

АГАФОНОВ Артем Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ  
ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД**

4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и  
переработки древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ)

Научный руководитель: **Гороховский Александр Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий

Официальные оппоненты: **Зарипов Шакур Гаянович**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», профессор кафедры технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств

**Лукаш Александр Андреевич**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», профессор кафедры лесного дела и технологии деревообработки

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова» (ФГАОУ ВО САФУ)

Защита состоится **«04» июля 2024 г. в 10.00** на заседании диссертационного совета 24.2.424.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» ([www.usfeu.ru](http://www.usfeu.ru)).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Задача повышения эффективности производства и качества продукции, а также расширение ее номенклатуры поставлены в таком основополагающем документе, как, например, «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 г. № 312 – р). Решение поставленных задач, безусловно, стимулирует поиск новых технологий в деревообработке.

В последние годы несколько повышается интерес деревообрабатывающей промышленности к широкому использованию древесины лиственных пород. С одной стороны, это связано со значительным истощением доступных запасов хвойной древесины, с другой – постоянно увеличивающиеся запасы (вследствие недостаточного использования) лиственной, среди которой наиболее значительными запасами в России обладает береза. Лесопокрытая данной породой площадь составляет 88 млн. га или 11 % от общего количества. Однако широкое использование древесины березы в промышленности сдерживается её сравнительно низкой товарностью, а также рядом проблем в технологии её переработки. Одной из таких проблем является проведение эффективной и качественной сушки березовых пиломатериалов. При своей большой распространенности береза является, так называемой, «трудносохнущей» породой, отличающейся высокой продолжительностью сушки, а также достаточно большой по величине усушкой, что может приводить к изменению формы пиломатериалов или даже разрушению в процессе сушки.

В связи с этим разработка эффективной технологии сушки древесины березы является актуальной задачей, имеющей большое практическое и научное значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями процессов сушки древесины в разное время занимались такие ученые как Соколов П.В., Кречетов И.В., Лыков А.В., Серговский П.С., Глухих В.Н., Акишенков С.И., Богданов Е.С., Шубин Г.С., Скуратов Н.В., Уголев Б.Н., Кротов Л.Н., Платонов А.Д., Сафин Р.Р., Сергеев В.В., Мелехов В.И., Комиссаров А.П., Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Зарипов Ш.Г. и другие.

Применительно к древесине лиственных пород весь объем исследований позволил сформулировать:

- требования к ходу процесса сушки и его результатам;
- требования к структуре и величине параметров режима сушки;
- возможности и основные направления совершенствования режимов сушки, среди которых наиболее перспективным направлением является применение бесступенчатых режимов.

**Цель работы.** Повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов лиственных пород.

**Объект исследования.** Технологические режимы сушки пиломатериалов.

**Предмет исследования.** Пиломатериалы лиственных пород.

**Методы исследования.** Системный анализ, математическое моделирование, вычислительный эксперимент, промышленный эксперимент, математическая статистика.

**Задачи исследования:**

1. Провести теоретические исследования возможности совмещенного прогрева-сушки древесины березы.
2. Провести аналитические исследования (вычислительный эксперимент) по сушке древесины березы бесступенчатыми режимами
3. Провести экспериментальную проверку технологии сушки пиломатериалов из древесины березы бесступенчатыми режимами
4. Определить экономическую эффективность бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов.
5. Провести метрологическую оценку метода интегральной оценки влажности штабеля при сушке древесины березы.

**Научная новизна работы.**

Результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной:

1. Метод экспресс-оценки эффективности режимов сушки древесины различных пород, отличающийся использованием величины перепада влажности по толщине высушиваемого пиломатериала.
2. Впервые получены результаты вычислительного эксперимента при аналитическом изучении процесса сушки древесины березы бесступенчатыми режимами.
3. Впервые разработаны рекомендации по практическому применению бесступенчатых режимов сушки древесины березы.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Положения методики оценки режимов сушки по величине перепада влажности древесины по толщине высушиваемых пиломатериалов.
2. Математические модели состояния высушенного материала и процесса сушки древесины березы бесступенчатыми режимами.
3. Положения методики оценки возможности применения совмещенной сушки-прогрева для древесины лиственных пород, в частности березы.
4. Метрологические характеристики метода интегральной оценки влажности древесины штабеля пиломатериалов при сушке древесины березы.

**Теоретическая значимость работы** заключается в аналитическом подтверждении возможности эффективной сушки древесины березы бесступенчатыми режимами.

**Практическая значимость работы** состоит в совершенствовании технологии сушки пиломатериалов из древесины березы, позволяющей получать качественно высушенную древесину при сокращении затрат на процесс сушки.

Результаты работы позволяют повысить качество сушки, снизить количество брака, а также, повысить энергоэффективность процесса сушки.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Основные результаты работы относятся к пункту 4 – «Технология и продукция в производствах - лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном,

деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» паспорта специальности 4.3.4. – «Технология, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» (технические науки).

