

На правах рукописи



Удачина Ольга Александровна

Технология сушки пиломатериалов без начального  
увлажнения обрабатываемой среды  
для камер малой мощности

Специальность 05.21.05 - Древоиспользование, технология и  
оборудование деревообработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2007

Диссертационная работа выполнена на кафедре древесиноведения и специальной обработки древесины ГОУ ВПО "Уральский государственный лесотехнический университет"

Научный руководитель -

доктор технических наук,  
профессор  
Сергеев Валерий Васильевич

Официальные оппоненты -

доктор технических наук,  
профессор  
Ермолин Владимир Николаевич  
кандидат технических наук  
Брусин Наум Абрамович

Ведущая организация -

УХТЪ "Леспром",  
г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится "04" октября 2007 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.253.04 при Сибирском государственном технологическом университете по адресу: 666049, г. Красноярск, пр. Мира 82, СибГТУ.

Автореферат разослан "29" августа 2007 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СибГТУ.

ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



А.В. Мелешко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Переход к рыночной экономике, с одной стороны увеличил количество предприятий, проводящих сушку древесины, с другой - достаточно остро поставил проблемы повышения качества и снижения себестоимости сушки. При этом сушка пиломатериалов среди других производств лесопромышленного комплекса (ЛПК) является наиболее энергозатратной.

Увеличение количества производителей сухих пиломатериалов привело к широкому внедрению малогабаритных сушильных камер, эффективная эксплуатация, которых в условиях острого дефицита квалифицированных кадров и постоянного роста цен на энергоносители, стала вполне самостоятельной проблемой.

Поэтому разработка эффективной энергосберегающей технологии сушки пиломатериалов, для предприятий с относительно небольшими объемами, до 5 тыс. м<sup>3</sup> условного пиломатериала в год, на основе научно - обоснованных решений, является весьма актуальной проблемой.

**Цель работы** - снижение энергетических затрат и повышение качества сушки пиломатериалов при совмещенном процессе «прогрев-сушка» в камерах малой мощности.

**Объектом исследования** являются процессы конвективной сушки древесины, экспериментальные лабораторные и промышленные модели лесосушильных камер.

**Предметом** исследования является структура и параметры режимов конвективной сушки пиломатериалов.

### **Научной новизной обладают:**

1. Методика расчета параметров поверхностной зоны пиломатериалов при конвективной сушке.
2. Методика определения динамики насыщения агента сушки влагой при совмещенном процессе «прогрев-сушка».
3. Математические модели, описывающие закономерности изменения температуры в камере без начального увлажнения обрабатывающей среды для различных конструкций камер.
4. Математические модели, описывающие закономерности изменения равновесной влажности агента сушки и текущей влажности пиломатериалов без начального увлажнения обрабатывающей среды.

### **Научная гипотеза, выносимая на защиту:**

Возможность применения технологии сушки пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатывающей среды при экспоненциальном изменении основных параметров (температуры и

равновесной влажности) без снижения качества.

**Достоверность** сформулированных в диссертации предложений и выводов подтверждается хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Выводы теоретического плана базировались на результатах теоретического анализа существа проблемы. Полученные в результате теоретических исследований зависимости согласуются с положениями таких наук как физика и физико-математические основы процессов деревообработки, в частности, сушки древесины.

Регрессионные модели достаточно точно воспроизводят описываемые явления, а их адекватность подтверждается в соответствии с общепринятыми методиками.

Промышленная апробация разработанной технологии сушки подтвердила ее эффективность.

**Практическая значимость работы.** Разработаны и апробированы в производственных условиях эффективные режимы сушки пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатываемой среды.

Применение в промышленности указанных режимов позволяет:

1. Существенно упростить и удешевить технологию сушки пиломатериалов в камерах малой мощности.
2. Повысить качество сушки пиломатериалов при использовании совмещенного процесса «прогрев-сушка».

**Теоретические, методологические и информационные основы исследования.**

Информационную базу исследования составили материалы научных исследований специалистов, научная, учебная и методическая литература, материалы периодических изданий, патентная информация, сведения из сети Интернет.

Исследования проводились с использованием принципов системного подхода, включающего методы теории сушки, термодинамики, теории вероятностей и математической статистики. Инструменты и приборы, выбранные для экспериментов, соответствовали по точности современным требованиям.

Основные научные и практические результаты, полученные автором:

- разработана методика расчета параметров поверхностной зоны пиломатериалов при конвективной сушке;
- определена рациональная структура режимов сушки без искусственного увлажнения обрабатываемой среды;
- разработаны математические модели, описывающие закономерности изменения параметров агента сушки при совмещенном процессе «прогрев-сушка» для различных типов камер малой мощности.

