

*Мялицин*

Мялицин Алексей Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В  
КАМЕРАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

05.21.05 – Древесиноведение, технология и оборудование  
деревопереработки

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

Екатеринбург 2010

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

Научный руководитель доктор технических наук, доцент  
Гороховский Александр Григорьевич

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор  
Комиссаров Анатолий Петрович

кандидат технических наук  
Брусин Наум Абрамович

Ведущая организация ООО «ПКТБ Леспром»  
(г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится « 2 » декабря 2010 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт 37, зал заседаний – аудитория 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет».

Автореферат разослан « 1 » ноября 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Кузубина Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перед отечественной экономикой стоит грандиозная по своей сути задача: удвоение ВВП за 10 лет. Однако при существующем уровне технологий это потребует двукратного увеличения производства энергии в России, что принципиально невозможно. В этой связи технологии переработки сырья в продукцию должны базироваться на минимально энергоемких процессах.

Однако, создание низкоэнергоемких процессов невозможно без научного обоснования технологий деревообработки, в первую очередь сушки пиломатериалов как важнейшей операции облагораживания древесины. Особо это относится к сушке товарных пиломатериалов до транспортной влажности, т.к. наибольшее количество пиломатериалов подвергается именно такому виду сушки в камерах непрерывного действия. В этой связи разработка энергосберегающей технологии сушки пиломатериалов в камерах непрерывного действия на основе научно обоснованных решений является актуальной научно-технической проблемой.

Цель работы: повышение качества пиломатериалов и снижение энергоемкости процесса сушки в камерах непрерывного действия туннельного типа.

Объектом исследования являются процессы конвективной сушки древесины, опытно-промышленные образцы лесосушильных камер непрерывного действия туннельного типа.

Предметом исследования являются структура и параметры режимов конвективной сушки пиломатериалов.

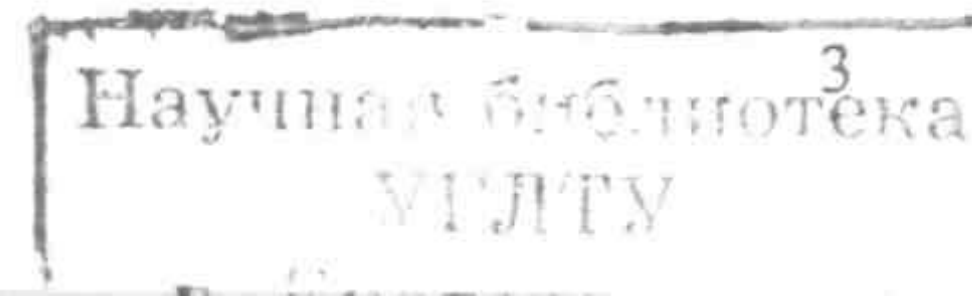
Научной новизной обладают

1. Математические модели распределения величин параметров режима сушки по длине камеры туннельного типа;
2. Математические модели, позволяющие связать ожидаемое значение показателей качества сушки с параметрами режима сушки;
3. Рациональные значения параметров низкотемпературного режима сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Характер распределения влагосодержания агента сушки по длине камеры туннельного типа определяется:
  - начальным и конечным влагосодержанием воздуха и древесины;
  - распределением величины влажности пиломатериалов по длине камеры;
  - распределением величины скорости циркуляции агента сушки по длине камеры.
2. Эффективными управляющими факторами при оптимизации режима сушки пиломатериалов в камере туннельного типа являются температура по сухому термометру и психрометрическая разность.
3. Низкотемпературные режимы сушки в камерах туннельного типа позволяют снизить расход тепловой и электрической энергии на сушку 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов до транспортной влажности.

Достоверность сформулированных в диссертации предложений и выводов



подтверждается хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Выводы 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 описанные явления, а их адекватность подтверждается в соответствии с общепринятыми методиками.

Внедрение разработанной технологии сушки в производство подтвердило ее высокую эффективность.

Практическая значимость работы. Разработаны низкотемпературные режимы сушки пиломатериалов до транспортной влажности в камерах непрерывного действия туннельного типа.

Применение в промышленности указанных режимов позволит:

- существенно снизить затраты тепловой и электрической энергии на процессе сушки.
- повысить качество сушки и гарантировать с высокой вероятностью значение его показателей не ниже нормативных.

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 методов 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 распределения величин параметров режима сушки по длине камеры туннельного типа;
- определена рациональная структура низкотемпературного режима сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа;
- определены рациональные значения параметров низкотемпературного режима сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа.

Место проведения. Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете на кафедре древесиноведения и специальной обработки древесины.

Апробация работы. Основные результаты и теоретические положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и научно-практических конференциях с международным участием: «молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (2007 г.) – СибГТУ, г. Красноярск; II международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (2007 г.) – УГЛТУ, г. Екатеринбург; «IV

всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов» (2008 г.) – УГЛТУ, г. Екатеринбург; IV международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (2009 г.) – УЛТУ, г. Екатеринбург; «молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (2009 г.) – СибГТУ, г. Красноярск; V международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (2010 г.) – УГЛТУ, г. Екатеринбург.

