

Разработка концепции математической модели прогнозирования качества сушки пиломатериалов

А.Е. Земцовский^а, Г.И. Сидоров^б

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины 17, Архангельск, Россия

^аa.zemtsovsky@narfu.ru, ^бhotsupport@yandex.ru

Статья поступила 23.12.2016, принята 18.02.2017

С позиций влагопереноса и теории вероятностей рассмотрена концепция построения математической модели системы прогнозирования качества сушки пиломатериалов. Выявлены факторы, влияющие на равномерность распределения конечной влажности в штабеле, а также по толщине пиломатериалов. Доказано, что доминирующее влияние на качество высушиваемых пиломатериалов окажет комплекс неуправляемых факторов, важнейшими из которых являются начальная влажность и базисная плотность древесины. Разработана аналитическая вероятностная математическая модель системы «сушильный штабель пиломатериалов». В качестве основного допущения принята некоррелируемость параметров физических свойств пиломатериалов — начальной влажности и базисной плотности. Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на показатели качества пиломатериалов. Разработаны многофакторные математические модели и методика прогнозирования влажностных показателей качества сушки пиломатериалов. На стадии нерегулярного режима использовано приближенное решение уравнения влагопроводности, на стадии регулярного режима — балансовые уравнения с заданным характером распределения влажности по толщине доски. Сопоставлены количественные значения влажностных показателей качества сушки, показано влияние каждого из физических свойств древесины в отдельности на средние квадратические отклонения конечной влажности и перепада влажности по сечению пиломатериалов. Представленная математическая модель позволяет прогнозировать влажностные показатели качества сушки пиломатериалов различных пород, технологических режимов с разным количеством ступеней и разной скоростью циркуляции агента сушки, с использованием приборов контроля параметров агента сушки, имеющих разную степень точности, а также различных сочетаний интервалов варьирования и средних значений начальной влажности и базисной плотности.

Ключевые слова: сушка древесины; лесосушильная камера; начальная влажность; перепад влажности; отклонение влажностных показателей качества пиломатериалов.

Development of the concept of a mathematical model for predicting the quality of timber drying

A.E. Zemtsovsky^a, G.I. Sidorov^b

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^aa.zemtsovsky@narfu.ru, ^bhotsupport@yandex.ru

Received 23.12.2016, accepted 18.02.2017

From the standpoint of probability theory and moisture and heat resistance, the concept of constructing a mathematical model of a system for predicting the quality of timber drying is considered. The factors influencing the uniformity of final moisture content in the pile of lumber and lumber thickness are revealed. It is proved that a dominant influence on the quality of the dried lumber will provide a range of uncontrollable factors, the most important of which are the initial moisture content and basic wood density. An analytical probabilistic mathematical model of the system "drying stack of lumber" is developed. As a basic assumption, the lack of correlativity of parameters of lumber physical properties, such as initial moisture content and basic density, are taken. The factors affecting the quality of sawn timber are identified and analyzed. Multifactorial mathematical models and a technique for forecasting humidity parameters of the quality of timber drying are developed. At the stage of the irregular regime, an approximate solution of the moisture conductivity equation is used, at the stage of the regular regime - balance equations with a given character of the distribution of moisture along the thickness of the board. The quantitative values of humidity parameters of the quality of drying are compared. The influence of each of the physical properties of the wood on the average square deviations of the final moisture content and humidity drop across the sawn timber section is shown. The presented mathematical model allows to predict humidity parameters of quality of timber drying of different species, technological regimes with a different number of stages and different drying speed of the drying agent, when using instruments for monitoring the parameters of the drying agent having different degrees of accuracy, as well as various combinations of variation intervals and average values of initial humidity and the basis density.

Keywords: timber drying; wood drying chamber; initial humidity; humidity drop; deviation of humidity conditions of timber quality.

Введение

Процесс производства изделий из древесины может быть представлен как многостадийный со сложной системой прямых и обратных связей. На этапе сушки формируется значительное количество потребительских свойств будущей готовой продукции.

Высокое качество сушки пиломатериалов в лесосушильных камерах может быть обеспечено целым комплексом технологических и технических факторов. Сюда относятся физические свойства древесины, правильный выбор технологии лесопиления и сушки и др.