**Место проведения.** Работа выполнена на кафедре древесиноведения и специальной обработки древесины ГОУ ВПО "Уральский государственный лесотехнический университет".

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и отдельные ее разделы были заслушаны и получили одобрение на ежегодных научно-технических конференциях "Вклад ученых и специалистов в развитие химико-лесного комплекса" (г. Екатеринбург, 1999-2003гг.), на международной научно-практической конференции в Брянске «Лес-2000» и научно-технической конференции в г. Брянске в 2006 г., на областной выставке художественных промыслов в г. Екатеринбурге в 1999 г., на конференции студентов, аспирантов, магистров в г.Екатеринбурге в 2006г.

**Реализация работы.** Разработанная технология сушки пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатывающей среды прошла промышленную апробацию на ООО "Леспром" и в учебно-производственных мастерских Уральского государственного лесотехнического университета (УПМ УГЛТУ), акты прилагаются.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 8 статьях, одной монографии и свидетельстве на полезную модель. Результаты исследований отражены в отчетах по НИР ФГУП "УралНИИПДрев".

**Объем диссертации и ее структура.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов и рекомендаций, библиографического списка, включающего 92 наименования и приложений. Общий объем работы 147 страниц, 39 рисунков, 27 таблиц, 4 страницы приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научные положения, выносимые на защиту. Раскрывается научная новизна работы, значимость ее результатов для науки и практического применения. Содержатся данные о месте проведения и апробации работы, внедрения результатов в промышленности. Данные о структуре и объеме диссертации.

**В первом разделе** обосновывается необходимость использования на предприятиях лесного комплекса небольших сушильных камер производительностью до 5 тыс. м<sup>3</sup> условного пиломатериала в год. По литературным источникам приводятся общие сведения и технические характеристики первых отечественных малых лесосушильных камер.

Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников показал, что проблематика диссертации самым широким образом рассматривалась в исследовании различных ученых, главным образом российских. Это И.В. Кречетов, П.С. Серговский, П.В.Соколов, Э.А.Микит, Г.С.Шубин, В.В.Сергеев и другие.

Анализ технических решений камер малой мощности позволяет выявить ряд характерных особенностей и учесть их при разработке новых модификаций сушильных камер, экономичных, простых в изготовлении и управлении. В первом разделе показаны аэродинамические схемы и технические характеристики таких камер.

Установлено, что увлажнение сушильного агента в этих камерах производится, в основном, за счет внутренней влаги древесины, технологический пар для целей сушки практически не применяется.

В предлагаемой "Руководящими техническими материалами по технологии камерной сушки пиломатериалов" (РТМ) структуре режимов сушки нет четкого разграничения между низко- и высокотемпературными режимами, а последние вследствие этого не могут быть рекомендованы для качественной сушки.

На основании приведенного анализа структуры энергетических затрат на камерную сушку установлено, что КПД камер не превышает 34 %. Исключение операции увлажнения воздушной среды камеры, в период прогрева и конечной влаготеплообработки штабеля, позволило бы снизить затраты тепловой энергии на 12%.

Таким образом, исключение операции увлажнения среды камеры при совмещенном процессе «прогрев-сушка», определило основные задачи теоретических и экспериментальных исследований:

1. Обоснование возможности снижения энергетических затрат на сушку без снижения качества.
2. Обоснование достаточной влагоемкости камеры.
3. Исследование кинетики и динамики совмещенного процесса «прогрев-сушка».
4. Разработка технологических режимов и технологии сушки без искусственного увлажнения среды.
5. Проведение промышленной апробации.
6. Определение технико-экономической эффективности применения новой технологии сушки.

**Во втором разделе** рассматриваются теоретические исследования сушки пиломатериалов, при совмещенном процессе «прогрев-сушка».

Целью данных исследований было аналитическое подтверждение возможности качественной сушки пиломатериалов с использованием нормативных режимов, но без искусственного увлажнения среды в период прогрева и конечной влаготеплообработки штабеля в камерах малой мощности.

Теоретические исследования проводились при следующих исходных данных:

- материал сушки - условный;
- порода – сосна ( $\rho_0=400 \text{ кг/м}^3$ );
- $W_n=60\%$ ,  $W_k=12\%$ ;

- категория качества сушки – II;
- сушильная камера - СКС-1;
- режим сушки - нормальный, № 4.

С учетом процессов движения влаги в древесине при сушке выделяют две зоны в сечении высушиваемого сортамента – поверхностную и внутреннюю.