Реализация работы. Основные результаты работы внедрены в Кыновском и Кормовищенском леспромпхозах Пермского края.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и 3 научных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов и рекомендаций, приложений, библиографического списка, включающего 102 наименования. Общий объем работы 138 страниц, 33 рисунка, 32 таблицы, 11 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 затрат тепловой энергии на камерную сушку пиломатериалов можно выделить следующие составляющие: испарение влаги из древесины; нагрев древесины и воды в древесине; потери через ограждения; потери с отработанным сушильным агентом.
3. Ощутимое снижение энергозатрат возможно по следующим составляющим:
  - затраты на нагрев наружного воздуха за счет воздухообмена между камерой и окружающей атмосферой;
  - затраты электроэнергии на привод вентиляторов.
4. Снижение затрат электроэнергии на привод вентиляторов возможно за счет:
  - совершенствования аэродинамики камер и повышения коэффициента использования воздушного потока (в 1,5 – 2,0 раза);
  - управление объемом циркулирующего воздуха за счет применения регулируемых приводов (на 20 – 40 %);
  - автоматизации производственных процессов сушки (примерно на 6 %);
  - снижение скорости воздуха в сушильных камерах.
5. Снижение затрат тепловой энергии на сушку пиломатериалов в камерах непрерывного действия возможно по следующим направлениям:
  - автоматизация производственных процессов (15 – 30 %);
  - низкотемпературная сушка;
  - улучшение аэродинамики камеры;

- оптимизация структуры и величин параметров режимов сушки;
  - предварительная сортировка пиломатериалов по начальной влажности.
6. К недостаткам камер непрерывного действия обычно относят:
- Неравномерное высушивание материала по объему штабеля;
  - Относительно большая продолжительность процесса сушки.
7. В камерах с нереверсивной циркуляцией общая протяженность штабелей по пути потока воздуха составляет 20 – 25 м, а в камерах с реверсивной противоточной циркуляцией эта величина может быть снижена до 10 – 12 м.
8. Вопросы применения низкотемпературных режимов для камер непрерывного действия требуют дополнительных исследований.

По результатам анализа литературных источников были определены следующие задачи исследования:

1. Теоретически и экспериментально исследовать процессы тепло- и массопереноса при сушке пиломатериалов в камерах непрерывного действия;
2. Разработать и исследовать структуру и расписание режимов энергосберегающей сушки пиломатериалов в камерах непрерывного действия туннельного типа;
3. Провести промышленную проверку разработанных режимов;
4. Определить экономическую эффективность разработанных режимов сушки пиломатериалов в камерах непрерывного действия туннельного типа.

Целью второго раздела «Анализ процессов тепломассопереноса при сушке пиломатериалов в камерах туннельного типа» является разработка пригодного для инженерных расчетов математического описания распределения влагосодержания сушильного агента по длине камеры непрерывного действия.

Влагопроводящие элементы в древесине при движении влаги в ней поперек волокон можно рассматривать состоящим из следующих систем:

- система микрокапилляров, заполненных воздухом. Влага по этой системе движется в виде пара, проходя последовательно через полости клеток, полости пор и отверстия в мембранах или мельчайшие микрокапилляры в клеточных стенках.
- комбинированная система, состоящая из полостей клеток и прерывистых микрокапилляров, соединяющих полости смежных клеток. При этом влага движется как в виде жидкости (микрокапилляры), так и в виде пара (полости клеток), последовательно переходя из одного состояния в другое.

Скорость теплового скольжения в первом приближении прямопропорциональна градиенту температуры вдоль стенки полости клетки:

$$V_c = K_c \frac{dt}{dx}, \quad (1)$$

где  $K_c$  – коэффициент теплового скольжения.

$$K_c = \frac{3}{2} \frac{l}{M} \frac{R}{V_{пл}} = \frac{3}{2} \frac{D}{T}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина свободного пробега молекулы пара при данной температуре;

$V_{пл}$  – средняя скорость движения молекулы;

$D$  – коэффициент диффузии пара;

$T$  – абсолютная температура,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$M$  – масса молекулы.

Перенос пара в микрокапиллярах в комбинированной системе влагопроводящих элементов описывается законом диффузии (т. к.  $g/l \ll 1$ ) с поправкой на конвективный Стефановский поток, с учетом движения, обусловленного тепловым скольжением. Движение влаги по микрокапиллярам этой влагопроводящей системы по направлению потока тепла вызывается зависимостью капиллярного потенциала от температуры, т. к. коэффициент поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) снижается с понижением температуры.

Известны работы Доннера Г. А., Ефимова П. В., Потапова В. И., Севастьянова В. Н. и др. по анализу процессов тепло- и массообмена в камерах непрерывного действия. При разработке ими теории принимались следующие допущения:

- материал, уложенный на тележки, однороден по структуре;
- перемещение материала происходит непрерывно;
- теплоемкость материала, воздуха, влаги и коэффициент теплоотдачи от воздуха к материалу постоянны по длине и высоте камеры, а также во времени. Кроме того, они не зависят от температуры.

Была получена следующая система уравнений, описывающих процесс тепло- и массообмена в туннельной сушилке:

$$\begin{aligned} \gamma_B \left( -g_x \frac{\partial D}{\partial x} + g_y \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial \tau} \right) &= \gamma_M \left( v \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial \tau} \right) \\ -c_B \left( -g_x \frac{\partial t_B}{\partial x} + g_y \frac{\partial t_B}{\partial y} + \frac{\partial t_B}{\partial \tau} \right) &= \alpha F (t_B - t_M); \\ r' \gamma_M \left( v \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial \tau} \right) &= -\alpha F (t_B - t_M); \quad t_M = f(t_B, D) \end{aligned} \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями:

$$W(0, x, y) = W^0(x, y); \quad t_B(0, x, y) = t_{B0}(x, y);$$

$$D(0, x, y) = D^0(x, y); \quad W(\tau, 0, y) = W^0(\tau, y);$$

$$t_B(\tau, x, 0) = t_{B0}(\tau, x); \quad D(\tau, 1, 0) = D_1(\tau);$$

где  $0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$

Решение системы (3) в операторном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} W(p, x) &= W_0(p) \exp\left(-\frac{px}{v}\right) \eta_1(x) + \\ &+ \exp\left(-\frac{px}{v}\right) \eta_1(x) \int_0^x \exp\left(-\frac{p\xi}{v}\right) \eta_2(\xi) t(p, \xi) d\xi, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \eta_1 = \exp\left(\frac{1}{v} \int_0^x \varphi_2(\xi) d\xi\right); \quad \eta_2 = \frac{1}{v} \varphi_1 \exp\left(\frac{1}{v} \int_0^x \varphi_2(\xi) d\xi\right)$$

