

На правах рукописи

Шишкина Елена Евгеньевна

СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В КАМЕРАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА

05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование деревообработки

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2006

Диссертационная работа выполнена на кафедре механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Гороховский Александр Григорьевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Комиссаров Анатолий Петрович

- кандидат технических наук, доцент
Акишенков Савелий Иванович

Ведущая организация - ООО «ПКТБ леспром», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «20» декабря 2006 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.220.03 при Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, СПбЛТА

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбЛТА

Автореферат разослан «15» ноября 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Г.М. Анисимов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В своем послании 2004 г. к Государственной думе президент Российской Федерации В.В. Путин поставил задачу об удвоении ВВП за 10 лет. Однако при существующем уровне технологий это потребует удвоения производства энергии в России, что принципиально невозможно. Кроме того, ожидаемое в ближайшее время вступление России в ВТО приведет как минимум к двукратному увеличению тарифов на энергоносители, в частности на природный газ. Нельзя также не учитывать тенденцию роста цен на энергоносители в последние годы.

Все это вместе взятое требует в кратчайшие сроки решения проблем, связанные со значительным (в несколько раз) снижением энергопотребления самых различных технологий. В деревообработке одним из самых энергозатратных технологических процессов является камерная сушка пиломатериалов. При этом разукрупнение деревообрабатывающей промышленности, произошедшее в период рыночных реформ, потребовало создания простых недорогих, надежных в эксплуатации лесосушильных камер сравнительно небольшой производительности (от 500 до 3000 м³ условного пиломатериала в год). В этой связи разработка энергосберегающей технологии сушки пиломатериалов в камерах малой мощности на основе научно обоснованных решений является актуальной научно-технической проблемой.

Цель работы: повышение эффективности процесса сушки пиломатериалов в камерах малой мощности.

Объектом исследования являются процессы конвективной сушки древесины, экспериментальные лабораторные и опытно-промышленные образцы лесосушильных камер с естественной циркуляцией агента сушки.

Предметом исследования является структура и параметры режимов конвективной сушки пиломатериалов.

Научной новизной обладают:

1. Математические модели для определения потери напора в штабеле и скорости естественной циркуляции.
2. Математические модели, позволяющие осуществлять построение осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки.
3. Математические модели, позволяющие определить ожидаемое значение показателей качества сушки с параметрами осциллирующего режима при естественной циркуляции агента сушки.

4. Рациональные значения параметров осциллирующего режима сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки.

Научные гипотезы, выносимые на защиту:

1. Тепловой напор, создающий естественную циркуляцию в камере, характеризуется как статической, так и динамической составляющей, возникающей за счет плоской конвективной струи над нагревателем.
2. Определяющее влияние на скорость естественной циркуляции агента сушки оказывает линейная тепловая мощность нагревателя и конструкция штабеля.
3. Осциллирующий режим сушки пиломатериалов для камер с естественной циркуляцией воздуха характеризуется тремя параметрами: температурой охлаждения штабеля, амплитудой осцилляции температуры и продолжительностью открытия вытяжного воздушного канала камеры.

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 и древесных материалов.

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

Внедрение разработанной технологии сушки в производство подтвердило ее высокую эффективность.

Практическая значимость работы. Разработаны осциллирующие режимы сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией воздуха.

Применение в промышленности указанных режимов позволит:

1. Увеличить производительность сушильных камер с естественной циркуляцией агента сушки.
2. Существенно снизить затраты тепловой и электрической энергии на процесс сушки.

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 лично автором:

- разработаны математические модели, связывающие параметры естественной циркуляции;
- определена рациональная структура осциллирующего режима сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки;
- определены рациональные значения параметров режима сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией.

Место проведения. Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете на кафедре механической обработки древесины.

Апробация работы. Основные результаты и теоретические положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и научно-практических конференциях с международным участием: «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (2003 г.); «Научно-техническая конференция факультета МТД» (2005 г.); «Межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов» (2005 г.) – УГЛТУ, г. Екатеринбург; «Международная научно-техническая конференция, посвященная 75-летию университета» - АГТУ, г. Архангельск.

Реализация работы. Основные результаты работы внедрены на Верхне-Салдинском металлургическом производственном объединении.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 6 статей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов и рекомендаций, приложений, библиографического списка, включающего 139 наименований. Общий объем работы 162 страницы, 37 рисунков, 28 таблиц, 5 страниц приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Содержатся данные о месте проведения и апробации работы, внедрения результатов в промышленность, структуре и объеме диссертации.