В начале процесса сушки поверхностное испарение будет вызывать снижение влажности наружных слоев. После того, как свободная влага с поверхности доски будет удалена, между внутренними слоями и поверхностью появляется разность капиллярных давлений, обеспечивающая подсос к поверхности свободной влаги по мере ее испарения. И.В. Кречетов определил, что для начального периода удаления свободной влаги закон распределения влажности по толщине сортамента описывается параболой четвертой степени:

$$W_x = W_M - \left(\frac{x}{R}\right)^4 \cdot (W_M - W_n), \% \quad (1)$$

где  $W_M$  - влажность в середине сечения, %;

$W_n$  - влажность на поверхности материала, %;

$R$  - половина толщины материала, мм;

$W_x$  - влажность материала на расстоянии  $x$  от центра, %.

После преобразований получим следующую расчетную формулу для определения размера поверхностной зоны доски:

$$y = R \cdot \left(1 - \sqrt[4]{\frac{W_M - W_x}{\Delta W}}\right), \text{ мм} \quad (2)$$

где  $\Delta W$  – изменение средней влажности поверхностной зоны, %.

$$\Delta W = W_M - W_{n_0}.$$

Таким образом, для дальнейших исследований размер поверхностной зоны принят равным  $y=7$  мм.

В основе расчетов продолжительности процессов начального прогрева древесины лежит решение дифференциального уравнения теплопроводности. Для неограниченной пластины температура в любой точке сечения ( $x$ ) может быть определена по формуле:

$$\theta = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_o} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[ \mu_n \left(1 - \frac{x}{R}\right) \right] e^{-\mu_n^2 F_o} \quad (3)$$

где  $\theta$   $t_x$  – безразмерная и размерная температура в искомой точке сечения, °C;

$t_c, t_0$  - температура среды и начальная температура древесины, °C;

$F_0$  - критерий Фурье,  $F_0 = a\tau / R^2$ ;

$R$  - характерный размер тела, мм;

$A_n, \mu_n$  - параметры, зависящие от критерия Био в точке,  $B_i = \alpha R / \lambda$ .

В практике расчетов процессов нагревания древесины достаточно прочно утвердилось использование решений в критериальном виде, когда при ГУ III рода для любой точки сечения графически связываются между собой  $\theta$ ,  $x/R$ ,  $F_0$  и  $B_i$ .

Для определения температуры в интересующей точке сечения  $t_x$  задаются временем  $\tau$  и подсчитывают величину  $F_0$ , что дает возможность определить  $\theta$ , и по ним

$$t_x = t_c - \theta(t_c - t_0), ^\circ\text{C},$$

Для определения времени по заданной температуре в точке  $x$  подсчитывается величина  $\theta$ , что дает возможность при известном  $x/R$  определить критерий Фурье  $F_0$ , а по нему время прогрева древесины

$$\tau = \frac{F_0 R^2}{a}, \text{с} \quad (4)$$

В случае прогрева мерзлой древесины расчетная продолжительность оттаивания определяется по формуле

$$\tau = \frac{F_0 R^2 q}{a(q - q_0)}, \text{с} \quad (5)$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$q$  - полный расход тепла на оттаивание и прогрев древесины, кДж/кг;

$q_0$  - расход тепла на оттаивание древесины, кДж/кг.

На основании этого были определены закономерности изменения температуры прогрева древесины в условиях конвективного теплообмена при различных значениях температуры среды в камере, а также продолжительности прогрева с учетом оттаивания древесины. Кроме того, для сопоставления полученных данных выполнены расчеты определения продолжительности прогрева по рекомендациям РТМ. Результаты расчетов приведены на рис.1.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Абсолютное значение температуры среды существенно влияет на скорость прогрева, как в случае положительных начальных температур, так и в случае мерзлой древесины.

2. В области положительных начальных температур древесины рекомендации РТМ по времени начального прогрева следует



считать завышенными.

3. Для начальных отрицательных температур ( $t_n = -20^\circ$ , мерзлая древесина) рекомендации РТМ близко совпадают с данными расчета.

При исследовании совмещенного процесса «прогрев-сушка» необходимо определить такие параметры как влагоемкость и влагосодержание воздуха.

