

Министерство науки и высшего образования РФ
Уральский государственный лесотехнический университет

На правах рукописи

Агафонов Артем Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ
ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
А.Г. Гороховский

Екатеринбург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	10
1.1. Анализ лиственных пород России.....	10
1.2. Особенности технологии сушки древесины березы	17
1.3. Выводы и задачи исследований	37
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ.....	39
2.1. Теоретические исследования совмещенной сушки - прогрева древесины.....	39
2.2. Теоретические исследования оперативного метода интегральной оценки влажности древесины в штабеле пиломатериалов	46
2.3. Выводы.....	56
3. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	57
3.1. Экспериментальные исследования.....	57
3.1.1. Описание сушильного оборудования, применяемого при проведении экспериментов.....	57
3.1.2. Проведение процесса и контроль показателей качества сушки.....	57
3.2. Статистическая обработка экспериментальных данных	65
3.3. Проверка нормальности распределения.....	67
3.4. Построение бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов.....	68
3.5. Вычислительный эксперимент.....	69
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ БЕРЕЗОВЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ.....	76

4.1. Вычислительный эксперимент.....	76
4.1.1. Постоянные и переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента.....	76
4.1.2. Реализация вычислительного эксперимента.....	78
4.1.3. Оптимизация режима сушки по результатам вычислительного эксперимента.....	80
4.1.4. Анализ результатов вычислительного эксперимента на основе метода оценки эффективности режимов сушки	83
4.2. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ.....	91
4.2.1. Опытные сушки в Режевском Леспромхозе.....	91
4.2.2. Опытные сушки в ООО «НИКРЕС».....	94
4.3. Техничко-экономическое обоснование предлагаемой технологии.....	96
4.4. Выводы	99
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	101
ПРИЛОЖЕНИЯ	114

ВВЕДЕНИЕ

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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Анализ лиственных пород России

Российская Федерация располагает колоссальными запасами древесины - более 80 млрд. м³. Безусловно, ведущее место занимают хвойные породы (порядка 75%) от всей лесопокрытой площади России, составляющей порядка 809 млн. га (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Распространенность хвойных лесов на территории России [60]

№ п/п	Порода древесины	Лесопокрытая площадь млн. га	% от всей лесопокрытой площади
1	Лиственница	270,0	35
2	Сосна	115,0	15
3	Ель	78,0	10
4	Кедр	40,0	5
5	Пихта	15,0	2

Лиственные породы, при их существенно меньшей распространенности, на территории Российской Федерации, имеют, тем не менее, большую лесопокрытую площадь (таблица 1.2) и значительные запасы древесины.

Деревообработчики в ряде случаев вынуждены обращать свое внимание именно на лиственную древесину. Это связано со значительным истощением запасов хвойной древесины, особенно доступных для промышленности. Однако широкое использование лиственной древесины в промышленности тормозится в первую

очередь ее низкой товарностью, а также наличием ряда проблем в технологии ее переработки [48].

Таблица 1.2 – Распространенность лиственных лесов на территории России [60]

№ п/п	Порода древесины	Лесопокрытая площадь млн. га	% от всей лесопокрытой площади
1	2	3	4
1.	Березовые и осиновые леса	107,0	15
	- в т.ч. березняк	88,0	11
2.	Дубовые леса	7,0	менее 1
3.	Липовые леса	3,0	менее 0,5
4.	Тополь	-	менее 1
5.	Буковые леса	0,7	менее 0,1

Согласно ГОСТ 23431 – 79 [25] все лиственные породы подразделяются на кольцесосудистые и рассеяннососудистые (таблица 1.3).

У древесины лиственных пород по сравнению с хвойными больше анаболических элементов и их переходных форм, причём элементы расположены менее упорядоченно [25]. Проводящую функцию выполняют в основном сосуды, а также сосудистые и волокнистые трахеиды, механическую – волокна либриформа и волокнистые трахеиды, запасующую – переходные клетки, которые образуют преимущественно горизонтальную систему на узких (однорядных) и широких (многорядных) сердцевидных лучах, а также вертикальную систему древесины и веретеновидной паренхимы.

Основную долю лиственной древесины составляют сосуды и волокна либриформа (таблица 1.4).

Таблица 1.3 – Классификация лиственных пород древесины России

Лиственные породы	
Кольцесосудистые	Рассеяннососудистые
<p>Дуб</p> <p>Ясень</p> <p>Вяз</p> <p>Ильм</p> <p>Берест</p> <p>Каштан</p> <p>Бархатное дерево</p> <p>Фисташка</p> <p>Акация белая</p>	<p>Береза</p> <p>Осина</p> <p>Бук</p> <p>Липа</p> <p>Ольха</p> <p>Тополь</p> <p>Граб обыкновенный</p> <p>Клен</p> <p>Ива</p> <p>Орех</p> <p>Платан восточный</p> <p>Груша обыкновенная</p> <p>Самшит вечнозеленый</p> <p>Рябина обыкновенная</p>

Таблица 1.4 – Содержание различных элементов в древесине некоторых лиственных пород, % от общего объема древесины

Порода	Волокна либриформа	Сосуды	Сердцевинные лучи	Древесина паренхима
Кольцесосудистые породы				
Дуб	43,5...48,0	16,0...22,0	21,5...28,0	8,0...13,5
Каштан съедобный	46,8	39,8	12,0	1,4
Ясень	64,0...69,0	11,5...20,5	12,0	4...7
Ильм	35,0...37,0	25,0...48,0	11,0...12,0	2,0...7,5

Продолжение таблицы 1.4

Рассеяннососудистые породы				
Береза	65,8...75,7	10,6...21,4	10,8...11,7	2,0
Осина	55,0	34,0	11,0	мало
Тополь	49,0...53,0	33,0...37,0	14,0	мало
Липа	36,0	55,6	6,2	2,2
Ива	54,5	38,0	7,5	мало
Клен	61,5...69,0	18,0...21,5	11,0...18,0	мало

Средние показатели основных физико-механических свойств древесины лиственных пород приведены в таблице 1.5 [9].

Среди кольцесосудистых пород наиболее значимые породы для деревообработки – дуб и ясень.

Среди рассеяннососудистых это – береза, осина, бук, липа и ольха. Безусловно интересны также такие породы как тополь, клен и, особенно, орех, но, к сожалению они мало распространены.

Среди прочих лиственных пород выделяют мягколиственные породы, а именно березу, осину, ольху, липу, тополь, иву. Наиболее среди них распространена береза (таблица 1.2).

Первый по порядку и важнейшей по значению операций облагораживания древесины является ее сушка.

В таблице 1.6 [88] приведены средние значения коэффициентов влагонепроводности древесины поперек волокон, определяющей скорость сушки.

Таблица 1.5 – Основные физико-механические свойства древесины мягколиственных пород [9]

порода	Плотность, кг/м ³			Величина разбухания, %			Предел прочности, (min / max), МПа					Ударная вязкость при сгибе (min / max), кДж/кг	Твердость (min / max), Н/мм ²			Модуль упругости при изгибе (min / max), ГПа
	при влажности 12 %	в абсолютно сухом состоянии	базисная	по радиальному направлению	по тангенциальному направлению	по объему	при статическом изгибе	при сжатии вдоль волокон	при растяжении вдоль волокон	при скальвании			Торцевая	Радиальная	Тангенциальная	
										радиальный	тангенциальный					
Береза бородавчатая	640	620	520	0,29	0,34	0,65	$\frac{109,5}{64,5}$	$\frac{54,0}{26,3}$	$\frac{136,5}{102}$	$\frac{9,02}{5,80}$	$\frac{10,9}{7,00}$	$\frac{92,9}{78}$	$\frac{46,3}{27,5}$	$\frac{35,9}{21,5}$	$\frac{32,1}{19,2}$	$\frac{14,2}{10,8}$
Ива	455	425	380	0,11	0,30	0,43	$\frac{70,7}{40,8}$	$\frac{38,2}{16,5}$	$\frac{99,1}{75,8}$	$\frac{7,26}{4,00}$	$\frac{10,3}{6,0}$	$\frac{55,7}{47}$	$\frac{27,4}{16,5}$	$\frac{20,9}{12,4}$	$\frac{20,7}{12,4}$	$\frac{8,98}{5,6}$
Липа	495	475	400	0,23	0,33	0,58	$\frac{86,4}{53,1}$	$\frac{45,8}{23,7}$	$\frac{117}{89,4}$	$\frac{8,42}{5,50}$	$\frac{8,00}{4,90}$	$\frac{57,8}{49}$	$\frac{25,0}{15,0}$	$\frac{16,7}{10,0}$	$\frac{17,4}{10,4}$	$\frac{8,94}{5,60}$
Ольха	525	495	430	0,17	0,30	0,49	$\frac{78,9}{48,4}$	$\frac{44,5}{23,1}$	$\frac{97,3}{74,3}$	$\frac{7,97}{5,10}$	$\frac{9,80}{6,20}$	$\frac{51,6}{43}$	$\frac{39,2}{23,6}$	$\frac{26,5}{15,9}$	$\frac{28,2}{16,8}$	$\frac{9,33}{6,00}$
Осина	495	465	410	0,15	0,30	0,47	$\frac{76,5}{44,5}$	$\frac{43,1}{18,8}$	$\frac{121}{92,7}$	$\frac{6,15}{3,50}$	$\frac{8,42}{4,90}$	$\frac{84,6}{72}$	$\frac{25,8}{15,4}$	$\frac{18,7}{11,2}$	$\frac{19,6}{11,7}$	$\frac{11,2}{7,70}$
Тополь	455	425	375	0,14	0,28	0,44	$\frac{68,0}{39,5}$	$\frac{40,0}{17,4}$	$\frac{87,8}{68,0}$	$\frac{5,96}{3,30}$	$\frac{7,15}{4,10}$	$\frac{39,2}{33}$	$\frac{26,7}{15,4}$	$\frac{18,5}{11,1}$	-	$\frac{10,3}{6,9}$

Таблица 1.6 – Средние значения коэффициента влагопроводности древесины поперек волокон

Порода	Значение коэффициентов ($D \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$) 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

В таблице 1.7 [81] приведены средние показатели сушильных свойств и влажностных характеристик древесины.

Анализ данных, приведенных в таблицах 1.5 – 1.7 позволяет сделать следующие выводы:

1. Среди прочих мягколиственных пород древесины, береза обладает самой высокой плотностью, в том числе базисной. Кроме того она обладает наиболее высокими физико-механическими свойствами, как во влажном, так и высушенном (при влажности 12%) состоянии.