В первом разделе выполнен анализ литературных источников, которые позволяют сделать следующие выводы:

1. При существующем уровне технологии затраты электроэнергии на камерную сушку пиломатериалов в 1,5 – 2,0 раза превышают таковые на их выпилку.
2. В структуре полной себестоимости камерной сушки пиломатериалов доля энергетической составляющей весьма значительна – около 60 %.
3. Суммарный количественный эффект, создаваемый всеми видами переноса влаги в древесине, оценивается относительным коэффициентом термодиффузии, который при гигротермическом равновесии равен по значению термоградиентному коэффициенту.
4. Значения термоградиентного коэффициента капиллярно-пористых тел увеличиваются с повышением влагосодержания, достигая некоторого максимального значения, а затем уменьшаются.
5. Если градиенты влажности и температуры имеют противоположное направление (как это имеет место при обычной камерной сушке), то интенсивность сушки снижается. Но если же поток влаги под влиянием термовлагопроводности направить в нужном направлении, то можно существенно увеличить эффективность процесса сушки.
6. Самостоятельным направлением в использовании явления термовлагопроводности при построении режимов сушки является класс, так называемых, осциллирующих режимов сушки древесины (ступенчатых, перемежающихся, цикловых и т.п.). Сущность данных режимов заключается в периодическом нагреве-остывании древесины. Причем в период охлаждения происходит бурное испарение влаги из древесины: в начальный период охлаждения интенсивность испарения влаги в 10 раз больше, чем при обычных методах сушки. По мере уменьшения перепада температур интенсивность испарения влаги снижается, к концу периода остывания она достигает обычных величин.
7. Радикальным путем снижения энергозатрат на сушку пиломатериалов является применение камер с естественной циркуляцией. К другим преимуществам камер этого типа можно отнести:
 - простоту конструкции и более низкую стоимость камеры;
 - более низкую амортизацию и эксплуатационные затраты.

К недостаткам этих камер обычно относят:

- большую продолжительность и неравномерность сушки пиломатериалов;
- более низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом.

По мнению ряда авторов причины этого кроются в низкой скорости циркуляции агента сушки.

8. По мнению целого ряда исследователей, достаточная скорость и неравномерность сушки достигается при скорости циркуляции в

- пределах 0,8 – 1 м/с. При определенных условиях такие значения скорости могут быть получены в камерах с естественной циркуляцией.
9. Одной из основных причин низких качественных характеристик промышленных камер с естественной циркуляцией воздуха – это игнорирование рекомендаций основоположников и произвольное изменение конструкции камер.
 10. Повышением коэффициента заполнения штабеля пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией является применение, так называемой, ребровой укладки в опорно-фиксирующую раму с уклоном.
 11. При правильной организации процесса сушки в камерах с естественной циркуляцией достигается экстремально низкая неравномерность сушки ($\sigma = 0,2 - 0,3 \%$), практически не достижимая в камерах с принудительной циркуляцией воздуха.

По результатам анализа литературных источников были определены следующие задачи исследования:

1. Теоретически и экспериментально исследовать процессы естественной циркуляции агента сушки в лесосушильных камерах.
2. Теоретически и экспериментально исследовать процессы тепло- и массопереноса при сушке пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией воздуха осциллирующими режимами.
3. Разработать и исследовать структуру и расписание осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией воздуха.
4. Провести промышленную проверку разработанных режимов.
5. Определить экономическую эффективность осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки.

Целью **второго раздела** «Теоретические исследования» является обоснование возможности эффективной сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией воздуха.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана методика расчета параметров естественной циркуляции в камерах.

Для определения скорости естественной циркуляции $V_{ц}$ агента сушки получена следующая формула (1):

Полученные в результате расчета значения скорости циркуляции приведены в табл. 1.

$$V_{ц} = \sqrt{\frac{S_k \left(Hg \frac{\rho_2 - \rho_1}{2} + \sqrt[3]{\frac{g^2 Q_0^2 (\rho_1 + \rho_2)^3}{12,4 \beta^2 \beta_{\Delta t}^2 c^2 \rho_1^2 T_1^2}} \right)}{S_{шт} \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{4} + \frac{\lambda \rho_1 h_{шт}}{2 d_{экр}} \right)}}, \text{ м/с} \quad (1)$$

где S_k – площадь нагнетательных каналов, м²;

$S_{шт}$ – суммарная площадь воздушных каналов штабеля, м²;

H – ширина доски, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q_0 – количество конвективного тепла, выделенного единицей длины источника тепла в секунду, кВт/м;

ρ_1, ρ_2 – плотность воздуха соответственно на входе в штабель и выходе из него, кг/м³;

β – коэффициент Буссинеска, м·с;

$\beta_{\Delta t}$ – температурный аналог коэффициента Буссинеска, с⁻¹;

c – удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С;

T_1 – абсолютное значение температуры воздуха на входе в штабель, °К;

$h_{шт}$ – высота штабеля, м;

λ – коэффициент сопротивления трения;

$d_{экр}$ – эквивалентный диаметр, м.

Таблица 1

Скорость естественной циркуляции агента сушки
в штабеле пиломатериалов

Толщина доски, мм	19	22	25	32	40	50	60	75
Скорость циркуляции, м/с	0,717	0,742	0,761	0,813	0,878	0,926	1,004	1,076

Данные табл. 1 показывают, что при выбранной конструкции штабеля (ребровая укладка), скорость циркуляции определяется, главным образом, толщиной пиломатериалов, подвергающихся сушке (при постоянной толщине прокладок).