Первое слагаемое в уравнении (4) показывает влияние возмущения по начальной влажности материала на влажность материала в любом сечении по длине сушилки, а второе слагаемое учитывает влияние распределенного по длине возмущения параметров сушильного агента на влажность материала в сушилке.

В уравнениях (3) – (4) приняты следующие обозначения:

$x, y, z$  – координаты соответственно по длине, высоте и ширине сушильной камеры, м;

$g(x), g(y)$  – расход воздуха, соответственно, по оси  $x$  и  $y$ , м<sup>3</sup>/ч;

$F$  – площадь поверхности высушиваемого материала, приходящаяся на единицу объема сушильного пространства, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость перемещения материала по оси  $x$ , м/ч;

$\gamma_v, \gamma_m$  – плотность, соответственно, воздуха и материала, кг/м<sup>3</sup>;

$t_v, t_m, t_m$  – температура воздуха, поверхности материала и мокрого термометра, °С;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$W$  – влажность материала, кг/кг;

$c_v, c_m$  – теплоемкость воздуха и материала, Дж/кг°С;

$D$  – влагосодержание воздуха, кг/кг.

Таким образом, полученное решение (4) описывает искомые распределения по длине камеры, однако, его практическое применение представляется весьма затруднительным по следующим причинам:

- выражение (4) для практического применения необходимо привести из операторной формы в нормальную, а для этого надо знать параметры  $\eta_1, \eta_2, \varphi_1, \varphi_2$ ;

- определение указанных параметров эмпирическим путем также не представляется возможным т.к. мы не знаем их физический смысл, а упомянутые авторы теории никак это не комментируют.

Поэтому очевидна необходимость построения достаточно простой математической модели камеры непрерывного действия, пригодной для инженерных расчетов. Выделим в камере сечением  $x_1, x_2$  участок и в рассматриваемом объеме штабеля пиломатериала определим количество содержащейся влаги в момент времени  $\tau_1$  и в момент времени  $\tau_2$  на том же участке

$$m = \int_{x_1}^{x_2} u(\tau_1; x) S dx, \quad m' = \int_{x_1}^{x_2} u(\tau_2; x) S dx, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь пиломатериала в рассматриваемом сечении штабеля.

За промежуток времени  $\tau_1, \tau_2$  через сечение  $x_1$  проходит количество влаги  $m_1$ :

$$m_1 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} u(\tau_1; x_1) S v d\tau; \quad (6)$$

Через сечение  $x_2$  за тот же промежуток времени выходит количество влаги:

$$m_2 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} u(\tau_1; x_2) S v d\tau \quad (7)$$

Зная влагосодержание (исходное и конечное) на любом участке камеры, можно определить интенсивность испарения влаги из древесины на каждом участке за промежуток времени  $\Delta\tau$

$$j(\tau; x) = \frac{u_H(\tau_1; x) - u_K(\tau_1 + \Delta\tau; x)}{u_H(\tau_1; x) \Delta\tau} \quad (8)$$

Количество испарившейся влаги на участке  $x_1, x_2$  за промежуток времени  $\tau_1, \tau_2$

$$m_3 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_{x_1}^{x_2} u(\tau; x) S dx \cdot j(\tau; x) d\tau \quad (9)$$

Эта величина зависит от имеющегося количества влаги в рассматриваемом объеме и от параметров сушильного агента.

После соответствующих преобразований получена математическая модель по каналу влагосодержания сушильного агента в объекте, решение которой в любой в любой момент времени при  $u(\tau; 0) = u_0; d(\tau; l) = d_0; u(\tau_2; l) = u_k, v \approx 0$  имеет вид

$$d(x) = d_k + (d_0 - d_k) \frac{u_0 \exp\left\{-\int_0^x \frac{dx}{\omega(x)}\right\}}{u(x)}, \text{ кг/кг} \quad (10)$$

Таким образом, характер распределения влагосодержания агента сушки по длине камеры определяется:

- начальным и конечным влагосодержанием воздуха и древесины;
- распределением величины влажности пиломатериалов по длине камеры;
- распределением величины скорости циркуляции агента сушки по длине камеры.

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

Экспериментальная часть данной работы выполнена на лесосушильной камере СКТБ-Т-1-54. Данная камера является промышленной камерой непрерывного действия с продольной закаткой штабелей и зигзагообразной схемой циркуляции сушильного агента, которая имеет объем разовой загрузки 54 м<sup>3</sup> (в условном пиломатериале) и позволяет сушить пиломатериалы длиной 4 или 6 м. Схема устройства камеры приведена на рис. 1.