## **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными результатами, базируются на результатах вычислительного эксперимента и ряда промышленных испытаний разработанной технологии и подтверждены соответствующими актами. Необходимые вычислительные эксперименты проводились в BC MathCAD.

## **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

В диссертационной работе и публикациях автор обосновал актуальность темы, поставил цель работы и сформулировал ее задачи, непосредственно участвовал в проведении экспериментов на промышленных камерах. Им получены и статистически обработаны экспериментальные результаты, интерпретированы и внедрены в учебный процесс.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских научно-технических конференциях:

- XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2022);
- XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2023).

**Реализация работы.** Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли промышленную апробацию на предприятиях Свердловской области, а также используются в учебном процессе Уральского государственного лесотехнического университета.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья в журнале, входящем в международную базу данных Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и рекомендаций и приложений, содержит 120 страниц текста, 30 таблиц, 11 рисунков, и библиографический список из 125 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и задачи, научная новизна, научные положения, выносимые на защиту, структура и объем работы, а также ее реализация и апробация.

**В первой главе** «Состояние вопроса» проведен анализ, посвященный разработке и применению технологии сушки древесины лиственных пород, в частности березы.

Если рассмотреть строение древесины лиственных пород с точки зрения переноса влаги, то можно сделать следующие выводы:

1. Элементами, проводящими влагу в древесине лиственных пород являются сосуды и сосудистые трахеиды. Причем сосуды являются исключительным элементом строения древесины лиственных пород и предназначены для проведения воды вдоль ствола дерева. Трахеиды представляют собой замкнутые клетки, имеющие веретенообразную форму длиной до 5 мм (рисунок 1).
2. Для прохождения воды из сосудов к соседним живым клеткам служат различного рода простые и окаймленные поры, которые имеются в боковых клетках сосудов.

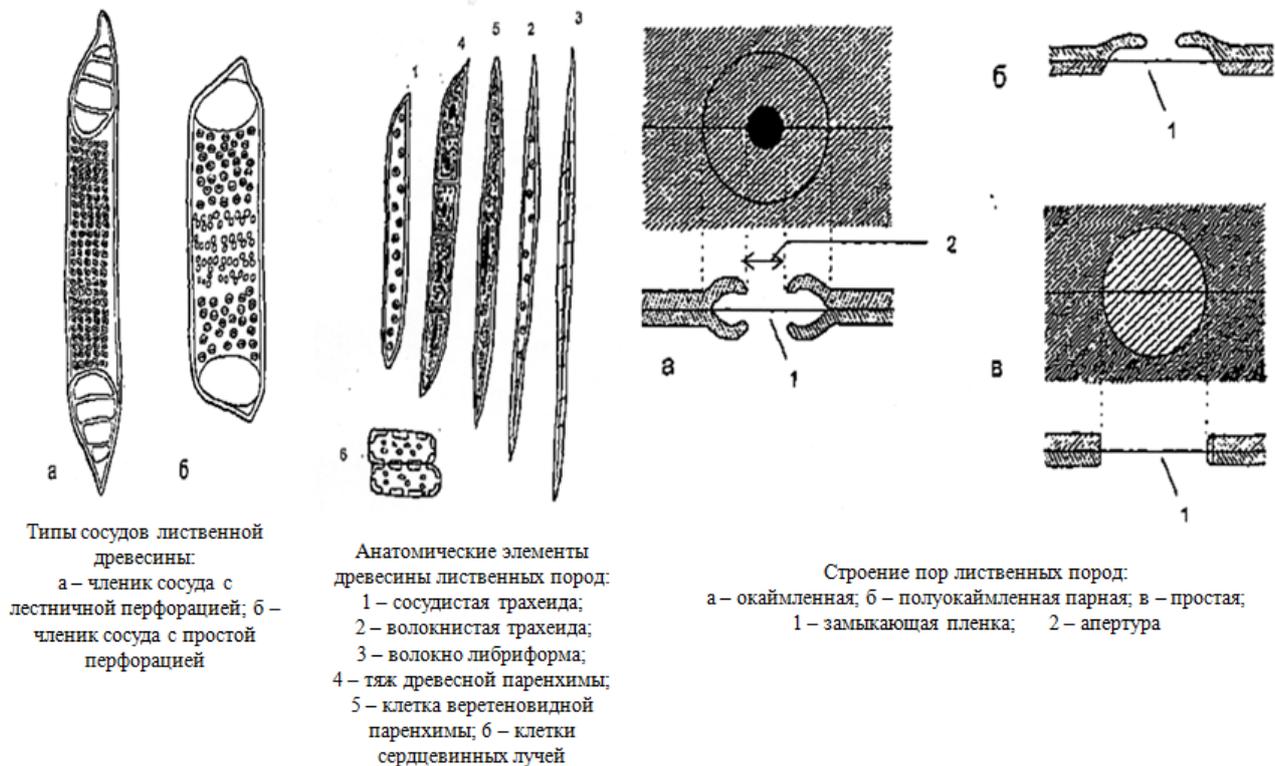


Рисунок 1 – Элементы строения древесины лиственных пород

Следует отметить, что влагопроводность древесины лиственных пород существенно различна по величине (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения коэффициента влагопроводности древесины поперек волокон