Результаты проведенных исследований позволяют нам сделать следующие выводы:

- При расчете скорости естественной циркуляции в лесосушильных камерах необходимо помимо статической составляющей теплового напора учитывать динамическую составляющую в плоской струе над нагревателем.
- Применение ребровой укладки пиломатериалов позволяет существенно снизить коэффициент аэродинамического сопротивления штабеля и, соответственно повысить скорость естественной циркуляции.
- Сопротивление штабеля воздушному напору зависит с одной стороны от квадрата скорости циркуляции, а с другой от геометрических параметров штабеля, в первую очередь от соотношения толщины досок и прокладок.
- Скорость циркуляции при прочих равных условиях определяется толщиной высушиваемых пиломатериалов и может достигать 1 м/с.

2. Проведен анализ тепловых процессов, происходящих в камерах с естественной циркуляцией, в частности анализ процессов нагрева штабеля пиломатериалов при различной скорости циркуляции агента сушки. В расчетах использованы данные исследований, проведенных в МЛТИ под руководством профессора Г.С. Шубина. Расчет производился для следующих условий (рис. 1):

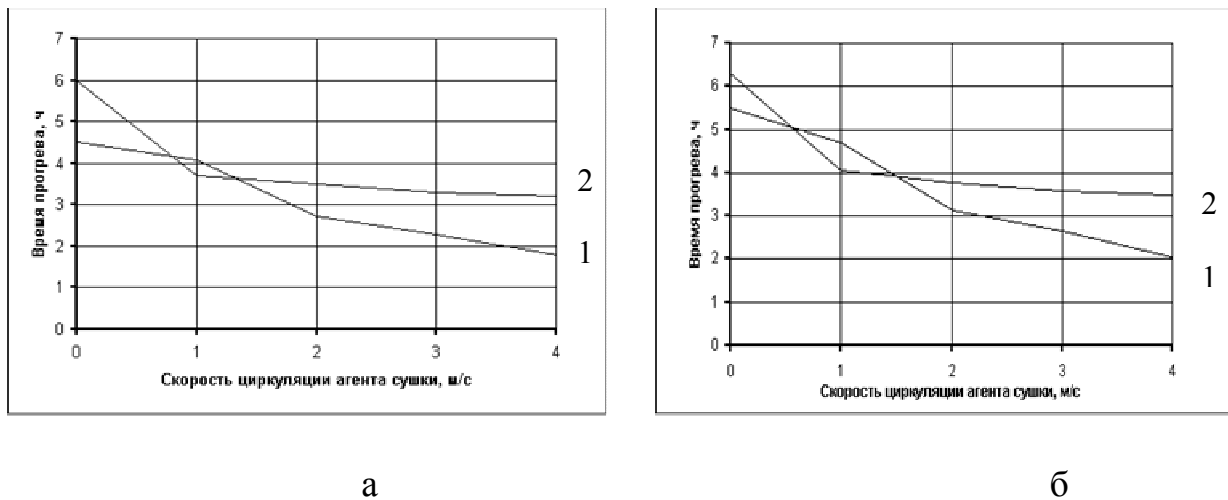


Рис. 1 Зависимость времени прогрева от скорости циркуляции агента сушки (а – сосна, $S = 50$ мм; б – береза, $S = 50$ мм; температура среды: 80°C ; 1 – расчет по методике РТМ; 2 – расчет по методике Г.С. Шубина)

1. Порода древесины: береза, сосна.
2. Толщина пиломатериалов (S_1): 25, 32, 40, 50 мм.

3. Температура обрабатываемой среды (t_c): 80; 90 °С.
4. Скорость циркуляции агента сушки (V): 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 м/с.

Для возможности сравнения полученных данных были также произведены расчеты продолжительности начального прогрева древесины по методике, рекомендуемой руководящими техническими материалами по камерной сушке древесины (РТМ), (рис. 2).

Приведенный вычислительный эксперимент позволяет сделать следующие выводы:

- Время достижения на середине сортимента температуры 77 °С (согласно рекомендациям РТМ) зависит в той или иной степени от всех параметров вычислительного эксперимента. При этом влияние скорости циркуляции начинает сказываться при толщине пиломатериалов 40 мм и более.
- Абсолютные значения времени прогрева штабеля для всех рассматриваемых случаев не превышает 6 часов. В то же время для тонких сортиментов ($S = 25$ мм) оно может находиться в пределах одного часа.
- Методики расчета, приводимые РТМ и Г. С. Шубиным, дают вполне сопоставимые результаты. При этом расчет по РТМ в области низких скоростей циркуляции дает несколько заниженные результаты, а в области высоких скоростей – несколько завышенные, по сравнению с методикой Г. С. Шубина.
- Влияние скорости циркуляции на интенсивность прогрева не является определяющим. Так, увеличение скорости циркуляции в 20 раз (с 0,2 м/с до 4 м/с) приводит к сокращению времени прогрева максимум в 1,6 – 1,8 раза.

3. Подобрана эффективная структура режима сушки и аналитически определены параметры данного режима.

Для лесосушильных камер с естественной циркуляцией эффективной оказывается структура режима с циклическим нагревом-охлаждением штабеля и промежуточным открытием выпускного канала (рис. 3).

Предлагаемая структура режима позволяет существенно сократить продолжительность сушки пиломатериалов по сравнению с нормативными режимами с естественной и слабой принудительной ($V_{ц} = 1$ м/с) циркуляцией.