2. Древесина березы обладает достаточно высоким коэффициентом продолжительности сушки ($K_n = 1,3$). Однако другие источники дают еще большую его величину. Так в [63] находим величину $K_n = 1,6$, а в [57] даже $K_n = 1,83$.

Таблица 1.7 – Средние показатели сушильных и влажностных характеристик древесины (по Кречетову И.В.) [81]

Порода	Сушильные свойства древесины			Влажность древесины %		Максимальная влажность, %
	Полная усушка по объему, %	Коэффициент коробления	Коэффициент продолжительности сушки	Ядровой или спелой	заболонной	
Тополь	13,6	0,14	0,9	111	111	198
Сосна	14,7	0,13	1,0	33	112	180
Липа	16,8	0,10	1,0	63	60	180
Осина	13,5	0,15	1,0	82	82	180
Ольха	14,1	0,13	1,1	84	84	170
Береза	18,6	0,06	1,3	78	78	131
Дуб	14,4	0,10	5,5	64	72	117

3. Сушильные свойства древесины березы относительно низкие. Так, древесина березы имеет довольно низкий коэффициент влагопроводности и, как следствие, высокий коэффициент продолжительности сушки. Полная усушка по объему у древесины березы даже выше чем у дуба. Все это вместе взятое, позволяет считать древесину березы трудносохнущей, чего нельзя сказать про древесину других мягколиственных пород.

Все сказанное выше позволяет в дальнейшем сосредоточить наши исследования на процессе сушки древесины березы.

1.2. Особенности технологии сушки древесины березы

Все существующие режимы сушки древесины построены так, как было рекомендовано, в так называемых режимах, разработанных в г. Мэдисон (США) в 1914 - 1918 годах лабораторией лесных продуктов [5, 36, 39] (таблица 1.8). При этом режимы по своей структуре являются 7-ступенчатыми. Что касается применения, то для березы (а также липы и тополя) рекомендуется режим М-1 при толщине пиломатериалов до 40 мм. При дальнейшем увеличении толщины на каждые 25 мм свыше 40 мм номер режима перемещается на одну позицию.

В СССР в первые послевоенные годы была разработана система 8-ступенчатых режимов сушки, которая приведена в таблице 1.9.

В таблице 1.10 приведены рекомендации по выбору того или иного режима сушки [39, 81]. Позже, к концу 50-х годов была разработана система 6-ступенчатых режимов сушки [57, 63], данные о применении которых приведены в таблицах 1.11 – 1.12.

При внимательном рассмотрении данных, приведенных в таблицах 1.8 – 1.12 можно сделать следующие выводы:

- основоположники (в лице Мэдисоновской лаборатории) рекомендуют для сушки березы относительно мягкие режимы с очень небольшой психрометрической разностью в первый период сушки;

- разработанная советскими учеными система 8-ми и 6-ступенчатых режимов для сушки древесины березы предлагает более жесткие параметры. Характерным для этого вида режимов является то, что они позволяют в начале сушки применять несколько большую психрометрическую разность, а на последнем этапе режима сушки воздух должен быть несколько менее сухой ($\Delta t = 24$ °С, в то время как в Мэдисоновских режимах она составляет 30 °С).

Таблица 1.8 – Режимы сушки лиственных пород в сушилках с мощной реверсивной циркуляцией [39]

Влажность древесины, %	Режим М-1		Режим М-2		Режим М-3		Режим М-4		Режим М-5		Режим М-6	
	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt	t	Δt
Выше 40	60	2,5	57	2,5	54	2,5	52	2,5	49	2,5	46	2,0
46-30	63	4	60	4,0	57	3,5	54	3,5	52	3,5	49	3,5
30-25	66	6	63	5,5	60	5,0	57	6,0	54	5,0	52	4,5
25-20	68	10	66	9,0	63	9,0	60	8,5	57	7,5	54	7,5
20-15	71	14	68	13,0	66	13,0	63	13,0	60	11,0	57	10,0
15-10	74	21	71	20,0	68	17,0	66	17,0	63	15,0	60	14,0
10 и ниже	77	30	74	30,0	71	25,0	68	24,0	66	21,0	63	21,0

где t – температура по сухому термометру, °С;

Δt – психрометрическая разность, °С.

Таблица 1.9 – Система восьмиступенчатых режимов сушки пиломатериалов [40, 63]

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 1					Режим 2				
Выше 40	92	4	86	-	Выше 40	80	3,5	86	-
40-35	94	5	83	2	40-35	82	5	80	4
35-30	96	7	77	2	35-30	84	6,5	75	5
30-25	97	9,5	70	3	30-25	85	8	70	6
25-20	99	12	63	3	25-20	87	11	63	7
20-15	100	16	54	4	20-15	89	15	53	8
15-10	102	22	46	6	15-10	91	20	43	12
Ниже 10	104	29	37	-	Ниже 10	94	27	31	-

Продолжение таблицы 1.9

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 3					Режим 4				
Выше 40	74	3,5	85	-	Выше 40	69	3,5	85	-
40-35	76	5	80	6	40-35	71	4,5	81	9
35-30	77	6	75	7	35-30	73	6	76	10
30-25	79	8	69	8	30-25	75	8	69	11
25-20	81	11	61	10	25-20	77	11	61	13
20-15	83	15	52	13	20-15	79	14	53	17
15-10	85	20	41	18	15-10	81	19	41	24
Ниже 10	87	26	30	-	Ниже 10	83	25	30	-

Продолжение таблицы 1.9

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 5					Режим 6				
Выше 40	65	3	86	-	Выше 40	63	3	86	-
40-35	68	4	82	10	40-35	65	4	82	12
35-30	70	5,5	76	12	35-30	67	5,5	76	14
30-25	72	7,5	70	13	30-25	69	7,5	70	16
25-20	74	10	62	17	25-20	71	10	62	20
20-15	76	14	52	22	20-15	73	13	53	26
15-10	78	18	42	30	15-10	75	18	42	36
Ниже 10	80	24	31	-	Ниже 10	78	23	31	-

Продолжение таблицы 1.9

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 8					Режим 10				
Выше 40	59	3	85	-	Выше 40	56	3	85	-
40-35	61	4	82	17	40-35	58	3,5	83	19
35-30	63	5	76	19	35-30	60	5	77	24
30-25	65	7	70	21	30-25	62	6,5	72	26
25-20	67	9,5	62	27	25-20	64	9	63	34
20-15	69	13	53	31	20-15	67	12	54	43
15-10	72	17	42	48	15-10	69	16	43	60
Ниже 10	74	23	31	-	Ниже 10	71	22	31	-

Продолжение таблицы 1.9

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 12					Режим 15				
Выше 40	53	2,5	87	-	Выше 40	50	2,5	87	-
40-35	55	3,5	83	23	40-35	52	3	84	32
35-30	57	4,5	79	29	35-30	54	4	80	36
30-25	60	6,5	73	32	30-25	57	6	73	40
25-20	62	8,5	65	40	25-20	59	8	65	50
20-15	64	12	56	52	20-15	61	11	56	65
15-10	66	15	45	72	15-10	63	15	45	90
Ниже 10	69	21	32	-	Ниже 10	66	20	33	-

Окончание таблицы 1.9

Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах	Влажность древесины, W, %	Температура, t, °C	Психрометрическая разность t-t _м , °C	Влажность воздуха, φ, %	Продолжительность сушки в часах
Режим 20					Режим 25				
Выше 40	47	2	89	-	Выше 40	44	2	90	-
40-35	49	3	84	38	40-35	46	2,5	87	48
35-30	51	4	80	48	35-30	48	3,5	81	60
30-25	53	5,5	73	53	30-25	50	4,5	76	66
25-20	55	7,5	66	67	25-20	52	6,5	69	84
20-15	57	10	57	86	20-15	55	9	60	108
15-10	60	14	45	100	15-10	57	13	47	150
Ниже 10	63	19	33	-	Ниже 10	60	18	35	-

Таблица 1.10 – Рекомендации по выбору восьмиступенчатых режимов сушки [40, 63]

Толщина, мм	№ режима					
	Для ели и пихты	Для сосны и кедра	Для березы	Для бука и клена	Для лиственницы и ясеня	Для дуба
19	1 - 2	2	3	4 - 5	5	10
25	2 - 3	2 - 3	4	6	6	12
30	3	3	5	6 - 8	8	15
40	3 - 4	4	6	10	10 - 12	20
50	4 - 5	5	8	12	12 - 15	25
60	6	6	10	15	15 - 20	30
70	6 - 8	8	12	20	20 - 25	-
80	8 - 10	10	15	25	25 - 30	-

Таблица 1.11 – Выбор шестиступенчатых режимов сушки [41, 64]

Толщина, мм	Ель	Сосна, кедр	Береза, ольха	Бук, ясень, клен, лиственница	Дуб
Номера режимов сушки					
13 - 16	1	1	2	3	7
19 - 22	1 - 2	2	3	5	10
25 - 32	2 - 3	2 - 3	4	6	12
32 - 40	3	3	5	6 - 8	15
40 - 50	3 - 4	4	6	10	20
50 - 60	4 - 5	5	8	12	25
60 - 70	6	6	10	15	30
80 - 100	10 - 12	12	20	30	-
100 - 130	12 - 15	15	25	-	-

Наконец, примерно к началу 70-ых годов была разработана трехступенчатая универсальная система режимов сушки пиломатериалов [77], которая впоследствии была несколько усовершенствована [18, 23, 78]. Данные, характеризующие эту систему режимов, приведены в таблицах 1.13 – 1.14.