Порода	Значение коэффициентов ( $D \cdot 10^6$ , см <sup>2</sup> /с) при температуре сушки, °С			
	0°	60°	80°	100°
Осина	2,4	16	28	45
Липа	1,9	14	23	40
Сосна (заболонь)	1,6	11	19	33
Сосна (ядро)	0,9	7,0	12	22
Береза	0,8	5,8	10	17
Дуб	0,35	2,7	4,0	9,0

Влагопроводность древесины осины и липы выше, чем сосны (соответственно на 50 % и 20 %). В то же время влагопроводность березы вдвое, а дуба в 3,5 – 4 раза меньше, чем древесины заболони сосны.

Исследованиями процессов сушки древесины лиственных пород в различные годы занимались такие известные отечественные ученые как Серговский П.С., Кречетов И.В., Шубин Г.С., Сергеев В.В., среди зарубежных ученых можно отметить Eihler H., Egner K., Janik W. и многие другие.

Анализ проведенных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Среди прочих лиственных пород древесина березы занимает ведущее место, вследствие ее повсеместной распространённости, а также относительно высоких физико-механических свойств.
2. Относительно низкие сушильные свойства древесины березы позволяют считать ее трудносохнущей породой с возможным применением для ее сушки специальных режимов.
3. Применяемая до настоящего времени советская система трехступенчатых режимов недостаточно оправдана. Перспективным является применение бесступенчатых режимов.
4. Применение высокотемпературных режимов позволяет интенсифицировать процесс сушки, но существенно снижает физико-механические свойства высушиваемой древесины.
5. Применение трехступенчатых режимов при постоянной температуре по сухому термометру позволяет в значительной степени, интенсифицировать процесс сушки, но опять же за счет применения достаточно высоких температур.
6. Сушка древесины в камерах малой мощности, как правило, предполагает отсутствие системы первоначального увлажнения агента сушки (в период прогрева), а также проведения влаготеплообработок. Это требует проведения теоретических исследований в отношении совмещенной сушки-прогрева древесины.

На основании сделанных выводов сформулированы задачи исследования (см. выше).

**Во второй главе** «Теоретические исследования процесса сушки древесины березы» исследования проводились по двум направлениям:

1. Возможность применения при сушке древесины березы, так называемой технологии совмещенной сушки-прогрева. Данная технология

предполагает, что в период первоначального прогрева древесины важно не допустить пересушивание поверхностной зоны досок, высоких внутренних напряжений и, соответственно, возможного разрушения древесины. Необходимость всего этого возникает вследствие того, что первоначальное увлажнение перед сушкой отсутствует.

Ранее проведенными исследованиями практически установлено, что для случая сушки древесины сосны применение такой технологии возможно и достаточно эффективно. Ранее этот вопрос пытались решить, но на модели условного пиломатериала, а это сосна. Поэтому для древесины березы данный вопрос требует корректного решения.

2. Теоретическое исследование оперативного метода интегральной оценки влажности древесины штабеля пиломатериалов. Необходимо иметь в виду, что в современных условиях практически единственным методом контроля текущей влажности древесины в камере является кондуктометрический метод измерения влажности древесины. Обычно количество кондуктометрических датчиков, устанавливаемых на штабеле составляет от 3 до 12. В то же время количество досок, подвергающихся сушке в камере, может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч, в зависимости от объема камеры.

Известен метод интегральной оценки влажности древесины сохнувшего штабеля пиломатериалов, основанный на контроле перепада температуры агента сушки на входе в штабель и на выходе из него.

Данный метод достаточно исследован и показал высокие метрологические характеристики на древесине сосны. При сушке древесины березы он не применялся, поэтому необходимо определить метрологические характеристики метода при сушке древесины березы.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В поверхностной (или диффузной) зоне сохнувших сортиментов древесины, как правило, достаточно влаги, чтобы прекратить процесс сушки в самом его начале (после достижения агентом сушки  $\varphi = 1$ ).

2. Использование технологии сушки, основанной на отсутствии пропаривания в первый период сушки (так называемая сушка - прогрев) для древесины березы не только возможно, но даже более эффективно, чем для древесины сосны.

3. Ограниченное количество кондуктометрических датчиков контроля текущей влажности древесины не позволяет обеспечить необходимую точность контроля интегральной влажности древесины всего штабеля.

4. Метрологическая оценка метода контроля интегральной влажности штабеля пиломатериалов для случая сушки древесины березы, подтвердила применимость данного метода. Хотя, следует отметить, что на древесине березы метод дает менее точные результаты, чем на древесине, например, сосны.

**В третьей главе «Общие методические положения»** приведены:

- методика экспериментальных исследований;

# Электронный архив УГЛТУ

- методика математической обработки результатов эксперимента;
- методика проведения вычислительного эксперимента;
- построение бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов.

Экспериментальные исследования проводились на двух предприятиях:

1) Режевской леспромхоз (г. Реж, Свердловская область).