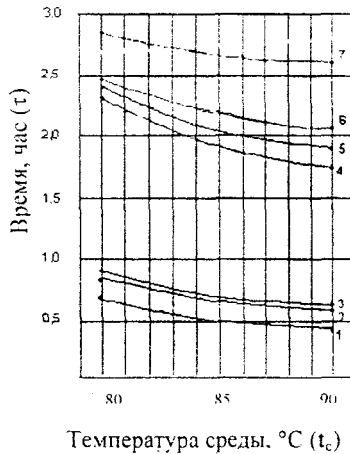


Рис. 1. Продолжительности прогрева сортимента до заданной температуры ( $t_s = 77^\circ\text{C}$  – на оси сортимента) от температуры среды 1 – поверхностная зона ( $t_n = 20^\circ\text{C}$ ); 2 – на оси сортимента ( $t_n = 20^\circ\text{C}$ ); 3 – поверхностная зона ( $t_n = -20^\circ\text{C}$ ); 4 – на оси сортимента ( $t_n = 0^\circ\text{C}$ ); 5 – на оси сортимента ( $t_n = -20^\circ\text{C}$ ); 6 – РТМ ( $t_n > 0^\circ\text{C}$ ); 7 – РТМ ( $-20^\circ\text{C} < t_n < 0^\circ\text{C}$ )

Влагосодержание воздуха определяется по формуле:

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_n(t^\circ)}{B - \varphi \cdot P_n(t^\circ)}, \text{ г/кг абсолютно сухого воздуха} \quad (6)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;

$P_n(t^\circ)$  – давление насыщенного пара в функции температуры, Па;

$B$  – атмосферное давление, Па.

При  $\varphi=1,0$   $d$  представляет собой ни что иное, как влагоемкость ( $d'$ )

$$d' = 622 \cdot \frac{P_n(t)}{B - P_n(t)}, \text{ г/кг абсолютно сухого воздуха.} \quad (7)$$

Зная параметр влагоемкости  $d'$ , можно определить, какое количество влаги надо испарить, чтобы насытить воздух в камере влагой.

При совмещенном процессе «прогрев-сушка», среда камеры насыщается влагой до  $\varphi=1,0$  при небольших изменениях влажности поверхностной зоны досок  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}} < 1,5\%$  (рис.2), что приводит к прекращению процесса сушки, идет только нагрев древесины.

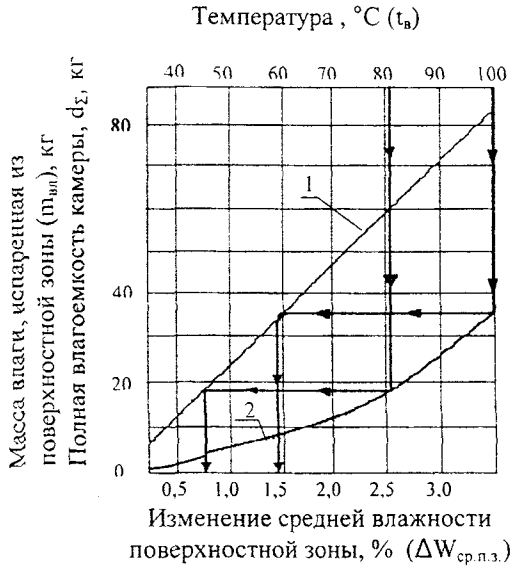


Рис. 2. График определения влагоемкости среды сушильной камеры  
1 – масса влаги, испаряемой из поверхностной зоны в зависимости от изменения ее средней влажности ( $m_{вд.}=f(\Delta W_{\text{ср.п.з.}})$ ); 2 – влагоемкость камеры в зависимости от температуры ( $d_{\Sigma}=f(t)$ )

При определении размера поверхностной зоны, максимальное значение  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}}$  принималось равным 3%. Из графика следует, что при изменении  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}}$  от 0,5 до 3,0% в воздух камеры испаряется соответственно от 12 до 73 кг влаги, которая в той или иной степени может насыщать воздушную среду.

В процессе влаготеплообработки пиломатериалов после закрытия воздухообменных каналов среда насыщается влагой при изменении  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}}$  в пределах до 1,0%.

По показаниям влагоемкости можно определить, сколько влаги

содержится в воздухе камеры при относительной влажности 100% ( $\varphi=1.0$ ). Так, при температуре 50<sup>0</sup>С для полного насыщения воздуха камеры необходимо всего около 5 кг влаги, а при 100<sup>0</sup>С - уже более 35 кг. При рассмотрении взаимного расположения зависимостей 1 и 2 видно, что влаги, содержащейся в поверхностной зоне, с избытком хватает, чтобы насытить влагой воздух камеры в диапазоне температур 50 – 100<sup>0</sup>С. Даже при  $t_c = 100^{\circ}\text{C}$  воздух камеры полностью насыщается влагой (насыщенным паром) уже при изменении  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}}$  всего на 1,4% (при  $t_c = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}} = 0,7\%$ ).