В третьем разделе «Общие методические положения» дано описание экспериментальной установки (рис. 4), характеристика процесса сушки пиломатериалов в экспериментальной камере, а также приводится методика математической обработки результатов эксперимента.

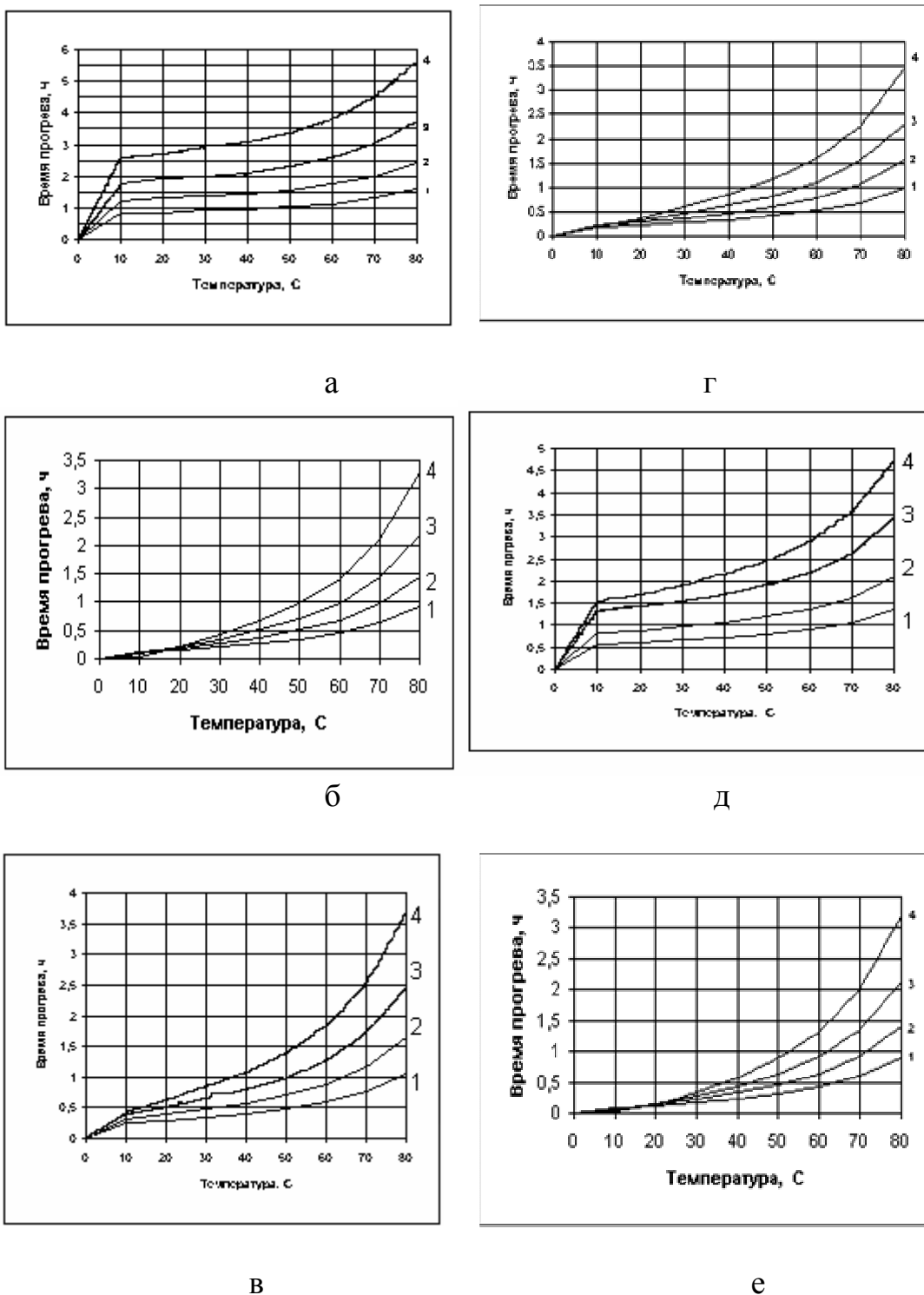


Рис. 2 Зависимость температуры древесины от продолжительности прогрева
 Порода древесины – сосна;
 Температура среды – 80 °С; начальная температура 0 °С;
 Толщина пиломатериала: 1 – 25 мм; 2 – 32 мм; 3 – 40 мм; 4 – 50 мм.
 Скорость циркуляции агента сушки: а) 0,2 м/с; б) 0,5 м/с; в) 1,0 м/с;
 г) 2,0 м/с; д) 3,0 м/с; е) 4,0 м/с.

