

## ИМПУЛЬСНАЯ СУШКА СОСНОВОГО БРУСА

А.А. КОСАРИН, доц. каф. процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств МГУЛ, канд. техн. наук,  
Г.Н. КУРЫШОВ, доц. каф. процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств МГУЛ, канд. техн. наук

*kosarin@mgul.ac.ru, kurishov@mgul.ac.ru*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»  
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

*Сделан краткий обзор литературы по сушке хвойного бруса. Описаны особенности импульсной сушки пиломатериалов, при которой камера работает циклами, состоящими из стадии «импульс» и стадии «пауза». На стадии «импульс» происходит интенсивная сушка материала за счет более высокой температуры и более низкой степени насыщенности сушильного агента. На стадии «пауза» циркуляция сушильного агента прекращается, тепло к материалу не подводится. Температура на поверхности сортифта уменьшается, стремясь к температуре предела охлаждения. Появляется положительный градиент температуры, ускоряющий движение влаги к поверхности. Поверхностные слои пиломатериала увлажняются, что, в свою очередь, замедляет развитие сушильных напряжений. Применение импульсной сушки позволяет существенно снизить затраты на электроэнергию за счет отключения циркуляционных вентиляторов на стадии «пауза». При этом продолжительность сушки сравнима с продолжительностью сушки по стандартным режимам. В статье приведен расчет технологических параметров импульсной сушки, в соответствии с которым продолжительность стадии «импульс» составила примерно 2 часа, а стадии «пауза» – приблизительно 4 часа. В учебно-опытной сушильной камере кафедры процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств МГУ леса были проведены две сушки соснового бруса сечением 100×100 мм и 5 сушек бруса 100×150 мм. В сводной таблице указаны следующие результаты: начальная и конечная влажность древесины, диапазон температуры в начале и конце сушки. Также указывается наличие и величина трещин и остаточных деформаций. Приводится общая продолжительность процесса сушки.*

*Ключевые слова:* сосновый брус, импульсная сушка, сушка соснового бруса.

В опубликованной ранее технической литературе [1–3] приведены данные об использовании конвективных камер для сушки крупномерных пиломатериалов. При этом используются специальные режимы сушки, которые должны обеспечивать необходимое качество высушиваемого материала. Сушильные камеры весь цикл сушки работают непрерывно, а технологические параметры агента сушки (температура и степень насыщенности) устанавливаются в зависимости от толщины сортифта и его влажности.

В отечественных режимах предусмотрена сушка хвойных пиломатериалов от 75 до 100 мм. Диапазон температур для 3-ступенчатого нормального режима составляет от 55 до 75 °С, степень насыщенности сушильного агента меняется в диапазоне от 90 % до 34 % [1].

Лабораторией лесоматериалов г. Мэдисон, США для лесоматериалов толщиной более 75 мм разработан 7-ступенчатый режим с диапазоном температур от 41 °С, до 57 °С [2].

Режимы, приведенные Н.С. Селюгиным [3], для сосны толщиной 90–120 мм состоят из 7 ступеней в которых температура

меняется от 40 °С до 57 °С, а степень насыщенности – от 85 % до 40 %.

В 1993–1994 гг. на кафедре сушки и защиты древесины МГУЛ были разработаны и запатентованы импульсные режимы сушки (патент России № 2027217) [4]. С 1994 г. по 2015 г. были выполнены промышленные сушки пиломатериалов из древесины дуба, клена, ясеня, груши, бука, ореха, махагони, мербау, ироко, эбенового дерева [5–7].

В 2014 г. начаты экспериментальные сушки бруса толщиной 100 мм из древесины сосны [13].

### Особенности импульсной сушки

Импульсная сушка неоднократно рассматривалась в предыдущих публикациях [5–8] и подробно описана в работе [8]. Кратко напомним суть импульсной сушки.