На рис. 3 приведен график совмещенного процесса «прогрев-сушка».

В первый период (0-1 по оси времени) происходит прогрев древесины и частичное испарение влаги из поверхностной зоны. Однако, снижение влажности древесины в поверхностной зоне  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}} < 1,5\%$  невелико, точка 1 на оси времени соответствует полному насыщению воздуха камеры влагой и прекращению испарения влаги из поверхностной зоны.

Период (1-2) характеризуется завершением процесса прогрева штабеля и началом сушки, которая протекает в период (2-5) с разной интенсивностью для поверхностной и внутренней зон доски. При этом усушка древесины в поверхностной зоне начинается в точке 3, внутренней - в точке 4, что соответствует достижению поверхностной зоной влажности, соответствующей пределу гигроскопичности  $W_{\text{п.г.}}$ . Сушка завершается в точке 5, соответствующей равновесной влажности древесины  $W_p$ . Конечную влаготеплообработку период (5-6) проводят при закрытых приточно-вытяжных каналах, среда камеры насытится влагой (24 кг) при изменении  $\Delta W_{\text{ср.п.з.}} = 1,0\%$ , дополнительно диспергировать влагу не потребуется.

Применение совмещенного процесса «прогрев-сушка» возможно для различных пород древесины и типов камер.

Так, при сушке древесины березы  $\rho_0=500 \text{ кг/м}^3$  (против  $\rho_0=400 \text{ кг/м}^3$  сосны), насыщение среды камеры влагой будет происходить при меньшем процентном изменении влажности поверхностной зоны.

В дальнейшем, в работе было рассмотрено уравнение теплового баланса камеры, с целью описания динамических характеристик, чтобы затем сравнить аналитическое описание с данными экспериментов.

Дифференциальное уравнение изменения текущей влажности древесины в процессе сушки имеет вид:

$$K_c \frac{dW}{dt} + W = W_p^k \exp(-\alpha t) . \quad (8)$$

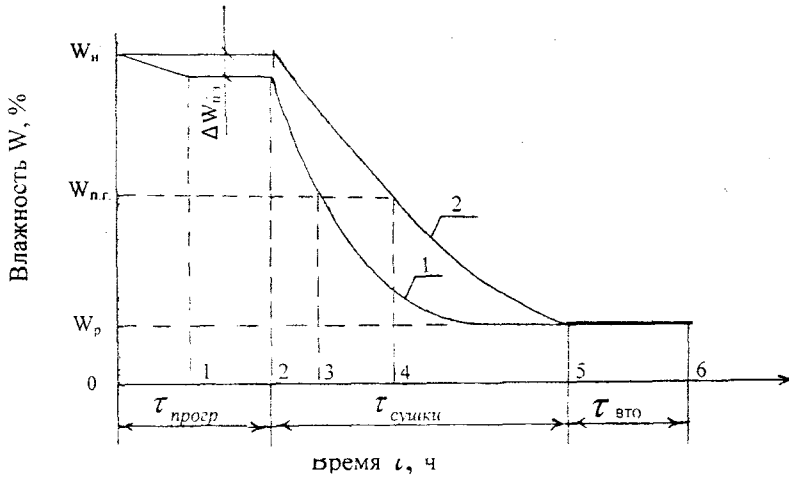


Рис. 3. График совмещенного процесса «прогрев-сушка»  
 1 – поверхностная зона; 2 – внутренняя зона; 3 – начало сушки древесины в поверхностной зоне; 4 – начало сушки древесины во внутренней зоне; 5 – завершение сушки.

Решая уравнение (8), получаем выражение, характеризующее изменение средней текущей влажности в процессе конвективной сушки – уравнение кинетики процесса:

$$W_T(\tau) = W_p(\tau) + (W_n - W_p) \exp(-\tau / K_c), \% \quad (9)$$

где  $K_c$  – коэффициент Серговского.

В результате решения дифференциального неоднородного уравнения камеры и проведения соответствующих преобразований получим уравнение изменения температуры среды в камере в функции времени:

$$t_c(\tau) = t_n + t_{\max} (1 - C_1 e^{-Pd' \cdot F_n} + C_2 e^{-\frac{\tau}{K_c}} + C_3 e^{-\alpha \tau}), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

где  $Pd'$  – значение критерия Предводителява;

$C_1, C_2, C_3$  – постоянные интегрирования.

В дальнейшем, при проведении экспериментальных исследований выражения (9) и (10) будут получены только в функции времени для конкретных случаев сушки.