Таблица 1.12 – Структура шестиступенчатых режимов сушки пиломатериалов [41, 64]

Режим		Влажность древесины, %					
		Выше 40	40 - 30	30 - 20	20 - 15	15 - 10	Ниже 10
Режим 1	Температура t , °С	92	96	98	100	102	104
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	5	7	12	16	22	29
Режим 2	Температура t , °С	80	84	87	89	91	94
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	5	6,5	11	15	20	27
Режим 3	Температура t , °С	74	77	80	83	85	87
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	5	6	11	15	20	26
Режим 4	Температура t , °С	69	73	76	79	81	83
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	4,5	6	11	14	19	25
Режим 5	Температура t , °С	66	70	73	76	78	80
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	4	5,5	10	14	18	24
Режим 6	Температура t , °С	63	67	70	73	75	78
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	4	5,5	10	13	18	23
Режим 8	Температура t , °С	59	63	66	69	72	74
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	4	5	9,5	13	17	23

Окончание таблицы 1.12

Режим		Влажность древесины, %					
		Выше 40	40 - 30	30 - 20	20 - 15	15 - 10	Ниже 10
Режим 10	Температура t , °С	56	60	63	67	69	71
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	3,5	5	9	12	16	22
Режим 15	Температура t , °С	53	57	60	64	66	69
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	3,5	4,5	8,5	12	15	21
Режим 20	Температура t , °С	50	54	57	61	63	66
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	3	4	8	11	15	20
Режим 30	Температура t , °С	47	51	54	57	60	63
	Психрометрическая разность, $t - t_m$, °С	3	4	7,5	10	14	19

Таблица 1.13 – Трехступенчатые режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов лиственных пород [78]

Индекс режима	Средняя влажность древесины, %	Номер режима и параметры (t, °С; Δt, °С; φ) сушильного агента														
		2			3			4			5			6		
		t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ
А	>30	82	3	0,88	75	3	0,87	69	3	0,87	63	2	0,91	57	2	0,90
	30-20	87	6	0,78	80	6	0,77	73	6	0,76	67	5	0,78	61	5	0,78
	<20	108	27	0,35	100	26	0,35	91	24	0,36	83	22	0,36	77	21	0,36
Б	>30	82	4	0,84	75	4	0,84	69	4	0,83	63	3	0,86	57	3	0,85
	30-20	87	8	0,72	80	8	0,70	73	7	0,72	67	6	0,75	61	6	0,74
	<20	108	29	0,32	100	28	0,32	91	25	0,34	83	23	0,34	77	22	0,34
В	>30	82	6	0,77	75	5	0,80	69	5	0,79	63	4	0,82	57	4	0,81
	30-20	87	10	0,66	80	9	0,66	73	8	0,69	67	7	0,71	61	7	0,70
	<20	108	31	0,30	100	29	0,31	91	26	0,33	83	24	0,32	77	23	0,32
Г	>30	82	8	0,71	75	7	0,73	69	6	0,76	63	5	0,78	57	5	0,77
	30-20	87	12	0,60	80	11	0,61	73	10	0,63	67	9	0,64	61	9	0,62
	<20	108	33	0,27	100	31	0,28	91	28	0,30	83	26	0,29	77	25	0,29
Д	>30	82	10	0,65	75	9	0,66	69	8	0,68	63	7	0,70	57	6	0,73
	30-20	87	14	0,55	80	13	0,55	73	12	0,56	67	11	0,58	61	10	0,59
	<20	108	35	0,24	100	33	0,25	91	30	0,26	83	27	0,28	77	26	0,27

Окончание таблицы 1.13

Индекс режима	Средняя влажность древесины, %	Номер режима и параметры (t, °С; Δt, °С; φ) сушильного агента											
		7			8			9			10		
		t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ	t	Δt	φ
А	>30	52	2	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30-20	55	4	0,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<20	70	20	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Б	>30	52	3	0,84	47	2	0,90	42	2	0,89	38	2	0,88
	30-20	55	5	0,76	50	5	0,75	45	4	0,79	41	4	0,77
	<20	70	21	0,33	62	18	0,36	57	17	0,36	52	16	0,36
В	>30	52	4	0,80	47	3	0,84	42	3	0,83	38	3	0,82
	30-20	55	7	0,68	50	6	0,70	45	5	0,74	41	5	0,72
	<20	70	22	0,31	62	19	0,33	57	18	0,34	52	17	0,33
Г	>30	52	5	0,75	47	4	0,79	42	4	0,77	38	4	0,76
	30-20	55	8	0,64	50	7	0,66	45	6	0,69	41	6	0,67
	<20	70	23	0,29	62	21	0,29	57	20	0,29	52	18	0,30
Д	>30	52	6	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30-20	55	9	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<20	70	24	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-

где t – температура по сухому термометру, °С;

Δt – психрометрическая разность, °С;

φ – степень насыщенности сушильного агента влагой.

Таблица 1.14 – Рекомендуемые режимы низкотемпературного процесса сушки для пиломатериалов лиственных пород [78]

Порода древесины	Категория режима	Толщина пиломатериалов, мм							
		до 22	св.22 до 32	св.32 до 40	св.40 до 50	св.50 до 60	св.60 до 70	св.70 до 75	св.75 до 100
Береза, ольха	М	6-Д	6-Г	6-В	6-В	7-В	8-В	-	-
	Н	3-Д	4-Г	4-В	5-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-Б
	Ф	2-Д	3-Г	3-В	4-В	-	-	-	-
Осина, липа, тополь	Н	3-Г	3-Б	4-Б	5-В	6-В	7-В	8-В	9-В
	Ф	2-Г	2-Б	3-Б	4-В	-	-	-	-
Бук, клен	Н	3-В	4-В	5-В	5-Б	6-Б	7-А	8-Б	-
	Ф	2-Г	3-В	4-В	-	-	-	-	-
Дуб, ильм	Н	5-Г	6-В	6-Б	7-Б	8-Б	9-В	10-Б	-
	Ф	3-Г	4-В	5-В	-	-	-	-	-
Орех	Н	5-В	5-Б	6-Г	6-Б	7-В	8-В	9-В	-
Граб, ясень	Н	6-В	6-А	7-Б	8-В	8-Б	9-В	10-В	-

Разработчики трехступенчатой системы режимов стремились предельно ее упростить с целью простоты ее реализации в условиях производства того времени (70 – 80 годы XX века). При этом условия были таковы, что системы автоматического управления процессом сушки были скорее чрезвычайной редкостью, вследствие малой их распространенности.

Современные же камеры, как правило, оборудованы различными системами автоматического управления технологическими процессами сушки, при этом может быть реализована любая структура режима. В таких условиях применение трехступенчатой структуры может считаться, мягко говоря, недостаточно оправданным.

Специфическим направлением интенсификации процесса сушки древесины является применение высокотемпературных режимов сушки, которые были популярными в 50 – 70 годы [85, 116].

Значительная часть исследований была посвящена высокотемпературной сушке хвойной древесины, но можно выделить часть работ посвященных лиственной древесине, в частности березы [3, 29, 35, 46, 69, 78, 85, 102, 104, 110, 117].

Режимы, которые были использованы авторами, можно подразделить на следующие виды (таблица 1.15):

Режим №1 – «Стационарный УЛТИ» [68];

Режим №2 – «Двухэтапный МЛТИ» [69];

Режим №3 – «Двухэтапный Яника» [120];

Режим №4 «Форсированный многоэтапный ЦНИИМОД» [38].

Таблица 1.15 – Характеристика высокотемпературных режимов сушки древесины березы

№ режима	Температура		Относительная влажность воздуха, %	Равновесная влажность древесины, %
	по сухому термометру, °С	по мокрому термометру, °С		
1	115	99 - 96	58 - 52	5,4
2	I – 104	99 - 96	84 - 75	10,0
	II - 115	99 - 96	58 - 52	5,4
3	I – 115	99 - 96	58 - 52	5,4
	II - 113	99 - 96	62 - 55	5,7
4	I – 190	90	69	7,6
	II - 195	90	58	5,5
	III - 180	90	49	4,5
	IV - 115	90	42	3,6
	V - 120	90	35	3,0
	VI - 125	90	30	2,5

Анализ данных таблицы 1.15 позволяет сделать следующие выводы:

1. Сушка режимом № 1 оказывает наименьшее влияние на прочность древесины, но в более толстых сортаментах влияние высокотемпературной сушки на физико-механические свойства древесины березы заметнее, чем в тонких сортаментах

2. Двухэтапный режим № 2 оказывает большее влияние на физико-механические свойства по сравнению с режимом № 1. Особенно заметно хуже показатели свойств древесины при скалывании вдоль волокон.

3. Режим № 3 приводит к достаточно существенным снижениям физико-механических свойств, что, видимо, объясняется не только и не столько температурными воздействиями или скоростью сушки, сколько динамикой развития, величиной и характером остаточных напряжений в древесине. На наш взгляд режим № 1 является наиболее эффективным за счет наименьшей продолжительности сушки.

В целом, с современных позиций, применение высокотемпературных режимов сушки нельзя считать достаточно эффективными, что наглядно показано в работе [116].

Вообще такая порода древесины как береза, вследствие ее высокой распространенности, во все времена была предметом исследования в части технологии сушки. В частности, значительный интерес представляют результаты исследования режимов сушки березовых пиломатериалов, выполненного на кафедре гидротермической обработки древесины МЛТИ. По результатам исследований была уточнена трехступенчатая структура режима в части некоторого увеличения температуры и оптимизирована степень насыщенности обрабатывающей среды (φ). Кроме того несколько изменены переходные влажности (таблица 1.16). Все это позволило

снизить продолжительность сушки на 16–18% при снижении себестоимости сушки [37].

Таблица 1.16 – Система трехступенчатых режимов сушки древесины березы

Средняя влажность древесины, %	Параметры режима	Номер режима						
		Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7
		Толщина пиломатериала, мм						
		до 22	свыше 22 до 25	свыше 25 до 32	свыше 32 до 40	свыше 40 до 50	свыше 50 до 60	свыше 60 до 70
Мягкие режимы								
>35	t	60	60	60	60	58	54	48
	Δt	9	8	7	6	6	5	4
	φ	0,61	0,65	0,69	0,73	0,73	0,76	0,79
32-25	t	65	64	64	64	62	58	52
	Δt	14	12	11	10	10	9	8
	φ	0,49	0,54	0,57	0,60	0,59	0,61	0,63
<25	t	82	80	80	80	78	72	64
	Δt	31	28	27	26	26	23	20
	φ	0,21	0,25	0,27	0,28	0,27	0,30	0,32
Нормальные режимы								
>35	t	76	75	73	70	64	58	50
	Δt	10	9	7	6	6	5	4
	φ	0,64	0,66	0,72	0,76	0,74	0,7	0,79
32-25	t	82	80	76	75	68	62	54
	Δt	16	14	12	11	10	9	8
	φ	0,49	0,53	0,57	0,61	0,61	0,62	0,64
<25	t	102	100	96	92	84	78	68
	Δt	36	34	32	28	26	25	22
	φ	0,21	0,32	0,24	0,274	0,29	0,29	0,31
Форсированные режимы								
>35	t	82	82	80	77	72	-	-
	Δt	10	8	7	5	5	-	-
	φ	0,66	0,71	0,73	0,77	0,79	-	-
32-25	t	88	86	84	80	74	-	-
	Δt	13	12	11	8	7	-	-
	φ	0,57	0,60	0,62	0,70	0,72	-	-
<25	t	110	108	104	100	94	-	-
	Δt	35	34	31	28	27	-	-
	φ	0,25	0,25	0,28	0,32	0,32	-	-

В конце 80-ых годов была предложена трехступенчатая структура режима, характерной особенностью которой является то, что температура по сухому термометру считается постоянной на всем протяжении процесса сушки, а психрометрическая разность возрастает от ступени к ступени [42, 43].