Загруженный в сушильную камеру материал нагревается (начальная обработка). После прогрева последовательно проводятся циклы «импульс–пауза». На стадии «импульс» циркуляционные вентиляторы работают, теплоноситель подается в калориферы с целью поддержания заданной температуры, приточно-вытяжные

каналы приоткрыты или открыты полностью (определяется конструктивными особенностями конкретной камеры). Степень насыщенности сушильного агента на стадии «импульс» не регулируется. Стадия «импульс» характеризуется интенсивным процессом испарения влаги с поверхности материала, поскольку равновесная влажность  $W_p$  существенно ниже  $W_{п.н}$ . Поверхностная влажность  $W_{пов}$  снижается и к концу стадии может достигать  $W_p$ . Происходит некоторое снижение влажности в центральных зонах  $W_{ц}$  и соответственно средней влажности. Температура сортифта на поверхности  $t_{пов}$  и в центре  $t_{ц}$  возрастает и стремится к концу стадии к  $t_c$ . Следует также обратить внимание на увеличение перепада влажности в гигроскопической зоне  $\Delta W = W_{пн} - W_{пов}$  и, следовательно, градиента влажности. Движущей силой процесса на стадии «импульс» является влагопроводность. Термовлагопроводность оказывает тормозящее действие на интенсивность потока. На стадии «пауза» циркуляционные вентиляторы отключаются, подача теплоносителя в теплообменники сушильной камеры прекращается. Приточно-вытяжные каналы остаются приоткрытыми. Вследствие продолжающегося процесса испарения и потерь тепла через ограждения камеры температура среды  $t_c$  постепенно понижается. Одновременно растет разность температуры между поверхностью и центром сортифта. Температура на поверхности сортифта уменьшается, стремясь к температуре предела охлаждения. Температура же центральных слоев снижается значительно медленнее. Между поверхностью и центром возникает перепад температуры  $\Delta t = t_{пов} - t_{ц}$ , величина которого возрастает по мере снижения влажности материала в ходе сушки. Появляется, таким образом, положительный градиент температуры, под действием которого возрастает интенсивность потока влаги к поверхности. Интенсивность же движения влаги под действием градиента влажности снижается и к моменту окончания этой стадии достигает минимума. Поскольку термоградиентный коэффициент  $\delta$  в диапазоне влажности 20–60 % значительно превышает коэффициент влагопроводности (в 2–4 раза [12,]), то следует ожидать интенсивного движения влаги в период паузы, которое не только компенсирует снижение ин-

тенсивности движения за счет градиента влажности, но и может его превысить.

Таким образом, параметрами сушки на стадии «импульс» являются температура сушильного агента и продолжительность этой стадии. Параметром сушки на стадии «пауза» является лишь ее продолжительность.

Для экспериментальных сушек бруса было решено установить уровень температуры на стадии «импульс» в примерном соответствии с температурой, позволяющей сохранить природные свойства древесины и не позволить развиваться грибным поражениям.

### Определение продолжительности стадии «импульс»

Степень насыщенности сушильного агента на стадии «импульс» может быть существенно ниже уровня стандартных режимов. Непрерывная сушка в такой среде с пониженной степенью насыщенности приведет к тому, что развивающиеся напряжения достигнут предела прочности и произойдет образование трещин. Следовательно, продолжительность стадии «импульс» должна быть такой, при которой напряжения не достигали бы предела прочности. Для определения продолжительности стадии «импульс» воспользуемся формулой [8]

$$\tau_{им} = \frac{x_c^2}{6,76 \cdot a'} \left( \frac{2W_n + W_{п.н} - 3W_n}{3(W_{п.н} - W_n)} \right)^2, \quad (1)$$

где  $a'$  – коэффициент влагопроводности, см<sup>2</sup>/с;

$x_c$  – критическая глубина гигроскопической зоны, см;

$W_n, W_{п.н}, W_n$  – влажность древесины начальная, предела насыщения и поверхности соответственно, %.

