



## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

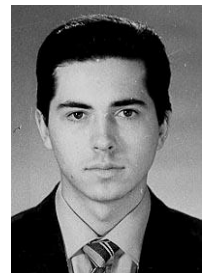
УДК 674.047

***В.С. Петровский, А.О. Сафонов***

Петровский Владислав Сергеевич родился в 1933 г., окончил в 1956 г. Сибирский технологический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Воронежской государственной лесотехнической академии, заслуженный деятель науки и техники РФ, академик РАЕН. Имеет более 350 печатных работ в области математического моделирования, оптимизации, компьютеризации, автоматизации технологий и оборудования лесного комплекса.



Сафонов Андрей Олегович родился в 1971 г., окончил в 1993 г. Воронежскую государственную лесотехническую академию, кандидат технических наук, докторант кафедры автоматизации производственных процессов ВГЛТА. Имеет более 40 печатных работ в области математического моделирования и оптимизации конвективных процессов сушки дисперсных материалов.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ В ПРЯМОТОЧНЫХ БАРАБАННЫХ СУШИЛКАХ

Получены математические зависимости, характеризующие изменение влажности древесных частиц в процессе их сушки в барабанных сушилках при производстве древесностружечных плит. Установлено, что учет сезонности работы оборудования при моделировании технологии значительно повышает эффективность сушки.

сушка, древесная частица, прямоточная барабанная сушилка, влажность, обезвоживание, скорость удаления влаги.

Сушка древесных частиц является одной из основных технологических операций в производстве древесностружечных плит. При их изготовлении конечная влажность измельченной древесины перед смешиванием со связующим находится в пределах 2 ... 4 %, что регламентируется требованиями ГОСТ 10632–89 к показателям физико-механических свойств плит. Технология сушки древесных частиц характеризуется значительными расходами энергоносителей. Имеющиеся системы и методы управления приме-

няемым оборудованием в ряде случаев не обеспечивают заданную конечную влажность высушиваемого материала. Колебания температуры отработавшего сушильного агента на выходе из агрегата приводят к возгоранию сухих древесных частиц. При этом недостаточно высокая производительность сушилок делает эту операцию «узким местом» в производстве древесностружечных плит.

Обезвоживание древесной стружки, как правило, осуществляют в сушильных барабанах. В России получили широкое распространение вращающиеся барабанные сушилки типа «Прогресс» с прямоточным движением сушильного агента и высушиваемого материала. Технология сушки древесных частиц достаточно сложная, характеризуется множеством факторов. Измерять влажность обрабатываемого материала в непрерывно вращающемся барабанном агрегате невозможно. Имеющаяся в настоящее время контрольно-измерительная аппаратура, использующая косвенные методы определения влажности древесных частиц в потоке, не отвечает требованиям точности и надежности. Также возникают технические трудности дистанционного измерения влажности древесных частиц внутри вращающейся сушилки. Поэтому необходимость создания математического аппарата, позволяющего достоверно определять влажность древесных частиц в любой момент процесса сушки, очевидна. Знание закономерностей удаления влаги из высушиваемой стружки представляется актуальным для эффективного, качественного, энергосберегающего и безопасного управления технологическими процессами.

Так как влажность частиц в процессе сушки изменяется в течение года, для получения адекватной реальному процессу зависимости были проведены эксперименты с учетом сезонности работы сушильного оборудования. Для этого были выделены следующие сезоны: зимний, весенне-осенний, летний. По результатам наблюдений за процессом сушки древесных частиц колебания начальной влажности высушиваемого материала в зимний сезон составили  $W_n = 80 \dots 100 \%$ , в весенне-осенний –  $60 \dots 90 \%$ , в летний –  $50 \dots 70 \%$ . Интервалы изменения начальной влажности стружки обусловлены температурными и влажностными параметрами атмосферного воздуха, характерными для того или иного времени года.

