheskoy obrabotki* [Changes in the physico-mechanical properties of linden and aspen wood after heat treatment]. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya* [Proceedings of the Volga State University of Technology. Series: Technological], 2014, no. 2, pp. 213–218.

Authors' information

Kolesnikov Gennady Nikolayevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of technical disciplines, Institute of forest, mining and building Sciences, Petrozavodsk state University, kgn@petsu.ru

Kantyshev Anton Vladimirovich — pg., Department of technical disciplines, Institute of forest, mining and building Sciences, Petrozavodsk state University, kantyshev.a@yandex.ru

Zaitseva Maria Igorevna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of technology and organization of construction, Institute of forest, mining and building Sciences, Petrozavodsk state University, 2003bk@bk.ru

Gavrilov Timmo Alexandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of technical disciplines, Institute of forest, mining and building Sciences, Petrozavodsk state University, gavrilov@petsu.ru

Nikonova Yulia Vasilievna — Cand. Sci. (Tech.), Head of Information technology center, Institute of forest, mining and building Sciences, Petrozavodsk state University, juli4455@mail.ru

Received 18.01.2019.

Accepted for publication 25.02.2019.