Анализ термодинамических сил, способствующих продвижению влаги к поверхности материала, также подтвердил целесообразность использования разработанной структуры построения режимов для ускорения процесса сушки.

Из уравнения

$$i = -(a_m \rho_0 \frac{du}{dx} + a_m \rho_0 \delta \frac{dt}{dx} + b \frac{dp}{dx}), \quad (1.1)$$

следует, что плотность потока влаги i зависит от коэффициентов a_m, δ, b .

где i – плотность потоков влаги;

a_m – коэффициент влагопроводности;

ρ_0 – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии;

u – влагосодержание древесины;

δ – коэффициент термовлагопроводности;

b – коэффициент молярного переноса;

p – избыточное давление внутри древесины.

Конечно, если учесть, что речь идет о конвективной сушке, действие перечисленных термодинамических сил оказывается неравноценным и на большом протяжении процесса сушки основным действующим фактором будет влагопроводность. Это и диктует необходимость поддерживать температуру по сухому термометру, максимально возможную для данной категории режима сушки. Функцией этой температуры, как известно, является температура самой древесины, с повышением которой возрастает коэффициент

влажнопроводности, что собственно и способствует интенсивному продвижению влаги из центральных слоев досок к наружным.

Использовать при сушке древесины березы подобную структуру предложил В.В. Сергеев [80], а затем О.А. Удачина [94], которая для сушки древесины березы предложила следующие режимы (таблица 1.17).

Таблица 1.17 – Режимы сушки заготовок из древесины березы
(толщина 32 – 40 мм)

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

Исследование показало высокую эффективность такой постановки режимов. Так, предложенная структура режимов позволяет снизить продолжительность сушки мягким режимом на 27%, нормальным и форсированным на 21,4 и 11,5 % соответственно. Качество сушки при применении нормального и форсированного режимов не ниже II категории, а мягким режимом не ниже I - II категории, но требует более длительного процесса.

Значительный интерес представляют исследования автора [94], посвященные вопросу совмещенной сушки – прогрева древесины. Но теоретические исследования данного вопроса проводились на модели древесины сосны и использование их результатов в случае сушки древесины березы вызывают некоторые сомнения.

Представляется перспективным направление с внедрением, так называемых бесступенчатых режимов сушки древесины, основоположником которых является А.Г. Гороховский [12, 13, 15, 17]. Однако исследований возможности применимости данного типа режимов для сушки древесины березы не проводилось.

1.3. Выводы и задачи исследований

На основании изучения состояния вопроса сделаны следующие выводы:

- 1.3.1. Среди прочих лиственных пород древесина березы занимает ведущее место, вследствие ее повсеместной распространённости, а также относительно высоких физико-механических свойств.
- 1.3.2. Относительно низкие сушильные свойства древесины березы позволяют считать ее трудносохнущей породой с возможным применением для ее сушки специальных режимов.
- 1.3.3. Применяемая до настоящего времени советская система трехступенчатых режимов недостаточно оправдана. Перспективным является применение бесступенчатых режимов.
- 1.3.4. Применение высокотемпературных режимов позволяет интенсифицировать процесс сушки, но существенно снижает физико-механические свойства высушиваемой древесины.
- 1.3.5. 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.
- 1.3.6. Сушка древесины в камерах малой мощности, как правило, предполагает отсутствие системы первоначального увлажнения агента сушки (в период прогрева), а также проведения

влажготеплообработок. Это требует проведения теоретических исследований в отношении совмещенной сушки-прогрева древесины.

На основании сделанных выводов сформулированы следующие 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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ

2.1. Теоретические исследования процесса совмещенной сушки-прогрева

Целью подобного исследования является определение факта возможности практически полного насыщения влагой, испаряемой из древесины, воздушного пространства сушильной камеры (речь идет о сушке древесины березы). При этом относительная влажность воздуха, разумеется, должна достигать $\varphi = 1,0$.

Известно, что жидкость в капиллярно-пористом теле перемещается в виде фильтрационного потока под действием силы тяжести, гидростатического давления (молекулярный или конвективный перенос) и путем капиллярного всасывания [52].

Величина капиллярного давления для вогнутого мениска смачивающей жидкости радиусом r определяется по соотношению Лапласа.

$$\rho_{\sigma} = -\frac{2\sigma}{r}, \quad (2.1)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения воды.

При сушке древесины влага удаляется сначала из более крупных, а затем из меньших по радиусу капилляров. Таким образом, с понижением влажности древесины капиллярное давление (2.1) постепенно возрастает.

Поэтому поток влаги j , перемещающейся в направлении градиента влажности $\frac{dw}{dx}$, можно в первом приближении принять равным

$$j = -D_k \frac{dw}{dx}, \quad (2.2)$$

где D_k – коэффициент влагопроводности.

Авторы работы [20] утверждают, что при анализе процессов сушки древесины обычно выделяют две зоны: поверхностную и внутреннюю. В поверхностной зоне плотность потока влаги пропорциональна градиенту влажности (2.2).

В.А. Баженов [7] называет поверхностную зону диффузной зоной, а П.С. Серговский [83] – зоной влагопроводности. Внутренняя зона, по мнению этих авторов, является капиллярной.

К древесине как к коллоидному телу, можно применить закон Фика [100, 105, 113], согласно которому при наличии градиента гигроскопической влажности возникает поток влаги W во время τ в направлении координаты x :

$$\frac{dw}{d\tau} = -D \frac{dw}{dx}, \quad (2.3)$$

где D – коэффициент диффузной влагопроводности.

Таким образом, потенциалом переноса влаги в древесине при изотермических условиях можно принять градиент влажности с различными коэффициентами влагопроводности, зависящими от значений влажности древесины [12, 41], ее температуры [20], направления потока влаги [112], плотности древесины [83], ее реологических свойств [91] и других факторов [6].

Для одномерной задачи при изотермических условиях можно применить линейное (с постоянными коэффициентами) дифференциальное уравнение в частных производных

$$\frac{dw}{d\tau} = D_k \frac{d^2w}{dx^2} + D_u \frac{d^2w}{dw^2} + D_m \frac{d^2w}{dw^2} \quad (2.4)$$

где D_k, D_u, D_m – соответственно, коэффициенты капиллярной, диффузионной и молярной влагопроводности;

x - координата по толщине бесконечной пластины;

ρ - давление.

Часто это уравнение (2.4) рассматривается в виде

$$\frac{dw}{d\tau} = D \frac{d^2w}{dx^2}, \quad (2.5)$$

то есть практически лишь с учетом диффузионной влагопроводности. Однако это достаточно обоснованно для случаев сушки древесины лишь с начальной влажностью ниже предела гигроскопичности.

Для низкотемпературных условий, которые более точно характеризуют процесс низкотемпературной сушки древесины, как правило, применяют систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса [12, 50, 52, 53, 105, 109, 111, 112].

При начальных граничных условиях III рода и условиях симметрии для случая сушки доски (прямоугольный параллелепипед).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \cdot r_{\phi} \cdot a_m}{c} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \quad (2.7)$$

$$t(x_0, 0) = f(x), \quad (2.8)$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad (2.9)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - t(R, \tau)] - (1 - \varepsilon) \rho \delta \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0 \quad (2.10)$$

$$a_m \frac{\partial u(R, \tau)}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} + \alpha_m [u(R, \tau) - u_p] = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial u(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (2.12)$$

где t – температура;

- u – влажность древесины;
 x – координата в направлении толщины досок, м;
 τ – время, с;
 a – коэффициент температуропроводности древесины, м²/с;
 a_m – коэффициент влагопроводности древесины, м²/с;
 c – теплоёмкость древесины, Дж/(кг·град К);
 δ – термоградиентный коэффициент;
 λ – коэффициент теплопроводности древесины, Вт/(м²·град);
 α – коэффициент теплообмена древесины, Вт/(м·град);
 ε – критерий фазового превращения;
 ρ – базисная плотность древесины, кг/м³;
 R – половина толщины доски, м;
 α_m – коэффициент влагообмена древесины, м/с;
 t_c – температура обрабатывающей среды, °С;
 r_ϕ – энергия фазового перехода (испарения), Дж/кг;
 u_p – равновесная влажность древесины.

Аналитическое решение уравнения вида (2.5) достаточно сложно даже при простейших начальных и граничных условиях, а систему (2.6 – 2.12) возможно решать только численными методами (см. гл. 3, 4).

Тем не менее, при некоторой идеализации условий (регулярный режим сушки, постоянное состояние среды и неизменный коэффициент влагопроводности по x и τ) И.В. Кречетов [41] утверждает, что для пластины (широкой доски) можно получить кривую влажности древесины по толщине доски в виде:

$$W_x = W_u - \left(\frac{x}{R}\right)^2 (W_u - W_n) \quad (2.13)$$

где W_x – локальная влажность древесины на расстоянии x от средней плоскости пластины в направлении, перпендикулярном поверхности;

R – половина толщины пластины;

W_u – влажность в центре пластины (максимальная);

W_n – влажность на поверхности пластины (минимальная);

$(W_u - W_n)$ – наибольший перепад влажности по толщине пластины.

При этом в работе [20] отмечается, что, по мнению И.В. Кречетова, для периода испарения свободной влаги, то есть при влажности древесины

$$W_{др} \gg W_{н.з.}$$

$$W_x = W_u - bx^4 \quad (2.14)$$

где b – некоторый коэффициент.

В дальнейшем мы будем рассматривать случай сушки, когда $W_n \approx W_{н.з.}$, что соответствует случаю, когда $\varphi = 1,0$.

Так как площадь параболы составляет $\frac{2}{3}$ площади прямоугольника того же основания и высоты, средняя влажность древесины в процессе сушки W_{cp} может быть определена на основе максимальной ее влажности в центральной части доски и минимальной на ее поверхности W_n .

$$W_{cp} = \frac{2}{3}(W_u - W_n) + W_n \quad (2.15)$$

О влажности поверхности сохнущей древесины можно судить по величине равновесной влажности среды W_p .