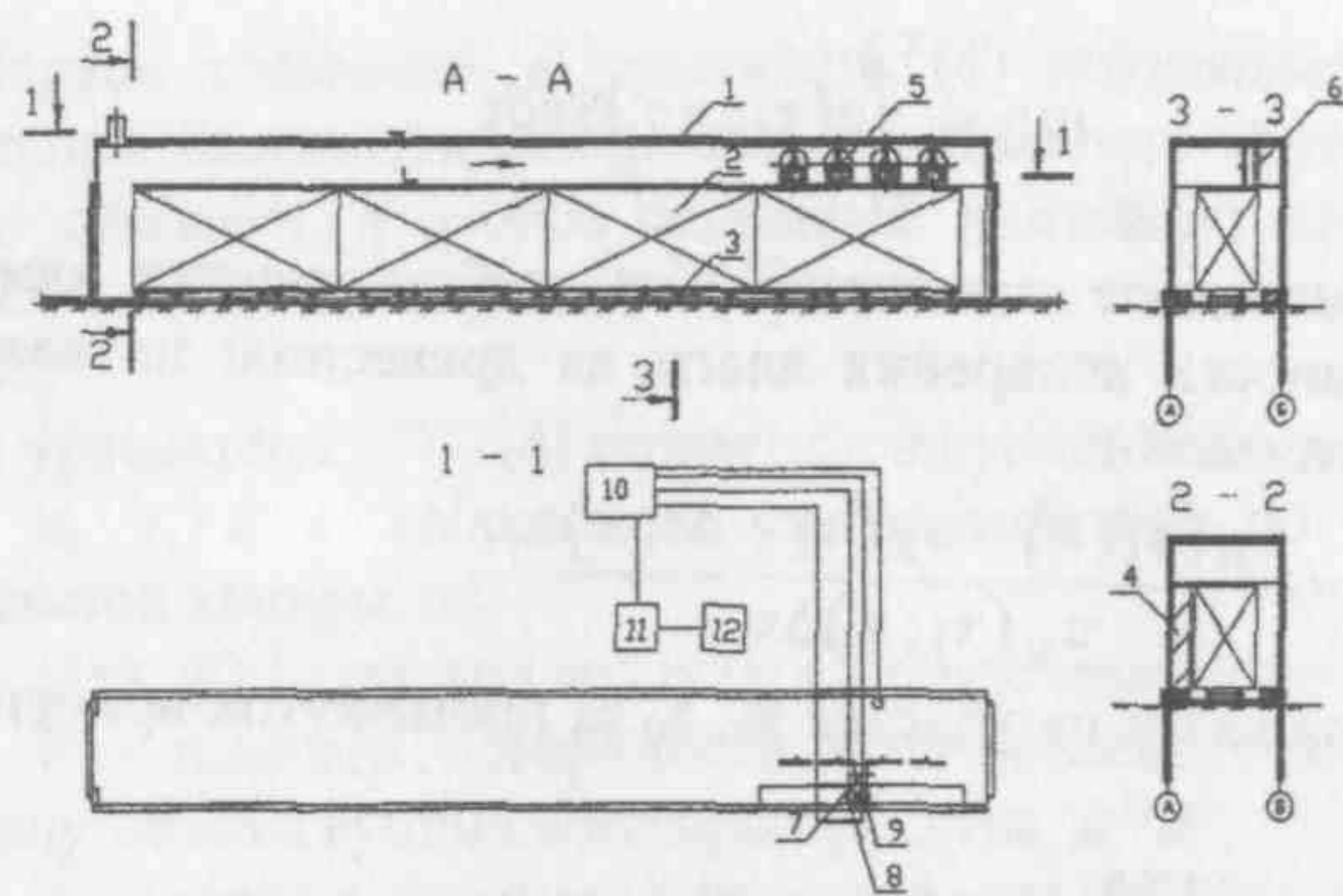


Рис. 1. Схема устройства экспериментальной лесосушильной камеры

В четвертом разделе «Экспериментальные исследования процесса сушки пиломатериалов в конвективных камерах непрерывного действия туннельного типа» приводятся результаты исследований процесса сушки пиломатериалов в камере СКТБ-Т-1-54. Постоянные факторы при проведении эксперимента, а также их значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение постоянных факторов при проведении эксперимента

№	Наименование фактора	Значение фактора
1	Порода древесины	ель
2	Размеры пиломатериалов, мм	40x150x6000
3	Вид пиломатериалов	обрезные
4	Количество штабелей в камере	4
5	Начальная влажность древесины	60-70%
6	Конечная влажность древесины	18%

Переменные факторы при проведении эксперимента, их значения в явном и кодированном виде, а также диапазоны варьирования приведены в табл. 2. В качестве основного эксперимента был реализован двухфакторный план типа  $B_2$ , включающий 9 опытов.

Таблица 2

Переменные факторы при проведении эксперимента

№ п/п	Наименование фактора	Обозначение	Единица измерения	Кодированное обозначение	Значение факторов при уровнях варьирования					
					Нижний уровень		Основной уровень		Верхний уровень	
					Н	К	Н	К	Н	К
1	Температура сухого термометра	$t_0$	$^{\circ}C$	$x_1$	48	-	50	0	52	+
2	Психрометрическая разность	$\Delta t$	$^{\circ}C$	$x_2$	6	-	9	0	12	+

Примечание: К – кодированное значение; Н – натуральное значение.

В результате реализации эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

- по продолжительности сушки пиломатериалов:

• кодированный вид

$$\hat{Y}_1 = 109,56 - 6,67x_1 - 5x_2 - 1,33x_1^2 + 15,67x_2^2 + 4x_1x_2 \quad (11)$$

• натуральный вид:

$$\tau_{\text{суш}} = 0,67t\Delta t - 0,33t^2 + 24t + 1,74\Delta t^2 - 66,33\Delta t - 101,11 \quad (12)$$

- по среднеквадратическому отклонению влажности

• кодированный вид

$$\hat{Y}_2 = 1,637 + 0,2x_1 + 0,011x_2 + 0,511x_1^2 + 0,144x_2^2 - 0,042x_1x_2 \quad (13)$$

• натуральный вид

$$S = 314,22 + 0,06\Delta t + 0,02\Delta t^2 - 12,62t + 0,13t^2 - 0,01t\Delta t \quad (14)$$

где  $x_1, t_0$  – температура сухого термометра,  $^{\circ}C$ ;

$x_2, \Delta t$  – психрометрическая разность,  $^{\circ}C$ .