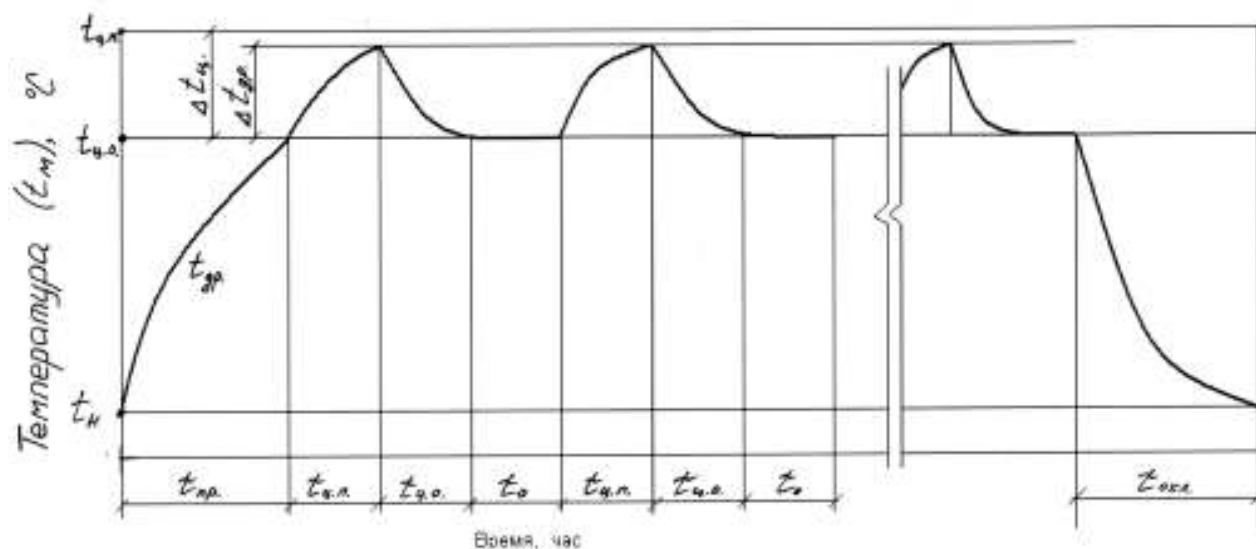


Рис. 3 Структура осциллирующего режима сушки в камере с естественной циркуляцией

где t_n – начальная температура, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{ц.о.}}$ – температура циклового охлаждения, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{ц.н.}}$ – температура циклового нагрева, $^{\circ}\text{C}$;
 $\tau_{\text{пр.}}$ – продолжительность первоначального прогрева, час;
 $\tau_{\text{ц.}}$ – продолжительность циклового прогрева, час;
 $\tau_{\text{ц.о.}}$ – продолжительность циклового охлаждения, час;
 τ_o – продолжительность открытия вытяжного канала, час;
 $\tau_{\text{охл.}}$ – продолжительность конечного охлаждения, час;
 $\Delta t_{\text{ц}}$ – амплитуда осциллирования температуры, $^{\circ}\text{C}$.

В камере (рис. 4) реализован принцип естественной циркуляции агента сушки. Камера состоит из теплоизолирующего корпуса 1, который закрыт теплоизолирующей крышкой 2. Загрузка пиломатериалов производится сверху. Штабель пиломатериалов 3 ребровым способом укладывается на подштабельное основание 4. С двух сторон от штабеля расположены экраны 5. Между стенами камеры и экранами образуются циркуляционные каналы. В нижней части этих каналов расположены нагреватели (тэны) 6 мощностью по 2 кВт каждый. Кроме того, в углублении в дне камеры расположен еще один дополнительный нагреватель 7. При необходимости в емкость, образуемую данным углублением, может подаваться вода, которая может нагреваться нагревателем 7. Это находит применение в случаях, когда необходима первичная пропарка древесины перед сушкой, а также когда необходимо дополнительно увлажнять среду камеры.

Камера оснащена вытяжным каналом 8, оснащенным управляющим шибером с электроприводом 10. Контроль температуры и относительной

влажности воздуха производится при помощи электрического психрометра, расположенного в верхней части камеры и состоящего из сухого 9 и смоченного 11 термометров сопротивления. Кроме того, ниже штабеля расположен еще один сухой термометр 12, который позволяет контролировать температуру воздуха в нижней части камеры, что для камер с естественной циркуляцией воздуха является особенно актуальным. Данные со всех датчиков заводятся в автоматическую систему контроля и управления (АСКУ) работой камеры 13. АСКУ при помощи указанных выше датчиков получает информацию о ходе процесса сушки и выдает регулирующие воздействия на включение и выключение нагревателей 6, 7, а также управляет работой вытяжного воздушного канала 9. Программируемый контролер автоматического регулятора АСКУ хранит в памяти до 60 режимов сушки. При помощи адаптера сети 14 АСКУ подключена к компьютеру 15, специальное программное обеспечение которого позволяет получить текстовую и графическую информацию о ходе процесса сушки. Контроль израсходованной на сушку пиломатериалов электроэнергии определяется по счетчику 16.