Для учета внутренних напряжений использовался метод, разработанный проф. Уголевым Б.Н. [10], согласно которому доска в поперечном сечении рассматривается как многостержневая модель. Напряжения в процессе сушки в каждом ( $i$ -том) стержне характеризуются уравнением [11]

$$\sigma_i = E_i(k_y \Delta W_i - \gamma_i), \quad (2)$$

где  $E_i$  – показатель жесткости данного стержня, МПа;

$k_y$  – коэффициент усушки;

Результаты проведенных экспериментальных сушек  
The results of experimental dryers

| № сушки                                     | C1      | C2    | C3                       | C4                   | C5                   | C6                   | C7                          |
|---------------------------------------------|---------|-------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| № режима                                    | 1       |       | 2                        |                      |                      |                      | 3                           |
| Сечение бруса, мм                           | 100×100 |       | 100×150                  |                      |                      |                      |                             |
| Продолжительность сушки, ч                  | 216     | 312   | 120                      | 144                  | 192                  | 336                  | 264                         |
| Наличие трещин, мм                          | 0       | 0     | длина 13–70, глубина 2–3 | по иницирующему пазу | по иницирующему пазу | по иницирующему пазу | длина до 400, глубина до 30 |
| Остаточные деформации, %                    | 1,3     | 0,63  | 0,71                     | 1,43                 | 0,81                 | 1,92                 | 1,79                        |
| Влажность начальная, %                      | 41,1    | 53,7  | 56,6                     | 58,8                 | 63,5                 | 68,9                 | 63,0                        |
| Влажность конечная, %                       | 12,7    | 5,5   | 17,3                     | 8,0                  | 9,1                  | 11,4                 | 17,0                        |
| Диапазон температур на стадии «импульс», °C | 55–65   | 55–80 | 55–72                    | 58–74                | 58–80                | 58–80                | 58–80                       |

$\Delta W_i$  – перепад гигроскопической влажности, равный для данного стержня  $W_{i,max} - W_i$  (при  $W_{i,max} \leq W_{п.н.}$ );

$\gamma_i$  – уравнивающая деформация, т.е. такая деформация, которую должны приобрести (и приобретают) стержни для уравнивания напряжений по объему доски.

Показатель жесткости древесины  $E_p$ , МПа, при растяжении поперек волокон (тангенциальное направление), определялся в зависимости от температуры и влажности с использованием результатов анализа этого показателя, проведенного проф. Скуратовым Н.В. [9].

Расчет продолжительности стадии «импульс» был произведен по следующим входным данным: температура среды  $t_c - 53^\circ\text{C}$ , температура мокрого термометра  $t_m - 40^\circ\text{C}$ , начальная влажность  $W_n - 70\%$ , скорость циркуляции  $\omega - 1,5$  м/с, базисная плотность  $\rho_0 - 400$  кг/м<sup>3</sup>, степень насыщенности  $\phi - 0,55$ , толщина пиломатериала – 100 мм

$$\tau = \frac{0,25^2 \cdot 10^6}{6,76 \cdot 6,948} \left( \frac{2 \cdot 70 + 30 - 3 \cdot 9,68}{3(30 - 9,68)} \right) = 7116 \text{ сек} = 1,97 \text{ ч}$$

#### Определение продолжительности стадии «пауза»

Параметром режима на стадии «пауза», как отмечалось выше, является продолжительность этой стадии. Расчет этого параметра ведем следующим образом:

– определяем поверхностную влажность материала в момент окончания паузы;  
– рассчитываем продолжительность  $\tau_{па}$ , требуемую для достижения полученной поверхностной влажности.

Величина поверхностной влажности  $u_n (W_n)$  определяется по уравнению при глубине гигроскопической зоны  $x_r$  достигнутой в период стадии «импульс»

$$W_n = \frac{W_{n,n} + \frac{\alpha'}{a'_{эк}} W_p \cdot x_c}{\frac{\alpha'}{a'_{эк}} x_c + 1}, \quad (3)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент влагоотдачи;

$a'_{экв}$  – эквивалентный коэффициент влагопроводности, учитывающий влияние коэффициента термовлагопроводности на перенос влаги;

$W_p, W_{пн}$  – равновесная влажность и влажность предела насыщения.