Таким образом, теоретические исследования совмещенного процесса «прогрев-сушка», подтверждают возможность проведения качественной сушки пиломатериалов.

В третьем разделе рассматриваются общие методические положения при проведении исследований. С целью интенсификации процесса и повышения качества сушки, для камер периодического действия, был разработан способ сушки, содержащий в своей основе нормативные температурно-влажностные параметры среды:

- психрометрическую разность для всех ступеней режима;
- максимальный уровень температуры среды, равный по значению температуре последней ступени сушки.

Схема предлагаемой структуры режимов сушки приведена на рис. 4.

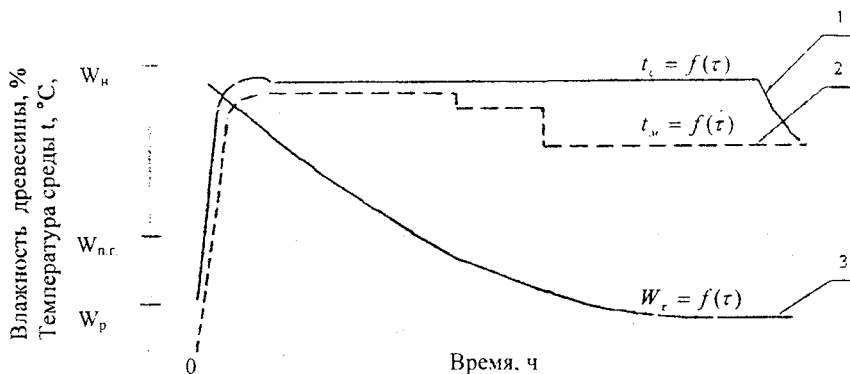


Рис. 4. Схема предлагаемой структуры режимов сушки

1 — изменение температуры сухого термометра; 2 — изменение температуры смоченного термометра; 3 — изменение текущей влажности древесины

Предлагаемые режимы сушки, на примере заготовок древесины березы, приведены в табл.1 и подразделяются на форсированные, нормальные и мягкие.

Разведывательные и основные исследования проводились в лаборатории, на специальной установке - сушильной камере, оснащенной электронагревателем, вентилятором, пускорегулирующей аппаратурой, весами, что позволяет определять текущую влажность древесины по весу штабеля.

Задачей проведения опытов являлось: определение области оптимальных режимных параметров при проведении основных опытов. Кроме того, предусматривалось исследование влияния более жестких режимных параметров для заготовок древесины березы, чем рекомендуется РТМ.

Таблица 1

## Режимы сушки заготовок древесины березы (толщина 32-40 мм)

Текущая влажность древесины, %	Категории режимов					
	Форсированный		Нормальный		Мягкий	
	Температура, °С					
	$t_c$	$\Delta t$	$t_c$	$\Delta t$	$t_c$	$\Delta t$
> 30		5		4		4
30 - 20	91	8	83	7	77	7
< 20		26		24		23

Примечание:  $t_c$  - температура сушильного агента;  $\Delta t$  - психрометрическая разность.

По результатам разведывательных опытов определены значения режимных параметров для основных исследований, которые проводились при увеличенном числе опытов для определения достоверности результатов и оценки эффективности исследуемых режимов.

По результатам основных исследований установлен рациональный режим, для которого проводилось точное измерение температуры центра и поверхности образца, изменение послойной влажности и определение величины остаточных напряжений после сушки.

Основная цель производственных исследований - получить более точные значения технико-экономических показателей сушки заготовок древесины березы и сосны в камерах малой мощности и проверить разработанные режимы в производственных условиях.

Математическая обработка результатов отдельных экспериментов проводилась методом вариационных методик моделирования процесса сушки.

Таким образом, проведенные лабораторные исследования показали эффективность предложенной структуры режимов, подтвердили правильность выбранных параметров процесса сушки, по результатам аналитических исследований.

**В четвертом разделе** приведены результаты экспериментальных исследований процессов сушки пиломатериалов без искусственного увлажнения среды.

В ходе лабораторных исследований было установлено следующее:

- по предложенной структуре режимов наиболее эффективными и безопасными режимами сушки березовых заготовок толщиной 32-40 мм следует считать две категории: нормальные и мягкие;
- изменение послойной влажности подчиняется выявленным закономерностям. Так, в период прогрева штабеля, вследствие насыщения воздушной среды камеры влагой, испаренной из древесины, снижение влажности в поверхностной зоне невелико:  $3 \pm 5$  %;
- остаточные напряжения при использовании нормальных режимов находятся в допустимых пределах, достигая экстремальных значений при форсированных режимах сушки.