Концепция модели. Проведенный нами анализ априорной информации и результатов собственных исследований [5] показал, что существенное влияние на качественные показатели сухих пиломатериалов оказывают начальная влажность и плотность древесины. Базисная плотность оказывает решающее влияние на скорость сушки [9; 10], а, следовательно, и на показатели равномерности распределения влажности после сушки как в общей совокупности досок в штабеле, так и в отдельно взятой доске [12; 13]. В основе колебаний плотности лежат неоднородности в анатомическом строении древесины. Поэтому плотность древесины даже в пределах одной породы имеет значительные колебания. Следует отметить, что, к примеру, плотность поздней древесины сосны смолистой в 2...3 раза превышает плотность ранней зоны [3; 6]. Базисная плотность зависит также от положения древесины по высоте ствола, места произрастания, густоты насаждений и ряда других неуправляемых факторов. Например, количественные значения диапазона варьирования базисной плотности древесины сосны могут достигать 300–600 кг/м³ [3; 6].

Таким образом, проведенный анализ основных физических параметров пиломатериалов показал, что они варьируются в достаточно широком диапазоне. Следует отметить также, что дальнейшее совершенствование техники и технологии камерной сушки и технологии деревообработки в целом позволит в известной степени снизить, а, возможно, и полностью устранить отрицательное воздействие некоторых технических факторов на показатели качества высушиваемых пиломатериалов [11; 12]. Поэтому очевидно, что доминирующее влияние на качество высушиваемых пиломатериалов окажет комплекс неуправляемых факторов, важнейшими из которых являются начальная влажность [15] и базисная плотность древесины. При наличии многих неуправляемых факторов, которые, в свою очередь, влияют на начальную влажность и базисную плотность досок в партии, будем считать, что эти величины не коррелируют между собой. Последнее замечание также подтверждается результатами проведенных нами производственных исследований [16].

Отметим, что поскольку партия пиломатериалов, одновременно загружаемых в сушильную камеру, формируется из древесины, поступившей из ограниченного региона произрастания, то и интервал варьирования базисной плотности несколько сужается по сравнению с действительным ее варьированием по всей территории страны [3; 6]. При этом центр распределения ба-

зисной плотности как случайной величины не будет иметь строго фиксированное положение.

Для проведения аналитических исследований по прогнозированию влажностных показателей качества высушиваемых пиломатериалов из древесины сосны будем полагать, что диапазон варьирования базисной плотности составит 350–450 кг/м³. Наше допущение вполне согласуется с результатами исследований, представленных проф. О.И. Полуобяриновым в работах [3; 6], и наших производственных исследований [4]. Таким образом, при условии нормального закона распределения базисной плотности сосновых пиломатериалов их средняя базисная плотность будет соответствовать 400 кг/м³.

В связи с этим перед выгрузкой пиломатериалов из сушильной камеры их конечная влажность и перепад влажности по сечению досок оказываются окончательно сформированными вследствие влияния независимых друг от друга производственных, технических и технологических факторов. Кроме того, поскольку при моделировании функционирования системы производства сухих пиломатериалов вероятностные элементы необходимо представлять в виде конкретных распределений случайных величин по данным выборки. Согласно закону больших чисел и центральной предельной теореме, при совокупном влиянии на данное свойство многочисленных независимых друг от друга причин можно говорить, что выборочные средние асимптотически нормально распределены.

Для прогнозирования влажностных показателей качества после сушки недостаточно знания статистических характеристик случайных величин. С математической стороны вопрос сводится к установлению приемов, которые дают возможность вычислить погрешность функции, зная погрешности входящих в нее аргументов и вид функциональной зависимости. Исследуемые функции показателей качества сушки от начальной влажности и базисной плотности являются нелинейными, если рассматривать их на всем диапазоне варьирования аргументов. Однако, вследствие сравнительной малости погрешностей, функции на малом интервале можно с достаточной для практических целей точностью считать линейными [15]. При этом отклонение результата должно определяться не только варьированием входных параметров, но и видом зависимости. Если считать, что ошибки измерения распределены по нормальному закону (согласно центральной предельной теореме [2]) и представляют собой некоррелируемые величины, то по теореме о сумме дисперсий [2] имеем:

$$S_w = \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial w_n} \right)_0^2 \cdot S_{w_n}^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial \rho_0} \right)_0^2 \cdot S_{\rho_0}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

$$S_{\Delta w} = \left\{ \left(\frac{\partial(\Delta w)}{\partial w_n} \right)_0^2 \cdot S_{w_n}^2 + \left(\frac{\partial(\Delta w)}{\partial \rho_0} \right)_0^2 \cdot S_{\rho_0}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