Для проведения опытных сушек использовалась лесосушильная камера MGR – 50 (рисунки 2 и 3).



Рисунок 2 – Сушильная камера MGR-50

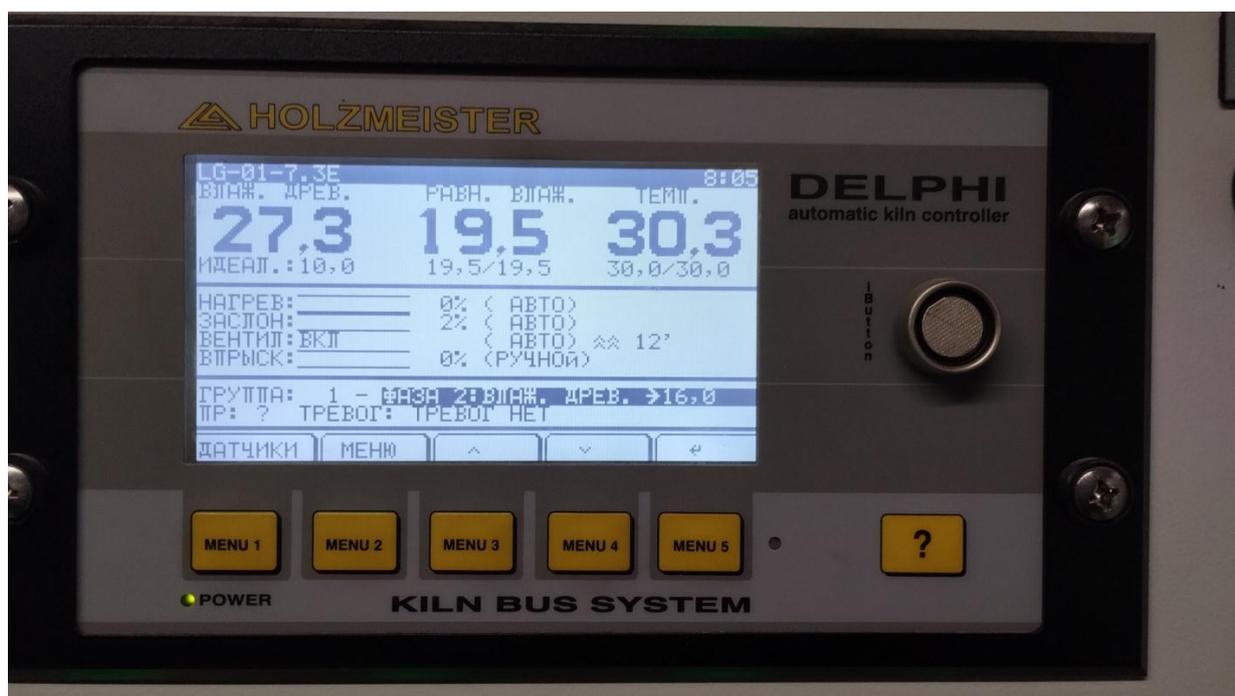


Рисунок 3 – Показания системы автоматического управления камерой MGR-50

2) ООО «НИКРЕС» (г. Первоуральск, Свердловская область).

Опытные сушки проводились на лесосушильной камере Урал – 30, изготовленной по проекту ООО «ПКТБ ЛЕСПРОМ», ее техническая характеристика приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Техническая характеристика лесосушильной камеры УРАЛ – 30

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Величина параметра
1.	Габаритные размеры штабеля	м	6,5 × 4,0 × 3,6
2.	Вместительность камеры в условном пиломатериале	м <sup>3</sup>	до 2000
3.	Мощность электродвигателей	кВт	до 15
4.	Тепловая мощность калорифера	кВт	140
5.	Установленная мощность насоса водяной форсунки	кВт	2 × 0,4
6.	Скорость циркуляции агента сушки по штабелю	м/с	до 4,5
7.	Расход тепла на сушку 1м <sup>3</sup> условного пиломатериала	Гкал/м <sup>3</sup>	0,38
8.	Масса	т	15,4

Задача повышения показателей эффективности и качества сушки может рассматриваться как оптимизационная. Однако для проведения процедуры классической оптимизации необходимо наличие оптимизационной модели, включающей функцию и систему ограничений, которая строится на основе математического описания объекта оптимизации. В данной работе создание математического описания объекта, в качестве которого рассматривается режим сушки березовых пиломатериалов, проводится на базе специально спланированного вычислительного эксперимента.

В качестве основы для проведения вычислительного эксперимента может быть использована система дифференциальных уравнений теплообмена, используемая обычно для анализа процессов сушки капиллярно-пористого коллоидного тела.

Известно, что аналитическое решение подобной системы уравнений практически невозможно, однако возможно самое широкое применение численных методов.

Необходимо учитывать также, что для корректного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных необходимо знать значения различных характеристик древесины.

Некоторые влагопереносные характеристики древесины различных пород были получены А.Г. Гороховским на модели капиллярно-пористой структуры

древесины. Из прочих лиственных пород такие характеристики были получены для древесины березы (рисунки 4 и 5).