Для использования математических уравнений при моделировании процесс обезвоживания древесных частиц был разделен на два периода: постоянной и падающей скорости сушки. Период постоянной скорости сушки характеризуется удалением из высушиваемого материала свободной влаги, находящейся в полостях клеток и межклеточных пространствах. В период падающей скорости сушки происходит удаление связанной влаги из клеточных стенок [5]. Период удаления свободной влаги в древесине заканчивается при изменении влажности от начального значения до критического  $W_{кр}$ . Этот показатель был определен в зависимости от породного состава и массовой доли сырья, используемого при изготовлении древесностружечных плит, температурного режима внутри барабанного агрегата на основе проведенных опытов по выявлению закономерностей удаления влаги из дре-

весных частиц и анализа исследований [3, 5 – 7]. Установленный уровень  $W_{кр} = 30\%$  с достаточной для технологии сушки в агрегатах барабанного типа точностью можно принять при моделировании процесса изменения влажности древесных частиц. Это подтверждается результатами проведенных экспериментов. Период постоянной скорости сушки от  $W_n$  до  $W_{кр}$  можно описать следующим уравнением:

$$\frac{dW_1}{d\tau} = -k, \quad (1)$$

где  $\tau$  – продолжительность сушки, мин;

$k$  – эмпирический коэффициент, характеризующий скорость уменьшения влагосодержания стружки для зимнего ( $k = -2,22 - 0,0479 W_n$ ), весенне-осеннего ( $k = -1,56 - 0,0570 W_n$ ) и летнего ( $k = -0,15 - 0,0837 W_n$ ) сезонов.

Изменение влажности в единицу времени для периода падающей скорости сушки выражают следующими уравнениями:

$$\frac{dW_2}{d\tau} = \frac{Z_j + Y_j}{T} e^{\frac{\tau}{T}}; \quad (2)$$

$$Y_j = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_6 X_6 + a_7 W_n + a_8 F_2 + a_9 F_3 + a_{10} F_4 + \\ + a_{11} X_1^2 + a_{12} X_2^2 + a_{13} X_3^2 + a_{14} X_4^2 + a_{15} X_5^2 + a_{16} X_6^2 + a_{17} X_1 X_2 + a_{18} X_1 X_3 + \\ + a_{19} X_1 X_4 + a_{20} X_1 X_5 + a_{21} X_1 X_6 + a_{22} X_2 X_3 + a_{23} X_2 X_4 + a_{24} X_2 X_5 + a_{25} X_2 X_6 + \\ + a_{26} X_3 X_4 + a_{27} X_3 X_5 + a_{28} X_3 X_6 + a_{29} X_4 X_5 + a_{30} X_4 X_6 + a_{31} X_5 X_6 + \\ + a_{32} W_n^2 + a_{33} F_2^2 + a_{34} F_3^2 + a_{35} F_4^2, \quad (3)$$

где  $Z_j$  – эмпирический коэффициент перехода от установившегося режима к режиму с изменением влажности стружки во времени;

$Y_j$  – конечная влажность древесных частиц, %;

$T$  – постоянная времени, мин;

$a_0 \dots a_{35}$  – эмпирические коэффициенты регрессии;

$X_1$  – температура сушильного агента на входе в барабан, °С;

$X_2$  – температура топочного газа, °С;

$X_3$  – количество подаваемой в барабан сырой стружки, кг/ч;

$X_4$  – расход природного газа для нагрева сушильного агента до заданной температуры, м<sup>3</sup>/ч;

$X_5$  – расход воздуха на горение природного газа, отн. ед.;

$X_6$  – расход воздуха на смешивание с топочным газом, отн. ед.;

$F_2$  – влажность воздуха в сушильном цехе, отн. ед.;

$F_3$  – температура воздуха в сушильном цехе, °С;

$F_4$  – температура атмосферного воздуха, °С.

В таблице представлены коэффициенты регрессии для уравнения (3) по сезонам. Исследования проводили на сушильном барабане длиной 10,0 м и диаметром 2,2 м. Количество газов, циркулирующее через установку, было равно 26 200 кг/ч. Подсосы холодного воздуха в сушилку через течку сырой стружки и фланцевое уплотнение на входе в агрегат составляли 2000 кг/ч.