Для расчета продолжительности стадии «пауза» воспользуемся решением уравнения влагопроводности для поверхности пластины при граничных условиях III рода [8], в результате которого получаем уравнение

$$\tau = \frac{S^2}{4\mu^2 a'_{эк}} \times \ln \frac{W_n - W_p}{W_n - W_n} \times \frac{2 \sin \mu \cos \mu}{\mu + \sin \mu \cos \mu}, \quad (4)$$

где  $S$  – толщина сортимента, см;

$W_n, W_p, W_n$  – влажность древесины начальная, равновесная и поверхности соответственно;

$a'_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент влагопроводности, см<sup>2</sup>/с;

$\mu$  – корни характеристического уравнения для первого члена ряда,  $\mu_1 = f(Bi')$ , определяется по уравнению (при  $Bi \leq 20$ )  
 $\mu = 0,99Bi^{0,14}$  (5)

Продолжительность стадии «пауза» рассчитанная по уравнению (4) составит

$$\tau = \frac{10^2}{4 \cdot 0,74^2 \cdot 12,7} \ln \frac{70-20,4}{70-25,5} \times \frac{2 \sin 0,74 \cos 0,74}{0,74 + \sin 0,74 \cos 0,74} = 13935 \text{ с} = 3,87 \text{ ч.}$$

По проведенным расчетам в лаборатории кафедры процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств МГУЛ провели ряд экспериментальных сушек вышеуказанных сортиментов. Две сушки были проведены с брусом сечением 100×100 мм, и пять сушек с брусом 100×150 мм.

Качество сушек оценивалось по наличию трещин и величине остаточных деформаций. Результаты проведенных экспериментальных сушек сведены в таблицу. Номер режима 1 соответствует режиму с продолжительностью стадии «импульс» – 2 ч, стадии «пауза» – 4 часа. Номер режима 2 соответствует режиму с продолжительностью стадии «импульс» – 2 ч, стадии «пауза» – 3 часа. Номер режима 3 соответствует режиму с продолжительностью стадии «импульс» – 2 ч, стадии «пауза» – 2 часа.

Предложенная методика расчета стадий «импульс» и «пауза» позволила определить продолжительность этих стадий. Это было использовано при проведении экспери-

ментальных сушек и привело к уменьшению количества трещин и снижению величины остаточных деформаций в крупномерных пиломатериалах.

### Библиографический список

1. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 2000. – 125 с.
2. Корнилов, В. Специальные режимы сушки / В. Корнилов // Дерево.Ru. – № 4, 2006. – 66–70 с.
3. Селюгин, Н.С. Сушка древесины / Н.С. Селюгин // Голестехиздат, 1940. – 548 с.
4. Пат. № 2027127 Российской Федерация. Способ сушки пиломатериалов / Расев А.И., Курышов Г.Н., Ляшенко С.В. / Оpubл. 20.01.1995.
5. Расев, А.И. Опыт камерной сушки дубовых пиломатериалов без использования водяного пара / А.И. Расев, Г.Н. Курышов // Деревообрабатывающая пром-ть № 1, 1997 – 10–11 с.
6. Косарин, А.А. Особенности сушки древесины эбенного дерева / А.А. Косарин // сб. науч. тр. МГУЛ. – Вып. 326.– 2005. – С. 20–25.
7. Косарин, А.А. Импульсная сушка заготовок из древесины махагоны и мербау / А.А. Косарин, Г.Н. Курышов // сб. науч. тр. МГУЛ. – Вып. 349.– 2010. – С. 46–49.
8. Косарин, А.А. Технология импульсной сушки пиломатериалов: дисс. ... канд. тех. наук / А.А. Косарин. – М.: МГУЛ, 2012. – 164 с.
9. Скуратов, Н.В. Разработка рациональных режимов сушки пиломатериалов камерах периодического действия: дисс. ...канд. тех. наук / Н.В. Скуратов. – М.: МЛТИ, 1983. – 257 с.
10. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: учебник для вузов, 5-е изд / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2007. – 340 с.
11. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов // Лесная пром-сть, 1977. – 206с.
12. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин // Лесная пром-сть, 1990. – 336 с.
13. Петяйкина, Е.Г. Импульсная сушка бруса хвойных пород древесины / Е.Г. Петяйкина, Г.Н. Курышов, А.А. Косарин // сб. науч. тр. МГУЛ. – Вып. 370.– 2014. – С. 61– 66.