Причем, в первом приближении

$$W_n \approx W_p \quad (2.16)$$

Конечно, с учетом гистерезиса влажности ΔW_p [83], фактически W_n будет несколько выше, чем W_p , но этим можно пренебречь (обычно $\Delta W_p \approx 1\%$)

Теперь, если заменить W_n близкой ей W_p , получим:

$$W_{cp} = \frac{2}{3}W_u + \frac{1}{3}W_p = \frac{1}{3}(2W_u + W_p) \quad (2.17)$$

Тогда влажность в середине материала составит:

$$W_u = \frac{1}{2}W_u(3W_{cp} - W_p) \quad (2.18)$$

Вычитая из обеих частей этого уравнения величину $W_n \approx W_p$, получим значение перепада влажности по толщине пиломатериала

$$W_u - W_n = \frac{3}{2}(W_{cp} - W_p) \quad (2.19)$$

то есть перепад влажности $W_u - W_n$ равен полуторной разности средней влажности материала и равновесной влажности воздуха.

И.В. Кречетов [41] делает также важнейший по значимости вывод о том, что из закономерности параболического распределения гигроскопической влаги по толщине пиломатериала следует, что точка средней влажности древесины будет находиться на расстоянии 0,21 толщины доски, считая от ее поверхности (рисунок 2.1).

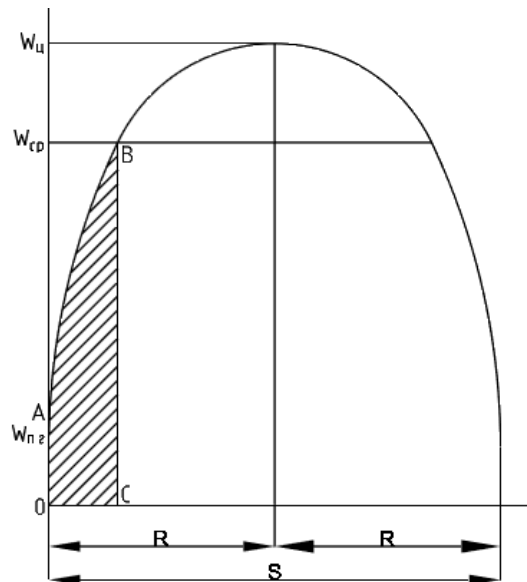


Рисунок 2.1 – Схема расчета влажности поверхностной зоны доски

W_u - влажность центральных слоев;

$W_{п.г.}$ - влажность предела гигроскопичности;

W_{cp} - средняя влажность древесины;

R – половина толщины доски;

S – толщина доски.

Определим влажность поверхностной зоны древесины для материала следующей характеристики:

- порода древесины - береза,

- $S = 40$ мм

- $W_{ц} = 80\%$

- $W_{п} = 30\%$

- $\rho_b = 500$ кг/м³

- $x = 0,21 S = 0,42 R$

при этом $\left(\frac{x}{R}\right)^2 = 0,18$

$$W_{cp} = W_{ц}0,18 (W_{ц}-W_{п}) = 71\%.$$

Если фигуру OABC заменить трапецией, то среднюю влажность поверхности зоны можно определить как среднюю линию $\frac{30+71}{2} = 50\%$, что в принципе, близко к данным работы [20] – 57%.

Если учесть, что эти данные соответствуют породе сосна, то есть в 1 м³ поверхностной зоны условного пиломатериала будет содержаться 228 кг влаги. В нашем случае (береза, 40 мм) количество влаги в 1 м³ поверхностной зоны пиломатериала будет содержаться 250 кг.

Таким образом, совмещенная сушка-прогрев березовых пиломатериалов не просто возможна, но даже несколько более эффективна, чем сосновых.

2.2. Теоретические исследования оперативного метода интегральной оценки влажности древесины в штабеле пиломатериалов

При управлении процессом сушки пиломатериалов изменение текущих значений параметров среды обычно происходит в функции текущей влажности древесины.

Известно довольно много способов оперативного контроля влажности древесины в процессе ее сушки [8]. Практическое значение имеет метод контроля влажности кондуктометрическими датчиками и, в настоящее время, он наиболее распространен в промышленности.

Проблема их применения заключается в том, что количество таких датчиков, устанавливаемых на доски штабеля, составляет от 3 до 12. В то же время количество досок, одновременно подвергающихся сушке в камере, может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч (в зависимости от объема камеры). Разумеется, при таком положении дел, точность контроля интегральной влажности древесины в сохнувшем штабеле оставляет желать лучшего.

В работе [12] был предложен метод оперативного контроля интегральной влажности штабеля пиломатериалов. Метод основан на одновременном измерении температуры воздушного потока на входе в штабель сохнувших пиломатериалов и выходе их него. Разность температуры на штабеле однозначно коррелирует с влажностью древесины. Данной тематикой занимались и другие авторы [1, 75, 26].

Метод был опробован в процессе сушки сосновых пиломатериалов и показал высокие метрологические характеристики. Какие либо данные о возможности применения данного метода для контроля сушки древесины березы в литературе отсутствуют.

Для расчета величины текущей влажности сохнувшей древесины А.Г. Гороховским [12] была предложена следующая формула:

$$W = W_p - \frac{100\rho_1 \cdot T \cdot \omega_{\text{ц}} \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m}\right)}{(B \cdot \rho_6 \cdot S_2 \cdot (d+1000))} \quad (2.20)$$

где B – коэффициент.

$$B = \frac{1,93 \cdot 10^{-3} t + 3,72 \cdot 10^{-6} t \cdot d + 4,8 \cdot 10^{-3}}{(1,0 + 1,93 \cdot 10^{-3} \cdot d)^2} \quad (2.21)$$

ρ_6 – базисная плотность древесины, кг/м³;

S_2 – ширина сортимента, м;

S_1 – толщина сортимента, м;

T – толщина прокладки, м;

ρ_1 – плотность сушильного агента на входе штабель, кг/м³;

$\omega_{\text{ц}}$ – скорость циркуляции сушильного агента, м/с;

a_m – коэффициент теплопроводности древесины, м²/с;

α_m – коэффициент влагообмена, м/с;

Δt – разность температуры сушильного агента на входе и выходе из штабеля, °С;

t – температура сушильного агента на входе в штабель, °С;

Произведем метрологическую оценку точности контроля текущей влажности. Для этого найдем полный дифференциал функции (2.20).

Он равен:

$$\begin{aligned} dW = & \frac{\partial W}{\partial \rho_1} d\rho_1 + \frac{\partial W}{\partial T} dT + \frac{\partial W}{\partial \omega_{\text{ц}}} d\omega_{\text{ц}} + \frac{\partial W}{\partial (\Delta t)} d(\Delta t) + \frac{\partial W}{\partial \rho_6} d\rho_6 + \frac{\partial W}{\partial S_2} dS_2 + \\ & + \frac{\partial W}{\partial d} dd + \frac{\partial W}{\partial S_1} dS_1 + \frac{\partial W}{\partial a_m} da_m + \frac{\partial W}{\partial \alpha_m} d\alpha_m + \frac{\partial W}{\partial B} dB + \frac{\partial W}{\partial W_p} dW_p \end{aligned} \quad (2.22),$$

где $\frac{\partial W}{\partial \rho_1} d\rho_1, \dots, \frac{\partial W}{\partial W_p} dW_p$ – частные дифференциалы по ρ_1, \dots, W_p .

Эти частные дифференциалы равны:

$$\partial W_1 = -\frac{100T\omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 \cdot (d+1000)} d\rho_1, \quad (2.23)$$

$$\partial W_2 = -\frac{100\rho_1 \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 \cdot (d+1000)} dT, \quad (2.24)$$

$$\partial W_3 = -\frac{100\rho_1 T \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)} d\omega_y, \quad (2.25)$$

$$\partial W_4 = -\frac{100\rho_1 T \omega_y \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)} d\Delta t, \quad (2.26)$$

$$\partial W_5 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{BS_2 (d+1000) \rho_{\bar{\sigma}}^2} d\rho_{\bar{\sigma}}, \quad (2.27)$$

$$\partial W_6 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} (d+1000) S_2^2} dS_2, \quad (2.28)$$

$$\partial W_7 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)^2} dd, \quad (2.29)$$

$$\partial W_8 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000) \pi^2 a_m} dS_1, \quad (2.30)$$

$$\partial W_9 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t S_1}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000) \pi a_m} da_m, \quad (2.31)$$

$$\partial W_{10} = \frac{100\rho_1 T \omega_u \Delta t}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)\alpha_m^2} d\alpha_m, \quad (2.32)$$

$$\partial W_{11} = \frac{100\rho_1 T \omega_u \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000) B^2} dB, \quad (2.33)$$

$$\partial W_{12} = dW_p, \quad (2.34)$$

Уравнение (2.22) в приращениях имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} dW = & \frac{\partial W}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial W}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial W}{\partial \omega_u} \Delta \omega_u + \frac{\partial W}{\partial (\Delta t)} \Delta (\Delta t) + \frac{\partial W}{\partial \rho_{\bar{\sigma}}} \Delta \rho_{\bar{\sigma}} + \frac{\partial W}{\partial S_2} \Delta S_2 + \\ & + \frac{\partial W}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial W}{\partial S_1} \Delta S_1 + \frac{\partial W}{\partial a_m} \Delta a_m + \frac{\partial W}{\partial \alpha_m} \Delta \alpha_m + \frac{\partial W}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial W}{\partial W_p} \Delta W_p \end{aligned} \quad (2.35)$$

где $\Delta \rho_1, \dots, \Delta W_p$ – ошибки определения измерения параметров, соответственно, ρ_1, \dots, W_p ;

ΔW – полная ошибка определения текущей влажности, обусловленная ошибками определения (измерения) параметров ρ_1, \dots, W_p .