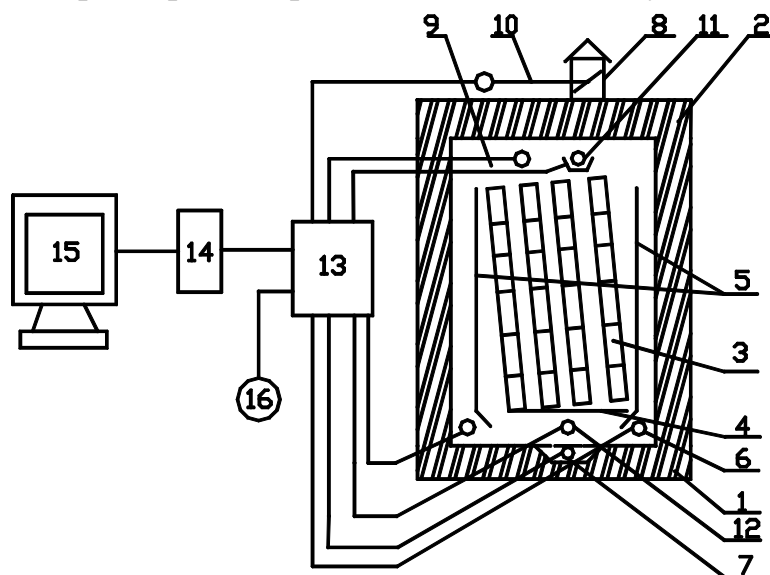


Рис. 4 Схема устройства экспериментальной лесосушильной камеры

В четвертом разделе «Экспериментальные исследования процесса сушки пиломатериалов осциллирующими режимами в камере с естественной циркуляцией» приводятся результаты лабораторных исследований процесса сушки пиломатериалов путем построения математических моделей выходных параметров эксперимента.

Получены следующие уравнения регрессии:

- по продолжительности сушки пиломатериалов:

- кодированный вид

$$\hat{Y}_1 = 133,3 - 5,3x_1 - 7,5x_3 + 3,7x_1^2 + 19,7x_2^2 + 7,7x_3^2 + 3,38x_1x_2 - 2,38x_1x_3 - 6,38x_2x_3 \quad (2)$$

- натуральный вид

$$\tau_{\text{суш}} = 3453 - 52,77t_0 - 146,02\Delta t - 39,09\tau_0 + 0,37t_0^2 + 6,57\Delta t^2 + 0,77\tau_0^2 + 0,112t_0\Delta t - 0,079t_0\tau_0 - 0,012\Delta t\tau_0 \quad (3)$$

- по среднеквадратическому отклонению влажности

- кодированный вид

$$\hat{Y}_2 = 0,5 + 0,06x_1 + 0,01x_2 + 0,02x_3 + 0,25x_1^2 + 0,2x_2^2 + 0,35x_3^2 + 0,038x_1x_2 + 0,038x_1x_3 + 0,038x_2x_3 \quad (4)$$

- натуральный вид

$$S = 168,49 - 14,505t_0 - 2,75\Delta t - 2,27\tau_0 + 0,025t_0^2 + 0,066\Delta t^2 + 0,035\tau_0^2 + 0,013t_0\Delta t + 0,00038t_0\tau_0 + 0,0013\Delta t\tau_0 \quad (5)$$

- по расходу энергии на сушку древесины

- кодированный вид

$$\hat{Y}_3 = 1,15 + 0,043x_1 + 0,021x_2 + 0,012x_3 - 0,02x_1^2 + 0,05x_2^2 + 0,04x_3^2 - 0,008x_1x_2 - 0,003x_2x_3 \quad (6)$$

- натуральный вид

$$N = -3,57 + 0,287t_0 - 0,352\Delta t - 0,24\tau_0 - 0,002t_0^2 + 0,017\Delta t^2 + 0,004\tau_0^2 - 0,00026t_0\Delta t - 0,0001\Delta t\tau_0 \quad (7)$$

где x_1, t_0 – температура охлаждения, $^{\circ}\text{C}$;

$x_2, \Delta t$ – амплитуда осциллирования температуры, $^{\circ}\text{C}$;

x_3, τ_0 – продолжительность открытия шибера воздушной заслонки, мин.

Решая компромиссную задачу методом условного центра масс, получим:

В натуральном выражении рациональные значения параметров режима:

$$\left. \begin{aligned} t_0^{**} &= 66^{\circ}C \\ \Delta t^{**} &= 11^{\circ}C \\ \tau_0^{**} &= 30 \text{ мин} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

При этом значения выходных параметров процесса сушки составляют:

$$\begin{aligned} T_{\text{суш}} &= 136 \text{ час} \\ S &= 0,52 \% \\ N &= 1,13 \text{ ГДж/м}^3 \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя полученные результаты, получим следующие выражения функции отклика для выходных параметров процесса:

$$\hat{Y}_1 = 133,3 - 5,3x_1 + 3,7x_1^2 + 19,7x_2^2 + 3,38x_1x_2^2 \quad (10)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,5 + 0,06x_1 + 0,01x_2 + 0,25x_1^2 + 0,02x_2^2 + 0,038x_1x_2 \quad (11)$$

$$\hat{Y}_3 = 1,15 + 0,043x_1 + 0,021x_2 - 0,02x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,008x_1x_2 \quad (12)$$

На рис. 5, 6 и 7 приведены зависимости выходных параметров процесса сушки пиломатериалов осциллирующими режимами в камере с естественной циркуляцией агента сушки. На всех графиках прослеживается наличие четко выраженного минимума поверхностей отклика.