**Коэффициенты регрессии для определения конечной влажности  
древесных частиц**

Коэффициенты регрессии	Значения коэффициентов для сезонов		
	зимнего	весеннее-осеннего	летнего
$a_0$	259,0739850	407,6174000	-90,3140099
$a_1$	-0,5496779	-0,8987907	0,1002105
$a_2$	-0,0672047	0	0,0589867
$a_3$	0,0165967	-0,0113401	0,0287276
$a_4$	0	-1,6474752	-0,2773579
$a_5$	-40,3246498	79,4284028	29,5994300
$a_6$	249,9056396	85,8111269	13,8594636
$a_7$	-4,0225834	0,1143256	0,3492385
$a_8$	0	0	37,9275054
$a_9$	-0,8109421	0	0
$a_{10}$	-0,0091065	-0,0552437	-0,0358359
$a_{11}$	-0,0002123	0,0008706	0,0001535
$a_{12}$	0,0003455	0	0,0000677
$a_{13}$	0,0000136	0,0000006	0,0000014
$a_{14}$	0	0,0026402	0
$a_{15}$	0	-13,3508350	-4,8901238
$a_{16}$	-19,0909671	-32,9417530	11,9422636
$a_{17}$	0	0,0000571	-0,0002410
$a_{18}$	0,0000959	-0,0000238	-0,0000526
$a_{19}$	0,0028551	0,0001502	0,0002559
$a_{20}$	-0,0618675	-0,0413657	-0,0309876
$a_{21}$	-0,1788167	-0,0203917	0,0860672
$a_{22}$	-0,0001129	0,0000010	-0,0000133
$a_{23}$	-0,0005649	-0,0001550	0,0001808
$a_{24}$	0,0478025	0	-0,0177674
$a_{25}$	-0,2788828	0,0131896	-0,0863890
$a_{26}$	-0,0003601	0,0001202	0,0000041
$a_{27}$	0,0121117	-0,0083883	0
$a_{28}$	0,0879416	-0,0088542	0
$a_{29}$	0	0	0
$a_{30}$	-0,229548	0	0
$a_{31}$	0	-21,678902	6,9610328
$a_{32}$	0,0225236	-0,0003335	-0,0025452
$a_{33}$	2,8283662	-17,377109	0
$a_{34}$	0,0204190	-0,0021842	0,0022502
$a_{35}$	0	0	0

Уравнение (3), несмотря на большое количество технологических параметров, дает возможность достаточно точно определять численные значения текущей влажности стружки, о чем свидетельствуют проведенные исследования [4]. Ошибка в серии экспериментов не превышала допустимого в деревообработке значения 5 % [2]. Современный уровень вычислительной техники позволяет достаточно быстро получать численные значения влажности стружки по уравнению (3), поэтому его упрощение представляется нецелесообразным по причине снижения точности  $Y_j$ .

Численные значения режимных управляющих параметров  $X_1 - X_6$ , обеспечивающих требуемую конечную влажность высушиваемого материала, минимальные расходы электроэнергии и природного газа, максимальную производительность оборудования, заданную температуру отработанного агента сушки, были определены в ходе многокритериальной оптимизации процесса по результатам экспериментальных исследований на действующей промышленной установке [1].

Зависимость изменения влажности древесных частиц с течением времени в зимний сезон представлена на рис. 1.

Как отмечено ранее, весенне-осенний сезон отличается значительными (от 60 до 90 %) колебаниями начальной влажности высушиваемого материала, что обусловлено не только свойствами исходного сырья, из которого получена измельченная древесина, но и климатическими условиями, характерными для этого сезона. Результаты определения закономерностей удаления влаги из древесных частиц для этого сезона приведены на рис. 2.

Летний сезон характеризуется достаточно низкой начальной влажностью высушиваемого материала и сравнительно высокой температурой окружающего барабан воздуха. На рис. 3 представлены кривые скорости сушки древесных частиц в это время года.

Кривые, отражающие изменение скорости сушки древесных частиц в различные сезоны, позволяют вычислять с достаточной для технологии точностью среднюю влажность высушиваемого материала в любой момент времени и обеспечивают необходимую конечную влажность путем определения и реализации требуемых значений управляющих воздействий. Оптимальный выбор режимных параметров  $X_1 - X_6$  минимизирует расходы природного газа для нагрева теплоносителя и электрической энергии для вращения барабана, подачи сырой стружки, работы вентиляторов.