Исследования апробированы в производственных условиях:

1. Камера СКС-1 (ООО "Леспром") - нормальные режимы.
2. Камера ИУ-1В (УПМ УГЛТУ) - мягкие режимы.

В ходе эксперимента определялись следующие показатели:

- изменение температуры агента сушки в камере во времени;
- изменение равновесной влажности во времени;
- изменение текущей влажности пиломатериалов во времени.

Анализ полученных данных показывает, что полученные ранее теоретические зависимости равновесной и текущей влажности во времени, достаточно близко совпадают с данными эксперимента. Так, для температурных зависимостей максимальное отклонение данных эксперимента от теоретической кривой не превышает 10 %. Что касается зависимостей равновесной и текущей влажностей, то здесь экспериментальные и теоретические зависимости совпадают еще в большей степени, расхождение не превышает 5 %.

Динамические характеристики исследованных камер описываются соотношениями, полученными при анализе уравнения теплового баланса камеры.

Для камеры ИУ-1В (режим мягкий):

$$t(\tau) = t_n + 57 \cdot (1 - 0,5e^{-0,153\tau} - 0,4e^{-0,046\tau} - 0,1e^{-0,0152\tau});$$

$$W_p(\tau) = 15e^{-0,0073\tau};$$

$$W_T(\tau) = W_p(\tau) + 54e^{-0,0191\tau}.$$

Для камеры СКС-1 (режим нормальный):

$$t(\tau) = t_n + 63 \cdot (1 - 0,5e^{-0,284\tau} - 0,4e^{-0,085\tau} - 0,1e^{-0,028\tau});$$

$$W_p(\tau) = 14e^{-0,0136\tau};$$

$$W_T(\tau) = W_p(\tau) + 55e^{-0,0357\tau}.$$

Производственные исследования показали, что предложенная структура режимов позволяет существенно снизить продолжительность сушки пиломатериалов.

Так, продолжительность сушки составила:

- камера ИУ-1В, мягкий режим:  $\tau_{\text{сушки}} = 151$  ч, что на 27 % меньше продолжительности сушки по режиму 6Г (РТМ), составляющей 206 часов;

- камера СКС-1, нормальный режим:  $\tau_{\text{сушки}} = 81$  ч, что на 21,4 % меньше продолжительности сушки по режиму 4Г (РТМ), составляющей 102 часа.

Анализируя результаты рассортировки пиломатериалов (табл. 2), высушенных по нормальному режиму предложенной структуры, следует отметить, что переход в низшие сорта составляет менее 8 % от общего количества пиломатериалов, в том числе по причине трещинообразования - около 5 %.

Таким образом, исследования показали, что предложенная структура режимов сушки достаточно эффективна и позволяет обеспечить соответствующее качество. Производственные испытания доказали возможность снижения продолжительности сушки, а совмещение процесса «прогрев-сушка» – снижение энергетических затрат.

**В пятом разделе** приводится расчет технико-экономической эффективности сушки пиломатериалов при совмещенном процессе «прогрев-сушка» в камерах малой мощности.

Таблица 2

## Результаты рассортировки пиломатериалов

Дефекты сушки	Количество досок, шт	% от общего количества
Без изменения	202	63,4
Имели дефекты, не снижающие сорта	92	28,8
Переход в низшие сорта	25	7,8
В том числе по причинам:		
- торцовые трещины	1	0,3
- пластевые трещины	15	4,7
- коробление	9	2,8
Итого:	319	100,0

Экономическую эффективность применения новых режимов сушки, в рамках решаемой проблемы, можно оценить снижением



цеховой себестоимости сушки за счет сокращения продолжительности процесса и снижения удельных затрат тепловой и электрической энергии при эксплуатации камер (на одном и том же объекте внедрения технологии - лесосушильные камеры типа СКС-1, ООО «Леспром»).

В основу расчета экономической эффективности технологии сушки берутся данные, полученные в результате исследований в сравнении с базовым вариантом - нормативным режимом с применением увлажняющего пара.

Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии сушки составляет около 157,0 тыс. рублей на одну камеру СКС-1 (в ценах 2006 года).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Доказана целесообразность использования на предприятиях лесного комплекса сушильных камер малой мощности, с годовой производительностью до 5 тыс. м<sup>3</sup> условного пиломатериала в год, при обеспечении требуемого качества сушки.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено снижение энергетических затрат более, чем на 12 %, за счет исключения операции увлажнения в период прогрева и конечной влаготеплообработки, без снижения качества сушки.