Решая компромиссную задачу методом условного центра масс, получим в натуральном выражении рациональные значения параметров режима:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 49,6 \\ x_2 &= 8,7 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

При этом значения выходных параметров процесса сушки составляют:

$$T_{\text{суш}} = 111 \text{ час}; S = 1,6 \% \quad (16)$$

На рис. 2, 3 приведены зависимости выходных параметров процесса сушки пиломатериалов в камере СКТБ-Т-1-54. На всех графиках прослеживается наличие четко выраженного минимума поверхностей отклика.

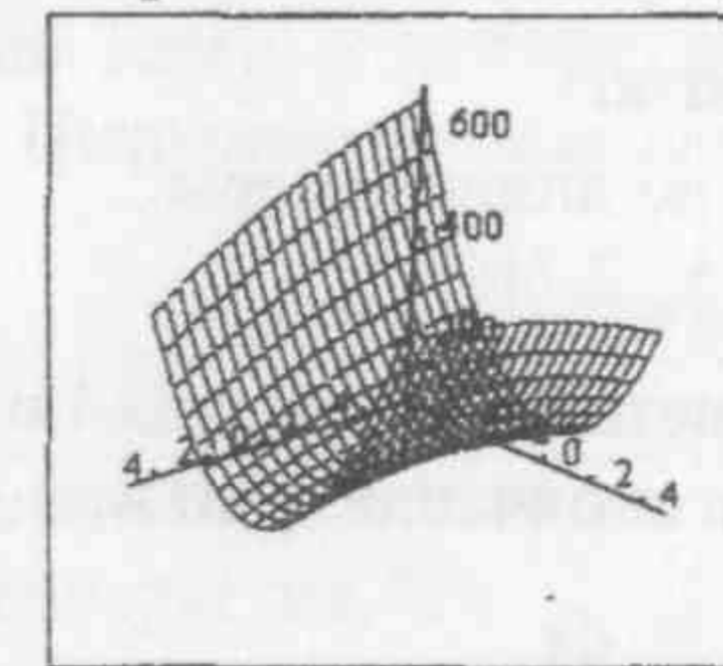


Рис. 2. Зависимость продолжительности сушки пиломатериала от температуры сухого термометра и психрометрической разности

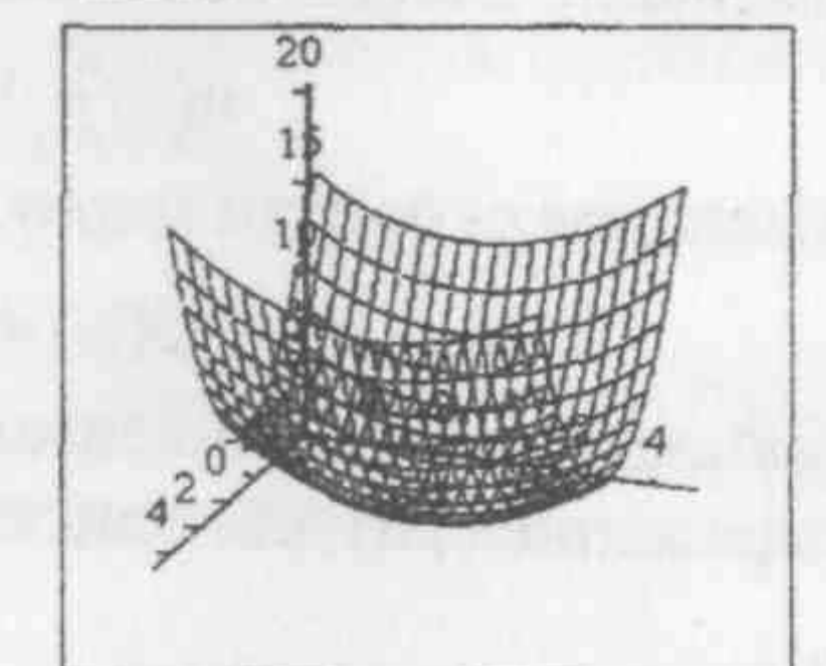


Рис. 3. Зависимость среднеквадратического отклонения влажности пиломатериалов от температуры сухого термометра и психрометрической разности

Проведенный анализ результатов 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 оптимальных значений параметров режимов сушки позволяет получить вполне приемлемые значения продолжительности процесса сушки пиломатериалов, а также неравномерности конечной влажности. Полученное значение времени сушки всего на 30 % больше теоретически возможного и нормативного. Неравномерность влажности высушенных пиломатериалов соответствует требованиям 0 категории качества. Кроме того, данные режимы позволяют полностью избежать таких дефектов сушки, как трещины, выплавление смолы, выпадения сучков.

Целью дальнейших исследований было промышленное испытание разработанной технологии сушки пиломатериалов разработанными режимами. Анализ результатов проведенных производственных испытаний позволяет сделать следующие выводы:

1. Проведенные опытные сушки полностью подтвердили эффективность предложенных режимов сушки пиломатериалов.
2. В исследованном диапазоне изменения управляющих факторов (температура сухого термометра и степень насыщенности среды) качество сушки пиломатериалов высокое, полностью соответствующее 0 категории качества.
3. Гарантированное качество сушки достигается при весьма жестком соблюдении допуска на конечную влажность. Вероятность соблюдения этого допуска составляет 90 – 97 %.