Проведенный анализ результатов лабораторных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Выбранные в качестве управляющих факторов параметры режима сушки позволяют эффективно воздействовать на процесс сушки и изменять значения выходных параметров в весьма широких пределах.
2. Применение рациональных значений параметров режимов сушки позволяет получить вполне приемлемые значения продолжительности процесса сушки пиломатериалов, неравномерности влажности, а также затрат энергии на сушку. Полученное значение времени сушки всего на 13% больше теоретически предельного и нормативного.
3. Неравномерность влажности высушенных пиломатериалов соответствует требованиям I категории качества.
4. Внутренние напряжения во всех опытах реализованного плана соответствовали требованиям I – II категориям качества сушки. При этом требования I категории качества достигались при величине температуры охлаждения осциллирующего режима $70^{\circ}C$ и ниже. Полученные рациональные значения параметров режима ($t_0^{**}=66^{\circ}C$) позволяют надеяться на выполнения требований I категории качества по внутренним

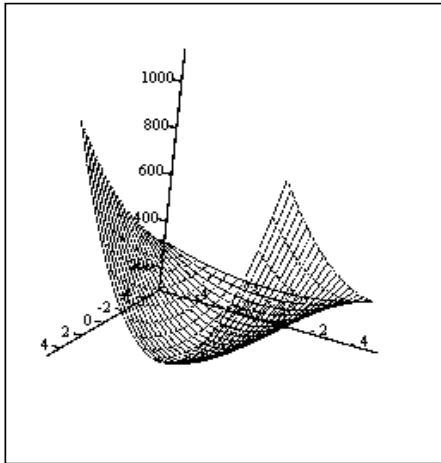


Рис. 5 Зависимость продолжительности сушки пиломатериалов от температуры осциллирования

z

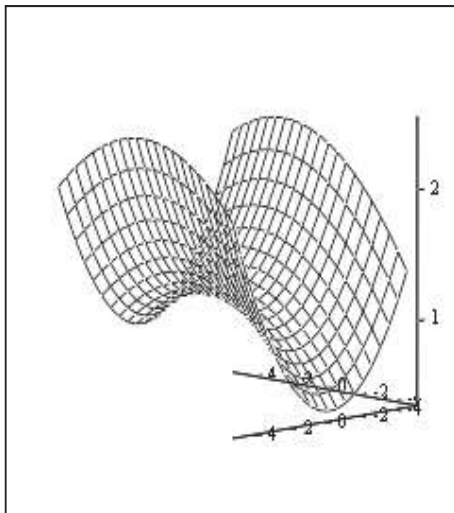


Рис. 6 Зависимость среднеквадратического отклонения влажности пиломатериалов от температуры охлаждения и температуры осциллирования

z

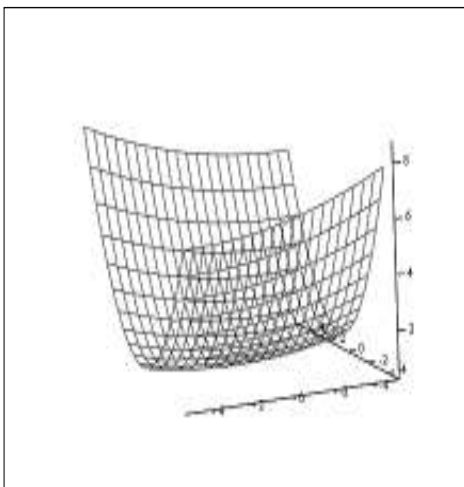


Рис. 7 Зависимость расхода энергии на сушку от температуры охлаждения и температуры осциллирования

z

напряжениям. Низкие значения внутренних напряжений объясняются с одной стороны весьма мягким режимом сушки, а с другой стороны особенностью осциллирующего режима. Ведь по сути дела осциллирующий режим является цепью циклических термовлагообработок, которые постоянно снимают внутренние напряжения. Кроме того, данные режимы позволяют полностью избежать таких дефектов сушки, как трещины, выплавление смолы, выпадение сучков.

В 2003 году на мебельно-обрабатывающем комплексе ОАО «ВСМПО» была смонтирована и запущена опытно-промышленная камера с естественной циркуляцией агента сушки.

В период с декабря 2003 года по ноябрь 2004 года на ОАО «ВСМПО» были проведены 5 опытных сушек в камере с естественной циркуляцией агента сушки.

Целью проведенных исследований было промышленное испытание разработанной технологии сушки пиломатериалов осциллирующими режимами при естественной циркуляции.

Анализ результатов проведенных производственных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Проведенные производственные исследования полностью подтвердили эффективность предложенных осциллирующих режимов.
2. В исследованном диапазоне изменения управляющих факторов (температуры нагрева и охлаждения) качество сушки пиломатериалов высокое: в основном соответствующее I категории качества.
3. Подтвердились результаты лабораторных исследований в части влияния температуры на внутренние напряжения. При этом I категории качества сушки достигается при температуре охлаждения 62°C и ниже.
4. Качество сушки, с точки зрения неравномерности влажности, высокое, полностью соответствует I категории качества.
5. Гарантированное качество сушки достигается при очень жестком соблюдении допуска на конечную влажность ($8 \pm 2\%$). Вероятность соблюдения этого допуска составляет 94 – 99 %.