где S_w и $S_{\Delta w}$ — средние квадратические отклонения соответственно от средней влажности партии и среднего перепада влажности по толщине при совокупном влиянии основных неуправляемых факторов; $\left(\frac{\partial w}{\partial w_n} \right)_0$,

$\left(\frac{\partial(\Delta W)}{\partial w_k}\right)$ — частные производные соответственно функций $\vec{w} = f(w_n)$ и $\Delta \vec{w} = \chi(w_n)$; $\left(\frac{\partial W}{\partial \rho_{\delta}}\right)$, $\left(\frac{\partial(\Delta W)}{\partial \rho_{\delta}}\right)$ — частные производные соответственно $\vec{w} = \gamma(\rho_{\delta})$ и $\Delta \vec{w} = \varepsilon(\rho_{\delta})\Delta \vec{w} = \varepsilon(\rho_{\delta})$. Знак «0» означает, что в частные производные следует подставлять средние значения величин ρ_{δ} и W_n .

Таким образом, с точностью, равной S_w и $S_{\Delta w}$, действительное значение искомым величин W_k и ΔW можно представить равенствами:

$$w_k \approx \vec{w}_k \pm s_w ; \quad (3)$$

$$\Delta W \approx \Delta \vec{w} \pm S_{\Delta w} . \quad (4)$$

По характеру распределения влажности по сечению материала процесс сушки разделяется на две стадии: нерегулярного режима, когда интенсивно сохнет поверхностный слой, а влажность в центре практически не меняется, и стадию регулярного режима, когда удаление влаги происходит по всему объему материала [1]. Предположим, что в начальный момент времени влажность распределена по толщине досок равномерно. Тогда на стадии нерегулярного режима [7] может быть использовано приближенное решение уравнения влагопроводности (5):

$$w(x, \tau) = w_n - (w_n - w_p) \cdot 1,29 \cdot \sqrt{F'_0} \cdot \exp \left[-\frac{\left(1 - \frac{x}{R}\right)^2}{4 \cdot F'_0} \right] x \left[\frac{1}{1,29 \cdot \sqrt{F'_0 + 1 - \frac{x}{R}}} - \frac{1}{1,29 \cdot \sqrt{F'_0 + 1 - \frac{x}{R} + 2 \cdot B'_i \cdot F'_0}} \right] , \quad (5)$$

где w_n — начальная влажность, %; w_p — равновесная влажность, %; F'_0 — временной критерий подобия Фурье:

$$F'_0 = \frac{a' \cdot \tau}{R^2} . \quad (6)$$

Здесь a' — коэффициент влагопроводности;

$$a' = \eta(\rho_{\delta}) , \quad (7)$$

τ — продолжительность процесса; ρ_{δ} — базисная плотность древесины; B'_i — критерий подобия Био:

$$B'_i = R \cdot \frac{a'}{\alpha} . \quad (8)$$

Здесь a' — коэффициент теплоотдачи; $\frac{x}{R}$ — относительная координата; R — определяющий размер тела (половина толщины пластины), см; x — абсолютная координата, см.

Для влажности на поверхности, то есть при $x/R = 1$, уравнение (5) упрощается и принимает вид (9):

$$W(R, \tau) = \frac{w_n - w_p}{1 + 1,55 \cdot B'_i \cdot \sqrt{F'_0}} + w_p . \quad (9)$$

На стадии регулярного режима могут быть использованы балансовые уравнения с заданным характером распределения влажности по толщине доски [14]. Наиболее часто для этих целей используется параболическое распределение. Решение балансового уравнения при всех принятых допущениях имеет следующий вид (10) – (13):

$$w(x, \tau) = w_u - \left(\frac{x}{R}\right)^2 \cdot [w_n(\tau) - w_n(\tau)] ; \quad (10)$$

$$w_y(\tau) = (w_n - w_p) \cdot \exp \left[-\frac{3 \cdot B'_i \cdot F'_0}{B'_i + 3} \right] + w_p ; \quad (11)$$