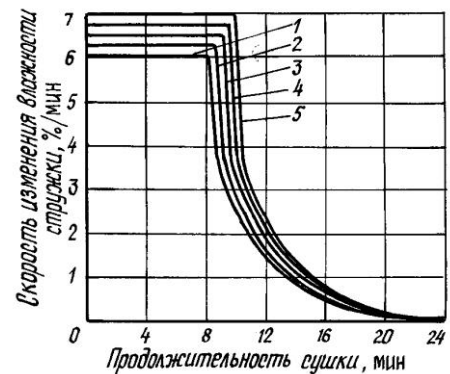


Рис. 1. Изменение влажности  $W$  древесных частиц в процессе сушки (зимний сезон): 1 –  $W = 80$  %; 2 – 85; 3 – 90; 4 – 95; 5 – 100 %

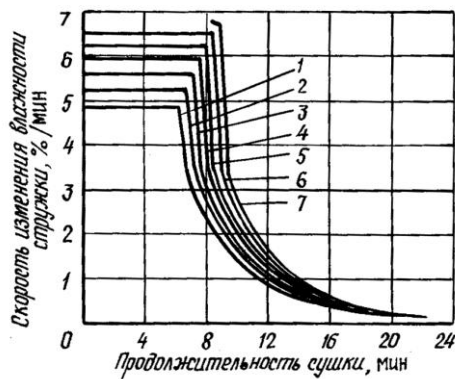


Рис. 2. Изменение влажности древесных частиц в процессе сушки (весенне-осенний сезон): 1 –  $W = 60\%$ ; 2 – 65; 3 – 70; 4 – 75; 5 – 80; 6 – 85; 7 – 90 %

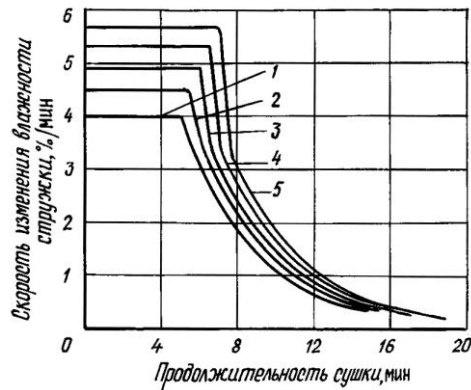


Рис. 3. Изменение влажности древесных частиц в процессе сушки (летний сезон): 1 –  $W = 50\%$ ; 2 – 55; 3 – 60; 4 – 65; 5 – 70 %

Наиболее актуально это для зимних условий работы барабана, характеризующихся чрезмерными расходами энергоносителей. Кроме того, исключается вероятность возгорания высушиваемого материала для летних условий проведения процесса сушки. Определение закономерностей сушки в агрегатах барабанного типа для различных интервалов начальной влажности древесных частиц решает проблему колебания их конечной влажности, которое чаще всего имеет место в весенне-осенний сезон.

Таким образом, результаты научно-практических исследований процесса сушки древесных частиц в прямооточных барабанах позволяют с достаточным уровнем адекватности реальной технологии осуществлять контроль и управление текущей влажностью измельченной древесины при исключении опасности ее возгорания и обеспечения заданного качества выпускаемых древесностружечных плит за счет определения и установки требуемых значений режимных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петровский В.С., Сафонов А.О. Статика процесса сушки древесных частиц в барабанных сушилках. – Воронеж: ВГЛТА, 2000. – 114 с.
2. Пижурин А.А., Розенбит М.С. Исследование процессов деревообработки. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 232 с.
3. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
4. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. – М.: Лесн. пром-сть, 1977. – 384 с.
5. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. – М.: МГУЛ, 2001. – 368 с.
6. Чудинов Б.С. Вода в древесине. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.

---

7. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 248 с.

Воронежская государственная  
лесотехническая академия

Поступила 13.06.02

*V.S. Petrovsky, A.O. Safonov*

**Regularities Study of Water Elimination from Wood Particles in  
Streamline Rotary Driers**

Mathematical dependencies have been derived characterizing moisture content of wood particles in the process of drying in rotary driers when producing chipboards. It has been found out that taking into account the seasonal character of equipment operation when simulating technology increases the drying efficiency considerably.