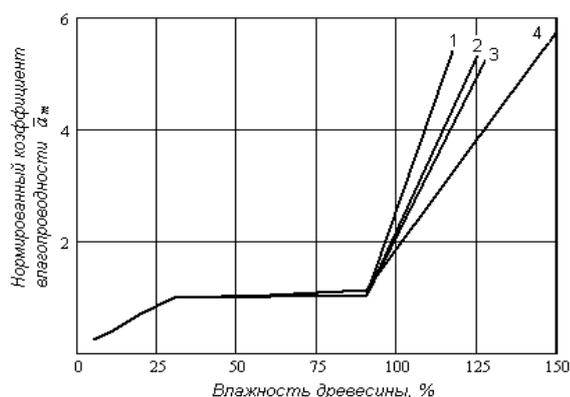


Рисунок 4 - Зависимость нормированного коэффициента влагопроводности от влажности древесины:

1 – лиственница; 2 – дуб; 3 – береза;  
4 – сосна

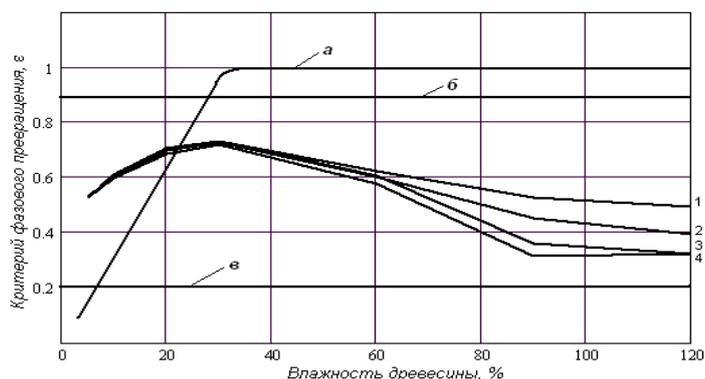


Рисунок 5 - Зависимость критерия фазового превращения от влажности древесины

Для решения вышеупомянутой системы дифференциальных уравнений тепломассообмена была разработана специальная программа в BC MathCAD. Решение проводилось по конечно-разностной схеме с введением виртуальных точек.

Среднее квадратическое отклонение определялось по методике, предложенной Е.А. Пинчевской на основе известных работ М.Н. Феллера. В основу расчета величины влажностных напряжений положена многостержневая модель доски, предложенная Б.Н. Уголевым.

**В четвертой главе** «Исследование процесса сушки березовых пиломатериалов» представлены результаты вычислительного эксперимента и последующей оптимизации режимов сушки, а также результаты производственных испытаний разработанной технологии.

Постоянные и переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Постоянные факторы при проведении вычислительного эксперимента

№ п/п	Наименование фактора	Значение
1	Порода	Береза
2	Сечение пиломатериала, мм	40 × 150
3	Тип режима	бесступенчатый
4	Начальная влажность древесины	$U_n = 0,6$
5	Конечная влажность древесины	$U_k = 0,12$

Выходные параметры вычислительного эксперимента:

$Y_1$  - продолжительность сушки пиломатериалов, мин;

$Y_2$  - среднее квадратическое отклонение влажности, %;

$Y_3$  – минимальное значение критерия безопасности режима сушки ( $B_{min}$ ).

Таблица 4 - Переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента

№ п/п	Наименование фактора и его разрядность	Обозначение фактора	Значение фактора на уровнях					
			нижний		основной		верхний	
			кодир.	натур.	кодир.	натур.	кодир.	натур.
1.	Начальное значение температуры среды, °С	x1	-	60	0	65	+	75
2.	Конечное значение температуры среды, °С	x2	-	75	0	80	+	85
3.	Равновесная влажность среды, %	x3	-	14	0	16	+	18

Таким образом, вычислительный эксперимент реализуется по схеме с тремя входными и с тремя выходными параметрами (рисунок 6).



Рисунок 6 - Схема математического описания объекта оптимизации при реализации вычислительного эксперимента

Вычислительный эксперимент был реализован по плану В3. Матрица проведения эксперимента с результатами расчета выходных параметров приведена в таблице 5.

При этом уравнение регрессии для конкретных выходных параметров имеют вид:

- продолжительность сушки пиломатериалов, (мин):

$$\hat{Y}_1 = 8046 + 240x_1 + 306x_2 - 1212x_3 + 52,5x_1^2 - 97,8x_2^2 - 247,8x_3^2 + 75x_1x_2 - 15x_2x_3 \quad (1)$$

- среднее квадратическое отклонение, %:

$$\hat{Y}_2 = 1,566 - 0,025x_1 - 0,045x_2 + 0,167x_3 + 0,018x_1^2 - 0,02x_2^2 - 0,045x_3^2 - 0,018x_1x_1 + 0,06x_1x_3 - 0,04x_2x_3; \quad (2)$$