В **пятом разделе** «Технико-экономическое обоснование осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки» приведен расчет удельных затрат тепловой и электрической энергии на сушку древесины в камерах с естественной и принудительной циркуляцией воздуха.

Анализ результатов расчета позволяет заключить, что стоимость затраченной энергии в случае сушки пиломатериалов в камере с

естественной циркуляцией воздуха в 3,3 раза меньше, чем при сушке в камере с принудительной циркуляцией.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При существующем уровне технологии затраты электроэнергии на камерную сушку пиломатериалов в 1,5 – 2,0 раза превышают таковые на их выпилку. В структуре полной себестоимости камерной сушки пиломатериалов доля энергетической составляющей весьма значительна и составляет около 60 %.
2. При современном соотношении цен на электрическую и тепловую энергию радикальным путем снижения энергозатрат и их стоимости на сушку пиломатериалов является применение камер с естественной циркуляцией агента сушки. К другим преимуществам камер этого типа можно отнести:
 - простоту конструкции и более низкую стоимость камеры;
 - более низкие амортизационные и эксплуатационные затраты.К недостаткам камер этого типа обычно относят:
 - большую продолжительность и неравномерность сушки пиломатериалов;
 - более низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом.
3. Возможными путями преодоления недостатков камер с естественной циркуляцией является следующее:
 - повышение коэффициента заполнения штабеля пиломатериалом достигается применением, так называемой, ребровой укладки или укладки на ребро в опорно-фиксирующую раму с уклоном. Кроме того, такая конструкция штабеля значительно снижает аэродинамическое сопротивление штабеля, что способствует существенному увеличению скорости циркуляции.
 - снижение продолжительности сушки возможно за счет применения осциллирующих (ступенчатых, перемежающихся, цикловых) режимов сушки пиломатериалов, сущность которых заключается в периодическом нагреве-остывании древесины. В период охлаждения происходит бурное испарение влаги из древесины, причем в начальный период охлаждения интенсивность испарения влаги в 10 раз больше, чем при обычных методах сушки.
 - экстремально низкая неравномерность сушки ($S = 0,2 - 0,3 \%$ при $W_{cp} = 10 \%$) достигается именно в камерах с естественной циркуляцией воздуха путем правильной организации процесса.
4. Аэродинамический анализ процессов в камере с естественной циркуляцией выявил две составляющие теплового напора: статическую и динамическую. Для расчета скорости циркуляции

- получено аналитическое выражение, связывающее все основные параметры камеры и штабеля пиломатериалов.
5. На скорость естественной циркуляции воздуха влияют главным образом две составляющие:
 - тепловая мощность нагревателя;
 - конструкция штабеля.Применение ребровой укладки при достаточной мощности нагревателя позволяет получить скорость циркуляции в пределах 0,8 – 1,0 м/с.
 6. В результате теоретического анализа тепловых процессов (нагрева и охлаждения) в случае применения осциллирующих режимов построена эффективная структура режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки.
 7. Построены математические модели, представляющие собой зависимости качественных показателей сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки от параметров режима.
 8. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получены рациональные значения параметров режима сушки
 - температура охлаждения – 66 °С;
 - амплитуда осциллирования – 11 °С;
 - время открытия шиберов воздушной заслонки – 30 мин.
 9. В производственных условиях подтверждена эффективность разработанной технологии при высоком качестве сушки пиломатериалов.
 10. Внедрение разработанной технологии в производство позволило существенно снизить затраты непосредственно на сушку, эксплуатационные затраты, повысить качество сушки. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения одной камеры с годовой производительностью 970 м³ в условном пиломатериале составляет 137,8 тыс. руб.

Материалы по теме диссертации изложены в следующих работах:

1. Гороховский А.Г. Технология камерной сушки пиломатериалов с уменьшенными энергозатратами / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Деревообрабатывающая промышленность. – М., 2005. № 4.
2. Гороховский А.Г. Оригинальна и очень эффективна: энергосберегающая технология сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, В.П. Агапов, Е.Е. Шишкина, А.А. Гороховский // Лесной Урал. – Екатеринбург, 2005. №5.

3. Гороховский А.Г. Начальный прогрев штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатывающей среды / А.Г. Гороховский, О.А. Удачина, Е.Е. Шишкина // Деревообрабатывающая промышленность. – М., 2005. № 6.
4. Шишкина Е.Е. Сокращение энергозатрат при сушке пиломатериалов / Е.Е. Шишкина, И.П. Гробушкина // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург, 2005.
5. Гороховский А.Г. Скорость начального прогрева штабеля при сушке пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Сб. матер. Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Сибирского государственного технологического университета: «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения». – Красноярск, СибГТУ, 2005.
6. Гороховский А.Г. Энергосбережение в камерной сушке пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Сб. матер. Межвузовской научно-технической конференции факультета Механической технологии древесины. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2005.

Подписано в печать 15.11.2006 г. 1,0 п.л. Заказ № 283. Тираж 100 экз.
620100, г.Екатеринбург, ул. Сибирский Тракт, 37
Уральский государственный лесотехнический университет
Отдел оперативной полиграфии