Соответственно:

$$\Delta W_1 = - \frac{100 T \omega_u \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)} \Delta \rho_1, \quad (2.36)$$

$$\Delta W_2 = - \frac{100 \rho_1 \omega_u \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)} \Delta T, \quad (2.37)$$

$$\Delta W_3 = - \frac{100 \rho_1 T \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_{\bar{\sigma}} S_2 (d+1000)} \Delta \omega_u, \quad (2.38)$$

$$\Delta W_4 = -\frac{100\rho_1 T \omega_y \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_\sigma S_2 (d+1000)} \Delta \Delta t, \quad (2.39)$$

$$\Delta W_5 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B S_2 (d+1000) \rho_\sigma^2} \Delta \rho_\sigma, \quad (2.40)$$

$$\Delta W_6 = \frac{100 \cdot \rho_1 \cdot T \cdot \omega_y \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B \cdot \rho_\sigma \cdot (d+1000) \cdot S_2^2} \Delta S_2, \quad (2.41)$$

$$\Delta W_7 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{B\rho_\sigma S_2 (d+1000)^2} \Delta d, \quad (2.42)$$

$$\Delta W_8 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t}{B\rho_\sigma S_2 (d+1000) \pi^2 a_m} \Delta S_1, \quad (2.43)$$

$$\Delta W_9 = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t S_1}{B\rho_\sigma S_2 (d+1000) \pi a_m} \Delta a_m, \quad (2.44)$$

$$\Delta W_{10} = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t}{B\rho_\sigma S_2 (d+1000) \alpha_m^2} \Delta \alpha_m, \quad (2.45)$$

$$\Delta W_{11} = \frac{100\rho_1 T \omega_y \Delta t \left(\frac{S_1}{\pi^2 a_m} + \frac{1}{2\alpha_m} \right)}{\rho_\sigma S_2 (d+1000) B^2} \Delta B, \quad (2.46)$$

$$\Delta W_{12} = \Delta W_p, \quad (2.47)$$

Полная ошибка определения текущей влажности древесины:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots + \Delta W_{12}, \quad (2.48)$$

где $\Delta W_1, \dots, \Delta W_{12}$ - составляющие погрешности определения текущей влажности, обусловленные погрешностями определения параметров ρ_1, \dots, W_p .

Методически более правильно вычислять ошибку определения текущей влажности как среднеквадратическую, то есть:

$$\Delta W^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \Delta W_i^2}, \quad (2.49)$$

При этом составляющие ошибки складываются как векторные величины.

Из уравнений (2.36) — (2.47) следует, что составляющие полной ошибки определения текущей влажности зависят от целого ряда параметров. Данные параметры можно условно подразделить на следующие группы:

- параметры, определяемые древесиной (ρ_b, a_m);
- параметры, определяемые геометрией высушиваемых сортиментов (S_1, S_2, T);
- параметры, относящиеся к агенту сушки ($t, \Delta t, d, \rho_1, \alpha_m, W_p, \omega_u$).

В свою очередь ряд параметров, относящихся к агенту сушки, являются зависимыми от других параметров. Так, например:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= f_1(\varphi, t) \\ W_p &= f_2(\varphi) \\ \alpha_m &= f_3(\varphi, \omega_u, t) \\ d &= f_4(\varphi) \end{aligned}$$

где φ – степень насыщенности агента сушки.

Для частной количественной оценки ошибки определения текущей влажности был произведен ее расчет при следующих условиях:

- порода древесины — береза;

- $\rho_6 = 500 \text{ кг/м}^3$;
- режим сушки – 5В [78];
- скорость циркуляции агента сушки $\omega_{\text{ц}} = 2,0 \text{ м/с}$;
- толщина сортиментов $S_1 = 0,05 \text{ м}$;
- ширина сортиментов $S_2 = 0,15 \text{ м}$;
- толщина прокладок $T = 0,025 \text{ м}$;
- влажность древесины:
 - начальная $W_{\text{н}} = 35 \%$;
 - переходная $W_{\text{п}} = 25 \%$;
 - конечная $W_{\text{к}} = 8 \%$.

Для указанных условий вычислены частные дифференциалы и составляющие ошибки определения влажности древесины. Результаты расчетов приведены в таблице 2.1. Данные предельной погрешности факторов определены либо точностью их измерения, либо точностью вычисления через измеряемые параметры.

Анализ данных таблицы 2.1 показывает, что влияние погрешностей определения различных параметров неодинаково.

Так, например, реальные погрешности в определении коэффициента влагопроводности древесины и коэффициента влагообмена практически не влияют на ошибку определения влажности древесины (значения составляющих ошибки 0,0004 % и менее).

В то же время погрешности определения базисной плотности древесины дают составляющую ошибки определения влажности древесины от 0,5 до несколько более чем 2%. Суммарная предельная (среднеквадратическая) ошибка определения текущей влажности находится в пределах от 1,45 (0,7) % в конце сушки до 5,4 (2,49) % в конце первой ступени сушки.

Общую метрологическую оценку метода следует считать вполне удовлетворительной.

Таблица 2.1 - Ошибка определения влажности древесины березы

Влажность древесины, %	$\frac{\partial W}{\partial \rho}$, %м ³ /кг	$\Delta \rho_1$, кг/м ³	ΔW_1 , %	$\frac{\partial W}{\partial T}$, %/М	ΔT , м	ΔW_2 , %	$\frac{\partial W}{\partial \omega_y}$, %·с/м
8	- 4,147	0,008	- 0,0332	- 1,8112	0,001	- 0,0018	- 1,8112
25	- 8,009	0,008	- 0,0641	- 3,6063	0,001	- 0,0036	- 3,6063
35	- 18,227	0,008	- 0,146	- 8,4798	0,001	- 0,0085	- 8,4798

Продолжение таблицы 2.1

Влажность древесины, %	$\Delta \omega_{ц}$, м/с	ΔW_3 , %	$\frac{\partial W}{\partial (\Delta t)}$, % / °С	$\Delta \Delta t$, °С	ΔW_4 , %	$\frac{\partial W}{\partial \rho_6}$, %·м ³ /кг	$\Delta \rho_6$, кг/м ³
8	0,1	- 0,181	- 4,957	0,1	- 0,4957	0,0091	50
25	0,1	- 0,361	- 8,827	0,1	- 0,8827	0,0180	50
35	0,1	- 0,848	- 11,103	0,1	- 1,1103	0,0427	50

Продолжение таблицы 2.1

Влажность древесины, %	$\Delta W_5,$ %	$\frac{\partial W}{\partial S_2},$ %/м	$\Delta S_2,$ м	$\Delta W_6,$ %	$\frac{\partial W}{\partial d},$ %·кг/г	$\Delta d,$ г/кг	$\Delta W_7,$ %
8	0,455	2,012	0,005	- 0,0106	$3,25 \cdot 10^{-3}$	5	0,0163
25	0,9	4,007	0,005	- 0,0204	$4,43 \cdot 10^{-3}$	8	0,0354
35	2,135	9,422	0,005	- 0,0471	$1,63 \cdot 10^{-2}$	11	0,1790

Продолжение таблицы 2.1

Влажность древесины, %	$\frac{\partial W}{\partial S_1},$ %/м	$\Delta S_1,$ м	$\Delta W_8,$ %	$\frac{\partial W}{\partial a_m},$ %·с / м ²	$\Delta a_m,$ м ² /с	$\Delta W_9,$ %	$\frac{\partial W}{\partial \alpha_m},$ %·с / м
8	69,458	0,001	0,0695	0,1247	$2 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	234,4
25	128,863	0,001	0,1289	0,3568	$2 \cdot 10^{-10}$	$7,1 \cdot 10^{-11}$	5151,3
35	294,440	0,001	0,2944	0,9568	$2 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$	22290

Продолжение таблицы 2.1

Влажность древесины, %	$\Delta\alpha_m$, м/с	ΔW_{10} , %	$\frac{\partial W}{\partial B}$, %·кг/ч·м ²	ΔB , г·°C/кг	ΔW_{11} , %	$\frac{\partial W}{\partial W_p}$, % / %	ΔW_p , %
8	$2 \cdot 10^{-7}$	$4,69 \cdot 10^{-5}$	1,852	$7,91 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	1	0,1
25	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	4,029	$7,87 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	1	0,1
35	$2 \cdot 10^{-7}$	$4,46 \cdot 10^{-3}$	9,198	$7,86 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-3}$	1	0,1

Окончание таблицы 2.1

Влажность древесины, %	ΔW_{12} , %	$\Delta W = \sum_{i=1}^{12} \Delta W_i$, %	$\Delta W^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \Delta W_i^2}$
8	0,1	1,45	0,7
25	0,1	2,67	1,31
35	0,1	5,40	2,49

2.3. Выводы

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

2.3.2. 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.

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

2.3.4. 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.

3. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на двух предприятиях:

- Режевской леспромхоз (г. Реж, Свердловская область);
- ООО «НИКРЕС» (г. Первоуральск, Свердловская область).

3.1.1. Описание сушильного оборудования, применяемого при проведении экспериментов

Для проведения экспериментов по сушке пиломатериалов древесины березы в Режевском леспромхозе использовалась камера MGR – 50 (таблица 3.1, рисунки 3.1 - 3.6). Техническая характеристика системы автоматического управления данной камеры приведена в таблице 3.2.

В ООО «НИКРЕС» была использована сушильная камера Урал – 30, изготовленная по проекту ООО «ПКТБ - ЛЕСПРОМ», ее техническая характеристика приведена в таблице 3.3.

3.1.2. Проведение процесса и контроль показателей качества сушки

При проведении экспериментов были использованы две структуры режима:

- нормативная (по документации сушильной камеры);
- структура бесступенчатого режима.

После определения режимных параметров их значения вводятся в систему управления камерой и далее сушка проводится в автоматическом режиме.

Таблица 3.1 - Технические характеристики сушильной камеры MGR – 50

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Величина
1.	Размеры загрузочного пространства сушильной камеры (ширина × глубина × высота)	мм	6600 × 6100 × 4100
2.	Вместимость камеры при сушке досок (25 мм /50мм) при толщине прокладок 25 мм	м ³	42/54
3.	Производительность камеры в условном пиломатериале	м ³ /год	2575
4.	Максимальная потребляемая тепловая мощность	ккал/ час	300 000
5.	Способ загрузки камеры	-	Фронтальная, погрузчиком
6.	Габаритный размер сушильного пакета	мм	1300 × 1200 × 6000
7.	Количество сушильных штабелей	шт.	9
8.	Теплоноситель	-	Горячая вода
9.	Тип теплообменника (материал)	-	Биметаллический (сталь - алюминий)

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Величина
10.	Количество теплообменников в камере	шт.	2
11.	Температура теплоносителя	°С	90-95
12.	Производительность вентилятора	м ³ /час	30 000
13.	Диаметр лопастей вентилятора	мм	800
14.	Число оборотов вентилятора	мин ⁻¹	1450
15.	Мощность электродвигателя вентилятора	кВт	3
16.	Количество вентиляторов в камере	шт.	4
17.	Суммарная установленная мощность (в т.ч. электродвигателей, КИПиА)	кВт	12,5 12,0 0,5
18.	Напряжение питания	Вт	380
19	Допустимые колебания напряжения питания от номинала	%	±10
20.	Количество форсунок увлажнения в камере	шт.	4

Окончание таблицы 3.1

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Величина
21.	Количество датчиков температуры	шт.	2
22.	Количество датчиков влажности воздуха	шт.	2
23.	Количество дистанционных датчиков влажности древесины	шт.	6
24.	Расчетная скорость циркуляции агента сушки через штабель	м/с	2,8
25	Управление режимом сушки	-	Автоматическое