### IMPULSE DRYING PINE TIMBER

Kosarin A.A., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D (Tech.); Kuryshev G.N., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D (Tech.)

kosarin@mgul.ac.ru, kurishov@mgul.ac.ru

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

*A brief review of the literature on softwood lumber drying and a description of the features of impulse drying lumber, in which the camera works in cycles, comprising the steps of «impulse» and the stage of «pause», is given. The «impulse» stage comprises an intensive material drying due to the higher temperature and a lower degree of saturation of the drying agent. At the «pause» stage the circulation of the drying agent is stopped, the material is not heated. The temperature at the surface of the assortment is reduced, seeking to the temperature of the cooling limit. There is a positive temperature gradient, accelerating the movement of the moisture to the surface. Surface layers of lumber moisten, which slows the development of tension. Impulse drying can significantly reduce energy costs by shutting down the ventilation fans at the stage of «pause». The duration of such drying is comparable to the duration of drying according to the standard regims. The article shows the calculation of the impulse drying parameters in accordance to which the duration of the «impulse» stage was about 2 hours and the stage of «pause» – about 4 hours. In the scientific-experimental drying chamber of the «Processes and Devices of Woodworking Industries» Department MSFU two pine lumber blocks of 100×100 mm and 5 timber blocks of 100×150 mm dryings were conducted. The summary table shows the following results: the initial and the final moisture content, temperature range at the beginning and the end of the drying process. It also indicates the presence and size of cracks and permanent deformations. The total duration of the drying process is provided.*

*Keywords: pine timber, impulse drying, pine timber.*

# References

1. *Rukovodnyashchie tekhnicheskie materialy po tekhnologii kamernoy sushki drevesiny* [Guiding technical materials technology wood drying chamber]. Arkhangel'sk: TSNIIMOD, 2000. 125 p.
2. Kornilov V. *Spetsial'nye rezhimy sushki* [Special conditions of drying] Derevo.Ru № 4, 2006. pp 66–70.
3. Selyugin N.S. *Sushka drevesiny* [Wood drying] Goslestehtizdat, 1940. 548 p.
4. Rasev A.I., Kuryshov G.N., Lyashenko S.V., Pat. № 2027127 Rossiyskaya Federatsiya. *Sposob sushki pilomaterialov* [The method of drying lumber] Opubl. 20.01.1995.
5. Rasev A.I., Kuryshov G.N. *Opyt kamernoy sushki dubovykh pilomaterialov bez ispol'zovaniya vodyanogo para* [Experience oak lumber drying chamber without the use of steam] Wood processing industry. № 1, 1997 pp. 10–11.
6. Kosarin A.A. *Osobennosti sushki drevesiny ebenovogo dereva* [Features wood drying ebony] Scientific work MSFU. Vol. 326. 2005. pp. 20–25
7. Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny makhagoni i merbau* [Impulse drying of wood mahogany and merbau] Scientific work MSFU. Vol. 349. 2010. pp. 46–49.
8. Kosarin A.A., *Tekhnologiya impul'snoy sushki pilomaterialov* [Technology impulse drying lumber]. Diss. kand. tekhn. nauk MSFU, [Diss. Ph.D(Tech)] Moscow: MSFU, 2012. 164 p.
9. Skuratov N.V. *Razrabotka ratsional'nykh rezhimov sushki pilomaterialov kamerakh periodicheskogo deystviya* [Development of rational modes of lumber drying chambers batch] diss. kand. tekhn. nauk [Diss. Ph.D(Tech)]. Moscow: MLTI, 1983. 257 p.
10. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya: uchebnik dlya vuzov* [Wood from the forest-based merchandising: a textbook for high schools] Moscow: MSFU, 2007. 340 p.
11. Ugolev B.N., Lapshin Yu.G., Krotov E.V. *Kontrol' napryazheniy pri sushke drevesiny* [Voltage control when drying] Forest industry. 1977. 206 p.
12. Shubin G.S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Forest industry. 1990. 336 p.
13. Petyaykina E.G., Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka brusa khvoynykh porod drevesiny* [Impulse drying softwood lumber]. Scientific work MSFU. Vol. 370. 2014. pp. 61–66.