В период с 2007 года по 2008 год на ООО “Эверлес” и Кыновской ЛПХ были проведены 7 опытных сушек в камерах СКТБ-Т-1-54.

На основе данных специального эксперимента нами были получены следующие выражения:

- изменение влажности пиломатериалов по длине камеры:

$$u(x) = 0,12 + 0,48e^{-0,125x}, \text{ кг/кг} \quad (17)$$

- изменение скорости циркуляции агента сушки по длине камеры:

$$\omega(x) = 0,3753 + 6,7343 \cdot 10^{-5} x^{2,7445}, \text{ м/с} \quad (18)$$

Указанные выше зависимости приведены соответственно на рис. 4 и рис. 5. Выражение (10) для описанного выше момента окончания сушки:

$$d(x) = d_k + (d_0 - d_k) \frac{\int_0^x \frac{dx}{0,3753 + 6,7343 \cdot 10^{-5} x^{2,7445}}}{0,12 + 0,48e^{-0,125x}} \quad (19)$$

С учетом данных ранее произведенных расчетов по обработке экспериментальных данных распределение влагосодержания по длине камеры имеет вид:

$$d(x)_{\text{эксп}} = 0,047 - 2,0833 \cdot 10^{-4} x \quad (20)$$

При этом  $d_0 = 0,042 \text{ кг/кг}$ ;  $d_k = 0,047 \text{ кг/кг}$ .

Распределение влагосодержания агента сушки по длине камеры изображено на рис. 6.

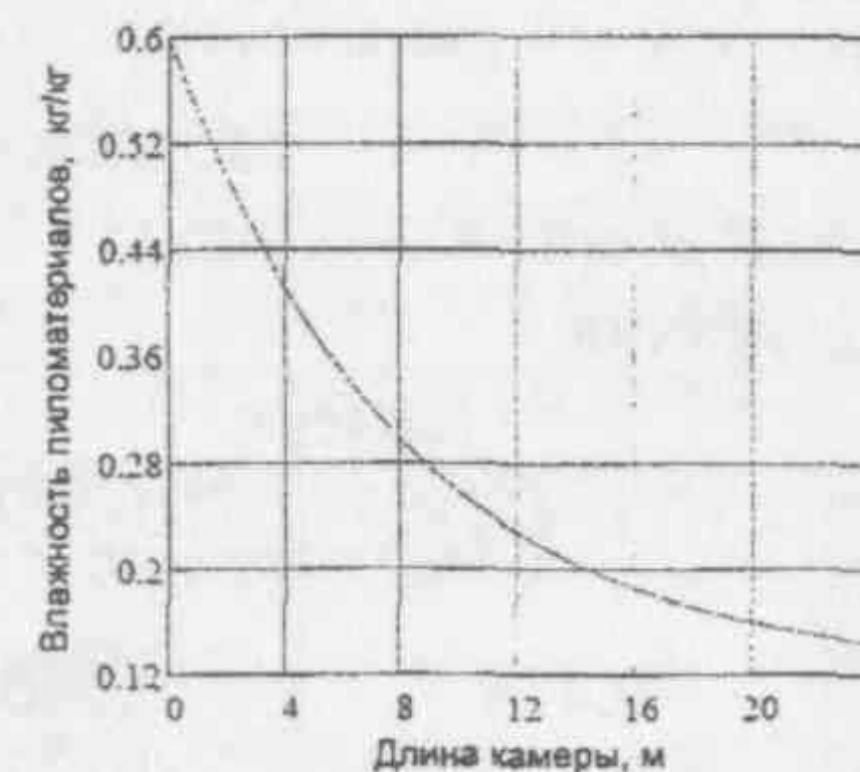


Рис. 4. Распределение влажности пиломатериалов по длине камеры непрерывного действия