$$w_n(\tau) = \frac{w_y(\tau) - w_p}{1 + 0,5 \cdot B'_i} + w_p ; \quad (12)$$

$$\vec{w}(\tau) = \frac{2w_y(\tau) + w_n(\tau)}{3} . \quad (13)$$

В свою очередь, влажность в центре, то есть при $\frac{x}{R} = 0$, составит:

$$w_{ц} = w_n - (w_n - w_p) \cdot 1,29 \cdot \sqrt{F'_0} \cdot \exp \left[-\frac{1}{4 \cdot F'_0} \right] x \left[\frac{1}{1,29 \cdot \sqrt{F'_0 + 1}} - \frac{1}{1,29 \cdot \sqrt{F'_0 + 1 + 2 \cdot B'_i \cdot F'_0}} \right] \quad (14)$$

$$w(x, \tau) = w_u - \left(\frac{x}{R}\right)^2 \cdot [w_n(\tau) - w_n(\tau)] ; \quad (15)$$

$$w_y(\tau) = (w_n - w_p) \cdot \exp \left[-\frac{3 \cdot B'_i \cdot F'_0}{B'_i + 3} \right] + w_p ; \quad (16)$$

$$w_n(\tau) = \frac{w_y(\tau) - w_p}{1 + 0,5 \cdot B'_i} + w_p ; \quad (17)$$

$$\vec{w}(\tau) = \frac{2w_y(\tau) + w_n(\tau)}{3} . \quad (18)$$

Для определения влажности в центре по формуле (16) необходимо вместо начальной влажности w_n подставлять значение влажности в центре w_y , достигнутое к началу очередной стадии. Кроме того, для теоретических исследований потребуется развернутое представление функции $\vec{w}(\tau) = \lambda[w_y(\tau), w_n(t)]$. Оно получится путем подстановки уравнений (16) и (17) в уравнение (18). После преобразований уравнение (18) будет иметь следующий вид:

$$\vec{w}_i(\tau) = (w_{ni} - w_{pi}) \cdot \exp \left[-\frac{3 \cdot B'_i \cdot F'_0}{B'_i + 3} \right] \cdot \frac{3 + B'_i}{3 + 1,5 \cdot B'_i} + w_p ; \quad (19)$$

w_n^{min} , ρ_{δ}^{min} , w_1^{min} , w_2^{min} , w_k^{min} — нижние границы;

w_n^{max} , ρ_{δ}^{max} , w_1^{max} , w_2^{max} , w_k^{max} — верхние границы;

\vec{w}_n , $\vec{\rho}_{\delta}$, \vec{w}_1 , \vec{w}_2 , \vec{w}_k — центр распределения.

Окончательно уравнение перепада влажности по толщине пиломатериалов будет иметь следующий вид (20):

$$\Delta W = \frac{0,5 \cdot B'_i \cdot \left[(w_{ni} - w_{pi}) \cdot \exp \left(-\frac{3 \cdot B'_i \cdot F'_0}{B'_i + 3} \right) + w_{pi} \right] + w_{pi}}{1 + 0,5 \cdot B'_i} . \quad (20)$$

Для подстановки в (1) и (2) необходимо вычислить значения частных производных уравнений влагопроводности по начальной влажности и базисной плотности. Вычисление частных производных выполнено аналитически. Разработан вычислительный алгоритм, который реализован в виде программного кода.

Заключение

Выявлены и проанализированы факторы, влияющие на показатели качества пиломатериалов после сушки.

1. Разработана методика прогнозирования влажностных показателей качества сушки пиломатериалов.

2. Разработаны и исследованы на ЭВМ многофакторные математические модели прогнозирования влажностных показателей качества сушки пиломатериалов ядровых и безъядровых пород на примере сосны и ели.

3. Принципиальными, на наш взгляд, являются расчетные данные составляющих исследуемых функций по начальной влажности и базисной плотности древесины. Сопоставление количественных значений этих величин демонстрирует вклад каждого из физических свойств древесины в отдельности на средние квадратические отклонения конечной влажности и перепада влажности по сечению пиломатериалов.

4. Толщина пиломатериалов влияет на влажностные показатели качества. Для фиксированной категории режима отмечается общая тенденция к уменьшению средних квадратических отклонений конечной влажности и перепада влажности по сечению. В этом случае продолжительность процесса собственно сушки также влияет, но уже косвенно, на влажностные показатели качества пиломатериалов.