Рисунок 3.1 - Общий вид сушильного хозяйства Режевского леспромхоза



Рисунок 3.2 – Сушильная камера MGR-50



Рисунок 3.3 - Вентиляторные узлы камеры MGR-50



Рисунок 3.4 – Устройство верхнего циркуляционного канала камеры MGR-50

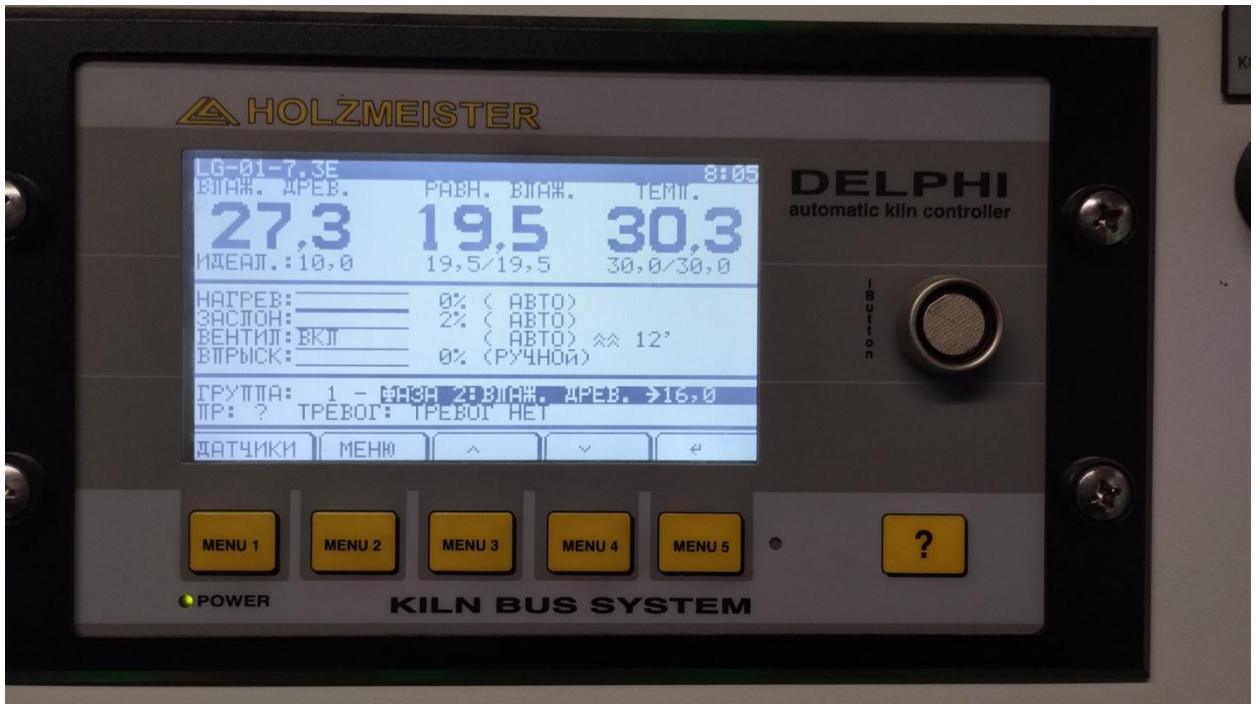


Рисунок 3.5 – Показания системы автоматического управления камерой MGR-50



Рисунок 3.6 - Пульта управления камерой MGR-50

Таблица 3.2 - Технические характеристики системы автоматического управления процессом сушки

№ п/п	Наименование параметра	Величина параметра
1.	Наименование системы	DELPHI
2.	Питание	24V ± 20%
3.	Диапазон измерения температуры сушильной камеры	0...130 °С
4.	Диапазон измерения влажности	6 ... 90% (при t = 25 °С)
5.	Диапазон измерения равновесной влажности	4 ... 30% (при t = 25 °С)
6.	Количество датчиков влажности	6
7.	Датчики температуры сушильной камеры	5
8.	Цифровой интерфейс для прямого подключения к ПК	RS 232
9.	Визуализация	TFT графический дисплей 240 × 128 пикселей В/В
10.	Специальные функции	1. Разъем для системы памяти iButton 2. Программа управления через систему iButton

Таблица 3.3 - Техническая характеристика лесосушильной камеры
УРАЛ – 30 [59]

№ 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 ³	до 2000
3.	Мощность электродвигателя в условном пиломатериале	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 ³ условного пиломатериала	Гкал/м ³	0,38
8.	Масса	т	15,4

Контроль влажности высушиваемых пиломатериалов проводился по методике РТМ [78], а также по ГОСТ 16588 – 91 [22] при выпилке секций влажности в них не должно быть пороков по ГОСТ 2140 – 81 [24]. Для контроля влажности использовался поверенный электронный влагомер фирмы Vagner (США).

Контроль остаточных напряжений также проводился по методике РТМ [78].

3.2 Статистическая обработка экспериментальных данных

При анализе результатов эксперимента определялись следующие статистические характеристики рассматриваемых выборок [70].

1. Среднее арифметическое

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3.1)$$

где y_i – значение i -ого элемента выборки;

n - количество элементов выборки.

2. Среднеквадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

3. Коэффициент вариации

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \% \quad (3.3)$$

4. Среднеквадратическая ошибка среднего значения

$$S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

5. Ошибка среднеквадратического отклонения

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{2n}} \quad (3.5)$$

6. Величина доверительного интервала для математического ожидания

$$\bar{y} - t \frac{S}{\sqrt{n}} \leq M_y \leq \bar{y} + t \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

где M_y – математическое ожидание;

t – критерий Стьюдента.

7. Определение необходимого объема выборки

$$n = \frac{t^2 S^2}{\Delta} \quad (3.7)$$

где $\Delta \leq M_y - \bar{y}$

8. Отбрасывание грубых наблюдений

$$t_{\text{рас}} = \frac{|y_i - \bar{y}|}{S} \quad (3.8)$$

Если $t_{\text{рас}} > t_{\text{таб}}$, то рассматриваемый результат является промахом и может быть исключен из выборки (где $t_{\text{таб}}$ – табличное значение

критерия Стьюдента, определяемое по выбранному уровню значимости и числу степеней свободы).

3.3. Проверка нормальности распределения

Проверка нормальности распределения проводилась при помощи критерия χ^2 Пирсона. Диапазон изменения данной выборки на i - интервалов так, чтобы эти интервалы покрывали от $-\infty$ до $+\infty$ и в каждый интервал попало не менее 5 значений данной величины.

Затем подсчитывается количество m_i наблюдений, попавших в каждый интервал, и вычисляются теоретические вероятности попадания случайной величины в каждый i -ый интервал по формуле

$$p_i = \phi(z_2) - \Phi(z_1) \quad (3.9)$$

где $z_1 = \frac{Y_i^H - \bar{y}}{s}$; $z_2 = \frac{Y_i^B - \bar{y}}{s}$;

Y_i^H - нижняя граница i -ого интервала

Y_i^B - верхняя граница i -ого интервала

$\Phi(z)$ – нормированная функция Лапласа:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-x^2/2} dx \quad (3.10)$$

Значения ее определяются для $z = z_1$ и $z = z_2$ из таблиц [70].

$$\chi_{\text{рас}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^l (m_i - p_i n)^2}{p_i n} \quad (3.11)$$

По выбранному уровню значимости q и числу степеней свободы из таблиц [70] определяется $\chi_{\text{таб}}^2$. Гипотезу о нормальности распределения можно принять если $\chi_{\text{рас}}^2 < \chi_{\text{таб}}^2$.

3.4. Построение бесступенчатых режимов сушки березовых пиломатериалов

Структура и параметры бесступенчатых режимов сушки пиломатериалов может существенно отличаться от, например, стандартных трехступенчатых режимов [78].

Проведенные исследования технологии бесступенчатых режимов [79, 103] показали, что наиболее эффективно задавать режим сушки через два параметра:

- температуру по сухому термометру;
- равновесную влажность древесины.

При этом указанные параметры режима обычно задаются функциями от величины текущей влажности древесины. Это было определено еще основоположниками науки о сушке древесины [5, 39, 101].

При этом исследователи [79, 103] рекомендуют температуру среды аппроксимировать выражением вида:

$$t_C = t_{CH} + (t_{CK} + t_{CH}) \frac{U_H - U_T}{U_H - U_K} \quad (3.12)$$

где t_{CH} – начальное значение температуры среды, °С

t_{CK} – конечное значение температуры среды, °С

U_H – начальное значение влажности древесины;

U_K – конечное значение влажности древесины;

U_T – текущее значение влажности древесины в процессе сушки.

Функциональное значение равновесной влажности обычно задавалось выражением вида функции желательности [71].

$$W_P = W_{PK} + (W_{PH} - W_{PK}) \cdot e^{-e^{-(b_0 + b_1 U_T)}} \quad (3.13)$$

где W_{PH} - начальное значение равновесной влажности древесины, %

W_{PK} - конечное значение равновесной влажности древесины, %
 b_1, b_0 - коэффициенты.

Использование функции желательности для описания равновесной влажности древесины, безусловно, эффективно. Однако описательно сложно и требует вычисления коэффициентов (b_0, b_1) для каждого нового режима сушки.

В. В. Сергеев предложил при использовании камер малой мощности [80] следующее выражение для определения текущего значения равновесной влажности.

$$W_P = W_{PH} \cdot e^{-a(U_H - U_T)} \quad (3.14)$$

Таким образом, величина параметров бесступенчатого режима сушки может быть достаточно просто задана и вычислена в функции текущей влажности сохнувшей древесины.

3.5. Вычислительный эксперимент

В работе [12] однозначно утверждается, что задача повышения показателей эффективности и качества 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 [71]. 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 тепломассобмена, используемая обычно для анализа процессов сушки капиллярно-пористого коллоидного тела (2.6) – (2.12).

Выше уже отмечалось (см. главу 2), что аналитическое решение подобной системы уравнений практически невозможно [51, 55], однако возможно самое широкое применение численных методов [12, 47, 61, 66, 86, 103].

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

- a_m - коэффициент влагопроводности;
- a – коэффициент температуропроводности;
- c – удельная теплоемкость древесины;
- δ - термоградиентный коэффициент.

Некоторые влагопереносные характеристики древесины различных пород были получены А.Г. Гороховским [12] на модели капиллярно-пористой структуры древесины. Из прочих лиственных пород такие характеристики были получены для древесины березы.