- минимальное значение критерия безопасности режима ( $B_{\min}$ ):

$$\hat{Y}_3 = 1,51 + 0,02x_1 + 0,01x_2 - 0,223x_3 - 0,02x_1^2 - 0,002x_2^2 + 0,079x_3^2 + 0,0162x_1x_2 + 0,0158x_1x_3 + 0,0129x_2x_3 \quad (3)$$

Таблица 5 - Матрица проведения вычислительного эксперимента

№ п/п	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
1	+	+	+	7134	1,57	1,303
2	-	+	+	6928	1,68	1,238
3	+	-	+	6396	1,72	1,224
4	-	-	+	6102	1,77	1,225
5	+	+	-	9618	1,23	1,643
6	-	+	-	8958	1,35	1,61
7	+	-	-	8826	1,39	1,59
8	-	-	-	8466	1,37	1,807
9	+	0	0	8340	1,49	1,51
10	-	0	0	7860	1,60	1,51
11	0	+	0	8256	1,52	1,52
12	0	-	0	7644	1,58	1,50
13	0	0	+	6588	1,65	1,695
14	0	0	-	8012	1,32	1,324

Структура данных оптимизационных режимов моделей режимов сушки стандартна и включает в себя целевую функцию и ограничения на входные параметры. В качестве целевых функций в каждой из моделей выступают выходные параметры эксперимента  $\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_3$ .

Результаты оптимизации, проведенной в BC MathCAD, следующие:

$$\hat{Y}_1 = 6330 \text{ мин} \quad (4)$$

$$\hat{Y}_2 = 1,348 \% \quad (5)$$

$$\hat{Y}_3 = 1,763 \quad (6)$$

Далее рациональные значения параметров режима сушки были найдены решением компромиссной задачи методом условного центра масс.

В этом случае законы описания зависимости температуры и равновесной влажности среды принимают следующий вид:

$$t_c = 63 + 15 \frac{50 - U_T}{42} \quad (7)$$

$$W_p = 17,5 e^{-0.0254(50 - U_T)} \quad (8)$$

где  $t_c$  – температура среды по сухому термометру, °C;

$U_T$  – текущая влажность древесины, %;

$W_p$  – равновесная влажность древесины, %.

Рассмотрим теперь эффективность предлагаемых бесступенчатых режимов для сушки древесины березы с точки зрения развития в течение данного процесса внутренних напряжений.

Для анализа данного процесса применим разработанный нами метод экспресс-оценки эффективности режимов сушки древесины.

Метод был разработан для оценки режимов сушки древесины твердолиственных пород, с точки опасности возникновения в поверхностной зоне пиломатериала недопустимых по величине внутренних напряжений.

Безусловно, при сушке твердолиственных пород это очень важно. Но и для древесины березы, являющейся трудносохнущей породой, это тоже не менее актуально.

Гарантировать допустимые напряжения в древесине можно, соблюдая в процессе сушки следующее соотношение:

$$U = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{п}}} \quad (9)$$

где  $U_{\text{ср}}$  - средняя влажность древесины в процессе сушки, %;

$U_{\text{п}}$  - влажность поверхности древесины, %.

Далее рассмотрим, насколько эффективно применение того или иного режима сушки древесины березы с точки зрения экспресс-оценки.

Полученные расчетом данные для текущей влажности древесины 40 % сведены в таблицу 6.

Известно, что рекомендуемые значения перепада сушки для древесины березы лежат в диапазоне от 2,1 до 2,3.

В то же время фактические расчетные значения лежат в диапазоне от 2,35 (М-1) до 3,48 (МЛТИ), что больше рекомендуемых значений.

Таблица 6 - Расчетные значения перепада сушки древесины березы для различных режимов сушки

№ п/п	Наименование режима	$t_{\text{ср}}$	$\Delta t$	$\varphi$ , %	$W_p$	$W_{\text{п}}$	$U$
1	М-1 (Мэдисоновский)	63	4	84	15	16	2,35
2	РТМ-85 (5В - норм.)	63	3	82	14	15	2,66
3	Б-6 норм (МЛТИ)	64	6	74	10,5	11,5	3,48
4	Сергеев В.В. (норм)	77	4	84	13,5	14,5	2,76
5	8-ступ. (№8)	61	4	82	13,5	14,5	2,76
6	6-ступ (№6)	63	4	82	13,5	14,5	2,76
7	Бесступенчатый	63	-	-	17,5	18,5	2,16

Примечание:

$t$  - температура среды, °С;  $\Delta t$  – психрометрическая разность, °С;  $\varphi$  - относительная влажность воздуха, %;  $W_p$  – равновесная влажность древесины, %;  $W_{\text{п}}$  – влажность поверхности сохнущей древесины, %;  $U$  – величина перепада сушки древесины березы

И если «принципиально устаревший» режим М-1 имеет превышение рекомендуемых значений, лишь на 2%, что, вероятно свидетельствует о том, что этим можно пренебречь. Однако превышение допустимого перепада сушки у других режимов составляет от 15,6 % до 51,3 %, что вряд ли допустимо.

Исключение составляет бесступенчатый режим, который по перепаду сушки полностью попадает в указанный диапазон, что полностью гарантирует

предупреждение разрушения древесины от недопустимых по величине влажностных напряжений.