5. Увеличение количества ступеней сушки приводит к уменьшению варьирования влажностных показателей качества сушки пиломатериалов.

Литература

1. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1972. 560 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
3. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.
4. Земцовский А.Е. Прогнозирование показателей качества сушки пиломатериалов эксплуатационной влажности: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1989. 217 с.
5. Земцовский А.Е., Акишенков С.И., Корнеев В.И. Теоретическое обоснование показателей качества сушки. Рукоп. деп. в ВНИПИЭИлеспром 10.08.88 № 2314-лб.
6. Полубояринов О.И., Сорокин А.М. Изменчивость плотности древесины сосны и ели в европейской части СССР // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: сб. ст. Л.: ЛТА, 1982. Вып. 11. С. 128-133.
7. Серговский П.С. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процессов сушки и увлажнения древесины: дис. ... д-ра техн. наук. М.: 1953. 659 с.
8. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. М.: Лесная промышленность, 1971. 175 с.
9. Кречетов И.В. Сушка и защита древесины. М., Лесная промышленность, 1987. 328 с.
10. Кречетов И.В. Сушка древесины. М., 1997. 496 с.
11. Соколов В.П., Харитонов Г.Н., Добрынин С.В. Лесо-сушильные камеры. М., 1987. 184 с.

12. Расев А.И. Сушка древесины. М.: МГУЛ, 2009. 336 с.
13. Справочник по сушке древесины: справ. издание / под общ. ред. Е.С. Богданова. М.: Лесная промышленность, 1981. 192 с.
14. Скуратов Н.В. Разработка рациональных режимов сушки пиломатериалов в камерах периодического действия: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЛТИ, 1983. 257 с.
15. Музалевский В.И. Измерение влажности древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 120 с.
16. Земцовский А.Е. Влияние погрешностей приборов контроля и регулирования процесса сушки на влажностные показатели качества пиломатериалов // Научно-технический прогресс в лесной и деревообрабатывающей промышленности: тез. докл. XVII науч.-технической конф., 29 мая – 1 июня 1989 г. Киев, 1989. С. 111.

References

1. Lykov A.V. Heatmass exchange. M.: Energiya, 1972. 560 p.
2. Venttsel' E.S. Theory of Probability. M.: Nauka, 1969. 576 p.
3. Poluboyarinov O.I. The density of the wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1976. 160 p.
4. Zemtsovskii A.E. Forecasting quality indicators for drying lumber of operational humidity: dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1989. 217 p.
5. Zemtsovskii A.E., Akishenkov S.I., Korneev V.I. Theoretical justification of the quality of drying. Rukop. dep. v VNIPIEIllesprom 10.08.88 № 2314-lb.
6. Poluboyarinov O.I., Sorokin A.M. Variability of wood density of pine and spruce in the European part of the USSR // Lesovodstvo, lesnye kul'tury i pochvovedenie: sb. st. L.: LTA, 1982. Vyp.11. P. 128-133.
7. Sergovskii P.S. Research of moisture pro-water content and development methods of calculation of processes of drying and moistening of wood: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M.: 1953. 659 p.
8. Ugolev B.N. Deformability of wood and tension when drying. M.: Lesnaya promyshlennost', 1971. 175 p.
9. Krechetov I.V. Drying and protection of wood. M., Lesnaya promyshlennost', 1987. 328 p.
10. Krechetov I.V. Wood drying. M., 1997. 496 p.
11. Sokolov V.P., Kharitonov G.N., Dobrynin S.V. Wood drying kilns. M., 1987. 184 p.
12. Rasev A.I. Wood drying. M.: MGUL, 2009. 336 p.
13. Reference book on wood drying: sprav. izdanie / pod obshch. red. E.S. Bogdanova. M.: Lesnaya promyshlennost', 1981. 192 p.
14. Skuratov N.V. Development of rational modes of drying lumber in batch action cameras: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: MLTI, 1983. 257 p.
15. Muzalevskii V.I. Moisture measurement of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1976. 120 p.
16. Zemtsovskii A.E. The influence of errors of the devices of control and regulation of the drying process on the moisture indicators of the quality of lumber // Nauchno-tekhnicheskii progress v lesnoi i derevoobratyvyayushchei promyshlennosti: tez. dokl. XVII nauch.-tekhnicheskoi konf., 29 maya - 1 iyunya 1989 g. Kiev, 1989. P. 111.