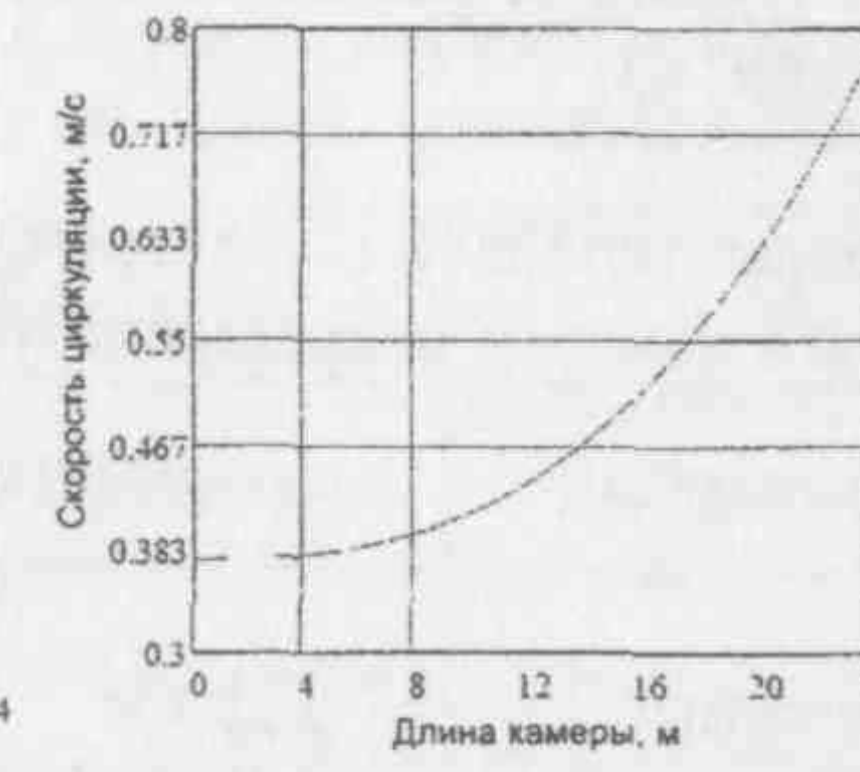


Рис. 5. Распределение скорости циркуляции по длине камеры непрерывного действия

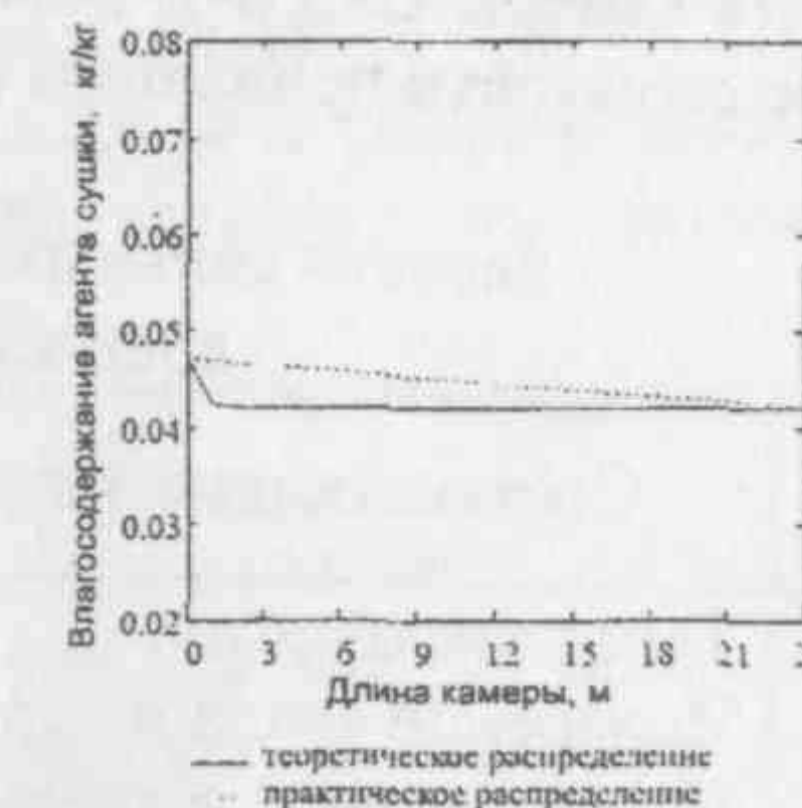


Рис. 6. Распределение влагосодержания агента сушки по длине камеры непрерывного действия

Таким образом, сопоставление данных эксперимента с результатами теоретических расчетов показывает их достаточно близкое совпадение.

Несущественные расхождения результатов при этом может быть объяснено некоторыми допущениями при разработке формализованного описания камеры. В первую очередь, это принятие допущения о постоянном движении высушиваемого материала.

В пятом разделе «Технико-экономическое обоснование эффективности режимов сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа» приведен сравнительный анализ затрат энергии на сушку пиломатериалов в зимний период для камер СКТБ-Т-1-54 и СП-5КМ. По известным методикам отдельно рассчитывался расход тепловой энергии на начальный прогрев пиломатериалов, испарение влаги и потери через ограждения, а также расход электрической энергии. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета затрат энергии на сушку

№	Наименование показателя	СКТБ-Т-1-54	СП-5КМ
1.	Режим сушки	экспериментальный	РТМ
2.	Температура, °С:		
	по сухому термометру	50	53
	по мокрому термометру	41	43
3.	Относительная влажность воздуха в сыром конце камеры, %	0,82	0,82
4.	Продолжительность сушки, час	111,29	98,23

В качестве расчетного пиломатериала взяты еловые доски толщиной 40 мм, шириной 150 мм с начальной влажностью 60 и конечной 18%. Параметры сушильного агента принимались в соответствии с режимом сушки пиломатериалов мягких хвойных пород в противоточных камерах непрерывного

действия по ГОСТ 18867 – 84 для камеры СП-5КМ и с разработанным режимом для камеры СКТБ-Т-1-54. Результаты расчета затрат энергии на сушку, а также ее стоимости приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет удельных затрат тепловой и электрической энергии на сушку древесины в камерах непрерывного действия

№	Составляющие затрат энергии	Размерность	Камера	
			СКТБ-Т-1-54	СП-5КМ
	Тепловая энергия:			
1.	Испарение влаги из древесины	ГДж/м <sup>3</sup>	0,454	0,566
2.	Нагрев камеры и древесины	ГДж/м <sup>3</sup>	0,129	0,127
3.	Потери через ограждения камеры	ГДж/м <sup>3</sup>	0,06	0,02
4.	Всего тепловой энергии	ГДж/м <sup>3</sup>	0,643	0,713
	Стоимость тепловой энергии	руб/ м <sup>3</sup>	257,2	285,2
	Электрическая энергия:			
5.	Привод вентилятора	кВт · час/м <sup>3</sup>	15,27	33,32
	Стоимость электрической энергии	руб/ м <sup>3</sup>	45,81	99,96
	Суммарная стоимость энергии	руб/ м <sup>3</sup>	303,01	385,16

Анализ результатов расчета позволяет заключить, что сушка пиломатериалов в камере СКТБ-Т-1-54 разработанными режимами позволяет:

- Существенно снизить затраты тепла на испарение влаги из древесины (почти на 20 %)
- Радикально уменьшить удельные затраты электроэнергии на привод вентиляторов (почти в 2,2 раза)
- Общая стоимость энергии, затраченной на сушку 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов, на 21,3 % меньше, чем в камере СП-5КМ.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При существующем уровне технологий затраты электроэнергии на камерную сушку пиломатериалов в 1,5 – 2 раза превышают таковые на их выпилку.
2. Ощутимое снижение энергозатрат возможно по следующим направлениям:
  - затраты на нагрев наружного воздуха за счет воздухообмена между камерой и окружающей средой;
  - затраты электроэнергии на привод вентиляторов.
3. Снижение затрат электроэнергии на привод вентиляторов возможно за счет:
  - совершенствование аэродинамики камер и повышения коэффициента использования воздушного потока;
  - управление объемом циркулирующего воздуха за счет применения регулируемых приводов;
  - автоматизация производственных процессов сушки;
  - снижение скорости циркуляции агента сушки.
4. Снижение затрат тепловой энергии в камерах непрерывного действия возможно по следующим направлениям:
  - автоматизация производственных процессов;

- низкотемпературная сушка;
  - улучшение аэродинамики камер;
  - оптимизация структуры и величин параметров режимов сушки.
5. В камерах непрерывного действия туннельного типа процесс теплообмена (ТМО) проходит в существенно неизотермических условиях, что значительно осложняет его математическое описание и анализ.
  6. При движении влаги в древесине поперек волокон ее влагопроводящие элементы можно рассматривать состоящими из следующих систем:
    - система микрокапилляров, заполненных воздухом. Влага по этой системе движется в виде пара, проходя последовательно через полости клеток, полости пор и отверстия в мембранах или мельчайшие микрокапилляры в клеточных стенках.
    - комбинированная система, состоящая из полостей клеток и прерывистых микрокапилляров, соединяющих полости смежных клеток. При этом влага движется как в виде жидкости (микрокапилляры), так и в виде пара (полости клеток), последовательно переходя из одного состояния в другое.
  7. При неизотермических условиях, как впрочем и при изотермических, суммарный количественный эффект создаваемый влагопроводящими системами оценивается коэффициентом влагопроводности. Однако, при этом относительная эффективность указанных влагопроводящих систем существенно зависит от породы, температуры и влажности древесины.
  8. Перенос пара в микрокапиллярах в комбинированной системе влагопроводящих элементов описывается законом диффузии с поправкой на конвективный Стефановский поток, с учетом движения, обусловленного тепловым скольжением.
  9. Характер распределения влагосодержания агента сушки по длине камеры определяется:
    - начальным и конечным влагосодержанием воздуха и древесины;
    - распределением величины влажности пиломатериалов по длине камеры;
    - распределением величины скорости циркуляции агента сушки по длине камеры.
  10. В результате теоретических и экспериментальных исследований построена эффективная структура режима сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа.
  11. Построены математические модели, представляющие собой зависимости продолжительности сушки и среднеквадратического отклонения влажности пиломатериалов от параметров режима. В качестве управляющих факторов при оптимизации режимов сушки были взяты:
    - температура сухого термометра;
    - психрометрическая разность.
  12. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получены рациональные значения параметров режима сушки пиломатериалов в камерах непрерывного действия туннельного типа.
  13. Проведение опытных сушек пиломатериалов подтвердили эффективность разработанной технологии при высоком качестве сушки пиломатериалов.



14. Внедрение разработанной технологии в производство позволило существенно снизить затраты непосредственно на сушку, а также повысить ее качество. При этом снижаются затраты тепловой энергии на испарение влаги из древесины (на 19,8 %), а также электрической энергии на привод вентиляторов (в 2,18 раза). Суммарная стоимость энергии на сушку 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов до транспортной влажности снижается на 21,3 %. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии для камер СКТБ-Т-1-54 с годовой производительностью 5000 м<sup>3</sup> в условном пиломатериале составляет около 410 тыс. руб.

#### Основные положения диссертации опубликованы в работах.

1. Гороховский А. Г. Энергосбережение при сушке пиломатериалов в камерах непрерывного действия [Текст] / А. Г. Гороховский, А. А. Гороховский, Мялицин А. В. // Деревообрабатывающая промышленность. – М., 2010. № 2. – С. 21 – 23.
2. Мялицин А. В. Математическое описание процесса сушки пиломатериалов в камерах туннельного типа [Текст] // Современные проблемы науки и образования. – 2010. – № 3 [www.science-education.ru/91](http://www.science-education.ru/91) (май-июнь 2010). – С. 90 – 97.
3. Гороховский А. Г. Сушка экспортных пиломатериалов в проходных камерах туннельного типа [Текст] / А. Г. Гороховский, А. В. Мялицин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды II международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург, 2007. – С. 82 – 85.
4. Мялицин А. В. Испытание камер непрерывного действия для сушки пиломатериалов до транспортной влажности [Текст] / А. В. Мялицин, А. Г. Гороховский // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург, 2008. – С. 107 – 110.
5. Гороховский А. Г. Снижение затрат энергии при сушке пиломатериалов в камерах непрерывного действия туннельного типа [Текст] / А. Г. Гороховский, А. В. Мялицин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды V международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург, 2010. – С. 59 – 62.

1670-10

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, Ученому секретарю диссертационного совета Куцубиной Н. В. Факс: (343) 254-62-25. E-mail: [bsovet@usfeu.ru](mailto:bsovet@usfeu.ru).



Подписано в печать 25.10.2010 г. 1,0 п.л. заказ №395. Тираж 100 экз.

620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Уральский Государственный лесотехнический университет

Отдел оперативной полиграфии