Это позволяет даже при прочих равных рекомендовать бесступенчатые режимы для сушки древесины березы.

Результаты опытных сушек в Режевском леспромхозе приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Характеристика опытных сушек в Режевском леспромхозе

№ п/п	Режим сушки	Требуемая влажность и допуск, %	Результаты сушки			Соблюдение допуска	ВТО	Внутренние напряжения
			Конечная влажность	Среднее квадратическое отклонение	Фактический допуск на влажность			
1	Согласно НДТ на сушильную камеру	8 ± 2	8,3	1,28	± 2,56	Не соблюдается	+	II
2	Экспериментальный бесступенчатый	8 ± 2	8,1	0,95	± 1,9	Соблюдается	-	I-II
3	Экспериментальный бесступенчатый	8 ± 2	8,2	0,66	± 1,32	Соблюдается	-	I
4	Экспериментальный бесступенчатый	8 ± 2	8,2	0,76	± 1,52	Соблюдается	-	I
5	Согласно НДТ на сушильную камеру	10 ± 2	10,1	0,63	± 1,26	Соблюдается	+	II
6	Экспериментальный бесступенчатый	10 ± 2	9,7	0,5	± 1,0	Соблюдается	-	I
7	Экспериментальный бесступенчатый	10 ± 2	9,6	0,42	± 0,85	Соблюдается	-	I

По имеющимся в таблице 7 данным можно сделать следующие выводы:

1. Существующие на предприятиях режимы сушки при сушке древесины березы не полностью обеспечивают качество сушки согласно требованиям нормативно-технической документации, в частности не соблюдается допуск на конечную влажность древесины при её средней величине 8,0 %. При средней величине влажности 10,0 % допуск соблюдается, что свидетельствует о большем соответствии режима при сушке до данной величины влажности.

2. Экспериментальный бесступенчатый режим сушки в обоих случаях обеспечивает соблюдение допуска на конечную влажность древесины, поэтому его применение вполне оправдано на камерах высокого класса с большим запасом, что свидетельствует о его промышленной пригодности.

3. Нормативные режимы сушки предприятия позволяют получить конечные внутренние напряжения при сушке в пределах II категории качества, хотя для снижения величины напряжений применяется влаготеплообработка. В то же время, при применении экспериментальных бесступенчатых режимов влаготеплообработка не применяется, но внутренние напряжения при сушке существенно меньше и соответствуют, в основном, I категории качества.

Очевидно, это связано с тем, что при построении бесступенчатого режима мы учли рекомендации метода, так называемого перепада сушки. Это позволило снизить влажностные напряжения и, соответственно, облегчить конечное температурно-влажностное состояние древесины, что, конечно же, привело к существенному снижению напряжений.

Основной целью промышленного эксперимента в ООО «НИКРЕС» было установление значений разницы во времени сушки между нормативным режимом 6-В и экспериментальным бесступенчатым. При этом определялись фактические показатели рассеяния конечной влажности по всем пяти сушкам. Более точное определение данной величины не имеет смысла при относительно невысоких качественных показателях сушки, которые может обеспечить лесосушильная камера УРАЛ-30. Итоговые показатели опытных сушек приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Характеристика опытных сушек в ООО «НИКРЕС»

Режим 6-В			Экспериментальный бесступенчатый режим		№ сушки	Продолжительность сушки, час	Требуемая конечная влажность, %	Средняя конечная влажность (по сушкам)	Средние условные внутренние напряжения
параметры	$t_c$	$W_p$	$t_c$	$W_p$					
начальные	57	14	63	16	1	177	10 ± 3	9,8 ± 2,7	II
конечные	77	4,5	6	6	2	152			
Нормативная продолжительность сушки 187 час.					3	159			
					4	148			
					5	151			
					$\tau_{cp}$ , час.	154			

Данные, приведенные в таблице 8, позволяют сделать следующие выводы:

1. Продолжительность сушки березовых пиломатериалов толщиной 50 мм бесступенчатым режимом значимо меньше, чем режимом 6-В.
2. Качественные показатели сушки по величине разброса конечной влажности полностью соответствуют требованиям РТМ и рекомендациям А.Г. Гороховского.
3. Внутренние напряжения в древесине полностью соответствуют требованиям РТМ. Таким образом, экспериментальный бесступенчатый режим возможно применить и на камерах среднего класса.

В ходе производственных испытаний нами были установлены следующие преимущества применения разработанных бесступенчатых режимов сушки (в случаях сушки пиломатериалов из древесины березы):

1. Снижение (и даже полное исключение) брака из-за допуска на конечную влажность (в пределах 6 - 6,5%).

2. В некоторых случаях возможно снижение продолжительности сушки (около 20 %), что может, соответственно:

- несколько увеличить производительность камер;
- увеличивать производительность сушильных хозяйств, минимум на 10 %;
- на 10 % снизить расход тепловой и электрической энергии.

Далее был произведен ориентировочный расчет возможного снижения затрат на проведенные процессы сушки пиломатериалов из древесины березы.