## СТРУКТУРА ХВОЙНОЙ БЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Л.А. АЛЕШИНА, доц. каф. физики твердого тела ПетрГУ, канд. физ.-мат. наук,  
А.А. МИХАЙЛИНА, магистрант каф. физики твердого тела ПетрГУ,  
Л.А. ЛУГОВСКАЯ, доц. каф. физики твердого тела ПетрГУ, канд. физ.-мат. наук

liubov\_l@mail.ru

Петрозаводский государственный университет, кафедра физики твердого тела  
Россия, 185014, г. Петрозаводск, пр. Ленина 33.

Исследуются структурные особенности исходной сульфатной хвойной беленой целлюлозы, микрокристаллической целлюлозы, полученной гидролизом исходного образца, мерсеризованной исходной целлюлозы и мерсеризованной целлюлозы, модифицированной бромистым этилом в среде бензола методами рентгенографического анализа и компьютерного моделирования. Для исходной, микрокристаллической и мерсеризованной целлюлозы рассчитаны и проанализированы характеристики надмолекулярной структуры: размеры кристаллитов (областей когерентного рассеяния) и степень кристалличности. Применение метода полнопрофильного анализа рентгенограмм поликристаллов к анализу рентгенограмм целлюлоз позволило определить характеристики атомной структуры: тип элементарной ячейки и характер взаимного расположения в ней целлюлозных остатков, уточнить значения периодов элементарной ячейки и угла моноклинности указанных объектов. В результате обработки хвойной сульфатной беленой мерсеризованной целлюлозы бромистым этилом в среде бензола образуется этилцеллюлоза. Рентгенографический эксперимент показал, что полученная таким способом этилцеллюлоза аморфна. Анализ структурного состояния этилцеллюлозы был выполнен методом Финбака-Уоррена: из рентгеновской дифракционной картины были рассчитаны кривые распределения парных функций, характеризующие распределение электронной плотности материала, из которых методом сингулярного разложения рассчитывались характеристики ближнего упорядочения (радиусы и размытия координационных сфер и координационные числа). Для установления пространственной конфигурации атомов в области ближнего упорядочения в программе HyperChem8 была построена модель молекулы этилцеллюлозы с содержанием этоксильных групп  $C_2H_5$ , равным 14,5 %. С результатами рентгенографического эксперимента сравнивались рассчитанные для модели кривые распределения интерференционной функции, функции радиального распределения атомов, значения радиусов координационных сфер и координационные числа. Наилучшее согласие достигнуто для цепочки этилцеллюлозы, содержащей 70 глюкозных остатков.

Ключевые слова: целлюлоза сульфатная, этилцеллюлоза, рентгеноструктурный анализ, полнопрофильный анализ, метод Финбака-Уоррена, ближний порядок, моделирование, атомно-молекулярные конфигурации.

Целлюлоза является природной полимерной основой широкого спектра производимых и используемых в настоящее время материалов народнохозяйственного значения. Высокая практическая ценность

целлюлозы и ее производных определяет необходимость исследования структурных особенностей макромолекул в процессе их химической и физической модификации. На данный момент основной задачей научных