3. В работе дан анализ процессов движения влаги в древесине. При сушке пиломатериалов выделяют две зоны - поверхностную и внутреннюю. В поверхностной зоне действует закон пропорциональности плотности потока влаги градиенту влажности.

4. Предложена методика расчета поверхностной зоны доски и продолжительности ее начального прогрева.

Сравнивая аналитические полученные данные с рекомендациями РТМ, можно заключить, что:

- в области положительных начальных температур древесины рекомендации РТМ по времени начального прогрева следует считать завышенными;
- для начальных отрицательных температур данные расчетов близко совпадают с рекомендациями РТМ.

5. Определены рациональные значения параметров изменения влажности поверхностной зоны доски, достаточные для качественного ведения совмещенного процесса «прогрев-сушка» и достаточного для насыщения камеры влагой до  $\varphi=1,0$ . Для древесины сосны это

происходит при  $\Delta W_{\text{ср.п.з}}=1,0-1,5\%$ , для древесины березы эти значения на 20-25% меньше.

6. Экспериментально доказано, что предложенная структура режимов позволяет снизить продолжительность сушки мягким режимом на 27%, нормальным и форсированным на 21,4% и 11,5%, соответственно.
7. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что предложенная структура режимов эффективна и обеспечивает соответствующее качество. Так, нормальный режим обеспечивает качество не ниже II категории, мягкий – I-II категории, но требует большей длительности процесса.
8. Определены зависимости изменения текущей влажности древесины в функции времени и изменение температуры среды в функции времени.
9. Применение новой технологии сушки пиломатериалов, при совмещенном процессе «прогрев-сушка», позволяет исключить операцию увлажнения среды, без снижения качества сушки пиломатериалов, обеспечивая при этом снижение энергетических затрат на сушку.
10. Экономическая эффективность применения разработанной технологии сушки заключается в повышении качества сушки пиломатериалов и снижении себестоимости. Для предприятий с объемом сушки до 5000 м<sup>3</sup> в год составит 784000 рублей в год.

Материалы по теме диссертации изложены в следующих работах:

1. Гороховский А.Г. Начальный прогрев штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатываемой среды / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, О.А. Удачина // Деревообрабатывающая промышленность. – 2005. – № 6.
2. Удачина О.А. Технологические основы сушки-прогрева при конвективном процессе / О.А. Удачина, Е.С. Синегубова, В.В. Сергеев, В.Е. Рысев // Сборник тезисов Международной научно-технической конференции «Лес-2000». – Брянск: БТН, 2000.
3. Рысев В.Е. Теплообмен в лесосушильных камерах малой мощности / В.Е. Рысев, О.А. Удачина, Л.А. Севастьянова, Т.В. Чернявский // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии». – Екатеринбург: УГТУ, 2000.
4. Тракало Ю.И. Технико-экономические показатели работы лесосушильных камер малой мощности / Ю.И. Тракало, Л.А. Перепелкина, В.В. Сергеев, О.А. Удачина // Научные труды: Сборник Уральской лесотехнической академии. – Екатеринбург, 2000.
5. Рысев В.Е. Теплообмен в лесосушильных камерах малой мощности / В.Е. Рысев, О.А. Удачина, Ю.И. Тракало, Л.А. Севастьянова

- // Тезисы доклада международной конференции по современным энергосберегающим технологиям. – М.: ГАУ, 2002.
6. Удачина О.А. Повышение качества сушки пиломатериалов / О.А. Удачина, В.В. Сергеев // Монография. – Екатеринбург: Уральский институт подготовки и повышения квалификации кадров лесного комплекса, 2002.
  7. Насобин В.В. Методические положения при проведении лабораторных и промышленных экспериментов по отработке режимов сушки в лесосушильных камерах / В.В. Насобин, О.А. Удачина, В.Е. Рысев, В.В. Сергеев // Международная научно-техническая конференция «Социально-экономические проблемы лесного комплекса». Сборник материалов. – Екатеринбург, 2003.
  8. Гороховский А.Г. О начальном прогреве штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатывающей среды / А.Г. Гороховский, О.А. Удачина, Е.Е. Шишкина // Сборник научных трудов Актуальные проблемы лесного комплекса.- Брянск. – 2006. - №14.
  9. Пермякова О.В. Природопользование / О.В. Пермякова, О.А. Удачина // Материалы конференции студентов, аспирантов, магистрантов. – Екатеринбург: Уральский институт подготовки и повышения квалификации кадров лесного комплекса 2006

Подписано в печать 14.06  
620100, г.Екатеринбург, С  
Уральский государственн  
Отдел оперативной полиг