Результаты расчета представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Результаты расчета суммарной экономии

№ п/п	Статья экономии	Экономия на 1 сушке (54 м <sup>3</sup> ), руб.	Экономия на 1м <sup>3</sup> , руб.	Экономия на годовую программу (2200 м <sup>3</sup> ), руб.
1.	Брак	81000	1500	3 300 000
2.	Электроэнергия	2160	40	88 000
3.	Тепловая энергия	13500	250	550 000
	Суммарная экономия	96600	1750	3 938 000

По результатам проведенных исследований процесса сушки пиломатериалов можно заключить следующее:

1. Разработанная методика формирования бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов позволяет однозначно определять структуру и величину параметров режима.

2. Выбранные в качестве управляющих факторов параметры бесступенчатого режима сушки позволяют эффективно управлять выходными параметрами вычислительного эксперимента.

3. Оптимизация по частным критериям показала, что определенный набор значений управляющих факторов позволяет получить значение выходного параметра на уровне I - II категории качества РТМ.

4. Определены оптимальные значения параметров режима методом условного центра масс, то есть путем решения компромиссной задачи, которые позволяют получить приемлемые значения выходных показателей, характеризующих как качество, так и эффективность сушки.

5. Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что по критерию перепада сушки только бесступенчатый режим полностью соответствует по своей структуре предъявляемым требованиям.

6. Производственные испытания разработанной технологии сушки подтвердили ее эффективность для двух конструкций лесосушильных камер.

7. Расчет экономической эффективности разработанной технологии подтвердил ее высокую эффективность. Так, при годовом объеме сушки березовых пиломатериалов 2200 м<sup>3</sup>, условная экономия от снижения себестоимости может составлять около 4 млн. рублей.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В последние годы возрастает интерес деревообрабатывающей промышленности к широкому использованию древесины лиственных пород.
2. Среди прочих лиственных пород древесина березы занимает ведущее место. В то же время она обладает низкими сушильными свойствами, поэтому требует для сушки применения специальных режимов, в частности бесступенчатых.
3. Проведенные исследования подтвердили возможность проведения совмещенной сушки-прогрева для древесины березы. Доказана также применимость метода интегральной оценки влажности штабеля пиломатериалов непосредственно в процессе сушки.
4. Разработана методика формирования бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов. Определены оптимальные значения параметров режима.
5. Промышленная проверка на камерах двух различных, но широко распространенных типов подтвердила высокую эффективность разработанной технологии сушки.
6. Разработанная технология сушки березовых пиломатериалов позволяет получить годовой экономический эффект для лесосушильной камеры с разовой загрузкой 50 м<sup>3</sup> около 4 млн. рублей.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гороховский, А.Г. Анализ режимов конвективной сушки пиломатериалов твердолиственных пород (обзор) / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, В.В. Савина, **А.С. Агафонов** // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. - № 2. - С. 57 – 53.
2. Гороховский, А.Г. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов твердолиственных пород / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, В.В. Савина, **А.С. Агафонов** // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. - № 2. - С. 53 – 60.
3. Гороховский, А.Г. Теоретический анализ процессов конвективной сушки древесины / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **А.С. Агафонов**, П.А. Бекк // Системы. Методы. Технологии, 2022. - №1 (53). - С. 138 – 141.
4. Гороховский, А.Г. Экспресс-оценка эффективности режимов сушки древесины твердолиственных пород / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **А.С. Агафонов**, П.А. Бекк, Т.С. Овчинникова // Леса России и хозяйство в них, 2023. - №2. - С. 91 – 96.
5. Гороховский А.Г. Оптимизация процесса сушки древесины березы / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **А.С. Агафонов** // Деревообрабатывающая промышленность, 2024. - №1. - С. 10 – 14.

## В издании, индексируемом в МБД Web of Science:

6. Гороховский, А.Г. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **А.С. Агафонов** // Изв. вузов: Лесной журнал, 2022. - №1. - С. 166 – 172.

## В сборниках докладов на конференциях:

7. **Агафонов А.С.** К вопросу об интенсификации влагообмена при конвективной сушке древесины / А.С. Агафонов, П.А. Бекк, А.Г. Гороховский // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – С. 291 – 294.
8. **Агафонов А.С.** О влиянии состояния влаги в древесине на тепломассообмен при сушке / А.С. Агафонов, П.А. Бекк, Е.Е. Шишкина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – С. 288 – 291.
9. **Агафонов А.С.** О критерии фазового превращения при конвективной сушке древесины / А.С. Агафонов, П.А. Бекк, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. – С. 288 – 291.
10. **Агафонов А.С.** О механизме конвективной сушки древесины / А.С. Агафонов, П.А. Бекк, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. – С. 409 – 412.

**Просим Вас принять участие в работе диссертационного Совета или прислать отзыв на автореферат с заверенной в установленном порядке подписью по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: [d21228102@yandex.ru](mailto:d21228102@yandex.ru)**

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».  
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. Сектор оперативной полиграфии РИО.