На рисунке 3.7 приведены значения коэффициента влагопроводности для различных пород древесины, которые в функции влажности для древесины березы оцениваются следующим уравнением регрессии [12]:

$$\bar{a}_m = -1,302 - 10^{-9}W^5 + 4,958 \times 10^{-7}W^4 - 5,502 - 10^{-3}W^3 + 1,904 \times 10^{-3}W^2 + 7,601W + 0,163 \quad (3.15)$$

где W – влажность древесины.

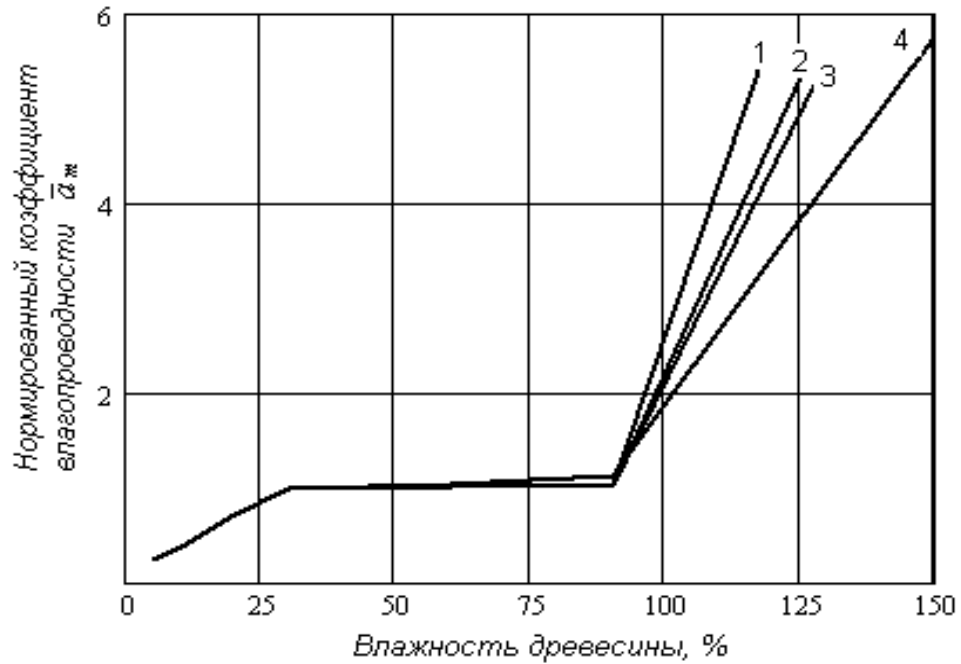


Рисунок 3.7 - Зависимость нормированного коэффициента влагопроводности от влажности древесины [12]:

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

Что касается расчетной величины критерия фазового превращения (рисунок 3.8), то она также зависит от влажности.

Уравнение регрессии для величины критерия фазового превращения древесины березы выглядит следующим образом [12].

$$\varepsilon = -1,411 \cdot 10^{-8} W^4 + 4,99 \cdot 10^{-6} W^3 - 5,975 \cdot 10^{-4} W^2 + 0,024W + 0,42 \quad (3.16)$$

Аналитическая зависимость коэффициента влагопроводности от температуры для древесины березы получена на основании графиков Р.П. Алпаткиной [112].

$$a'_m = (1,271T - 407,983) \cdot 10^{-7} M^2 / \varphi \quad (3.17)$$

где T – температура, °С.

Расчетное значение a_m может быть определено как

$$a_m = a'_m \cdot \bar{a}_m \quad (3.18)$$

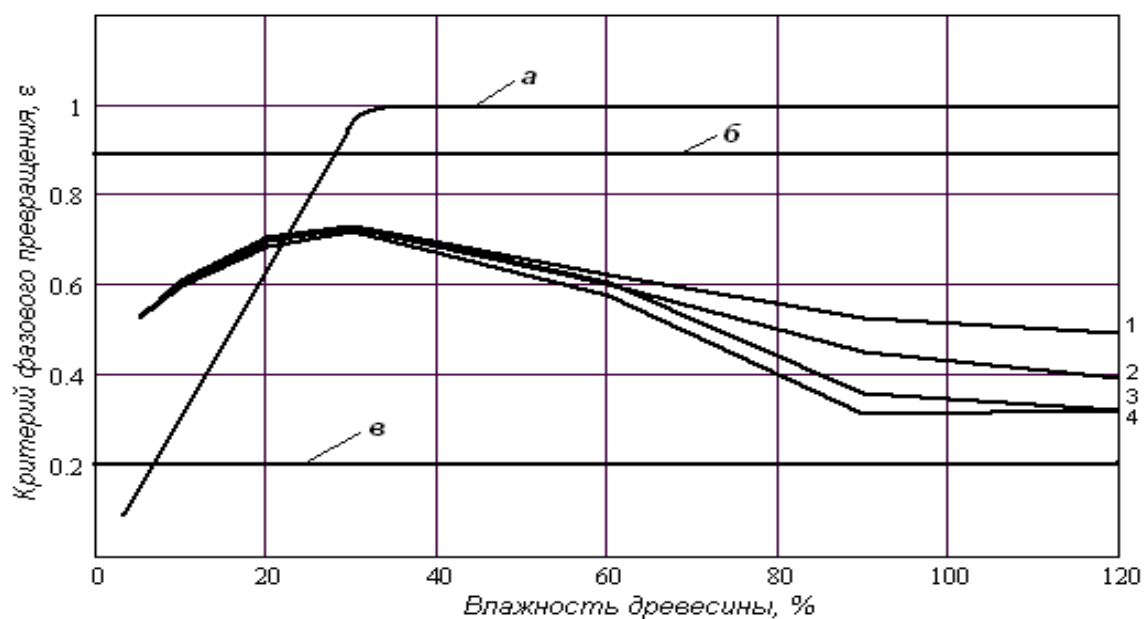


Рисунок 3.8 - Зависимость критерия фазового превращения от влажности древесины [10]:

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

а – данные W. Wissmann;

б – данные В.В. Сергеева;

в – данные А.В. Лыкова и Ю.А. Михайлова.

Для решения приведенной выше системы (2.6) – (2.12) была разработана специальная программа в вычислительной среде MathCAD [2, 34].

Решение проводилось по конечно-разностной схеме с введением виртуальных точек [11, 45, 47, 61, 66, 99, 118].

Исходными данными при решении системы дифференциальных уравнений в вычислительной среде MatCAD являлись следующие параметры:

- порода древесины;
- толщина доски;
- шаг по времени;

- параметры закона изменения температуры в функции средней влажности пиломатериалов;

- параметры закона изменения равновесной влажности в функции средней влажности пиломатериалов;

- теплота фазового перехода.

В процессе промежуточных вычислений определялись:

- удельная теплоемкость древесины;

- коэффициент теплопроводности древесины;

- коэффициент температуропроводности древесины;

- термоградиентный коэффициент;

- коэффициент влагопроводности древесины;

- равновесная влажность;

- температура среды;

- коэффициент теплообмена;

- коэффициент влагообмена.

Выходные параметры, полученные в результате решения системы дифференциальных уравнений (2.6) – (2.12) в вычислительной среде MatCAD:

- средняя влажность древесины в сохнувшем сорimente;

- продолжительность сушки до заданной средней конечной влажности;

- перепад влажности по толщине доски (по методике РТМ [78]);

- среднеквадратическое отклонение средней влажности древесины в штабеле.

Промежуточные вычисления при решении (2.6) – (2.12) осуществлялись по следующим формулам:

Удельная теплоемкость, C , Дж/ (кг·град):

$$C = 3,5t + 3200 - 2,18 \cdot 10^2 (130 - 100u)^{2,28} \quad (3.19)$$

Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·град) (при $\rho_6 = 500$ кг/м³):

$$\lambda = (0,00131u + 0,0009)t + 10^{0,2951g100u-1,022} \quad (3.20)$$

Термоградиентный коэффициент, δ , град⁻¹:

$$\delta = \{ (5,55 - 0,013t) - 2,42 \cdot 10^{-3} [100u - (72 - 0,35t)]^2 \} \cdot 10^{-2} \quad (3.21)$$

Коэффициент теплообмена, α , Вт/(м²·град):

$$\alpha = 8,35(0,00625t_c + 2,1) \left(\frac{V_u}{0,0083t_c + 1,37} \right)^{0,8} \cdot l^{0,2} \quad (3.22)$$

Равновесная влажность, W_p , % (только для пересчета по известным φ и t_c):

$$W_p = 10,6^\varphi (0,0327 - 0,00015t_c) \cdot 100 \quad (3.23)$$

Коэффициент температуропроводности, a , м²/с (при $\rho_6 = 500$ кг/м³):

$$a = [(0,523 \cdot 10^{-2}u - 0,0005)t + (1,76 - 0,6u)] \cdot 10^{-7} \quad (3.24)$$

Поправка на плотность при определении, λ , $K_{\rho\lambda}$:

$$K_{\rho\lambda} = \frac{1}{1,864 - 0,00115\rho_6} \quad (3.25)$$

Поправка на плотность при определении, a , $K_{\rho a}$:

$$\text{- при } \rho_6 < 500 \text{ кг/м}^3 \quad K_{\rho a} = 1,9 - 0,00205\rho_6 \quad (3.26)$$

$$\text{- при } \rho_6 > 500 \text{ кг/м}^3 \quad K_{\rho a} = 0,98 \quad (3.27)$$

где t – температура древесины, °С;

u – влажность древесины;

t_c – температура агента сушки, °С;

V_u – скорость циркуляции агента сушки, м/с;

l – ширина штабеля, м;

φ – относительная влажность воздуха;

ρ_0 – базисная плотность древесины, кг/м³.

Среднее квадратическое отклонение определялось по методике предложенной Е.А. Пинчевской [72, 73], на основе известных работ М.Н. Феллера [96, 97]. В основу расчета величины влажностных напряжений положена многостержневая модель доски, предложенная Б.Н. Уголевым [9, 30 - 32, 65, 76, 87, 89 - 93, 98]. Расчет проводился по методике А.Г. Гороховского [12]. По методике [12] также определялась величина коэффициента безопасности режима (B_{\min}).

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ БЕРЕЗОВЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

4.1. Вычислительный эксперимент

4.1.1. Постоянные и переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента

Постоянные и переменные факторы при проведении вычислительного эксперимента приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 - Постоянные факторы при проведении вычислительного эксперимента

№ n/n	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}).

Таким образом, вычислительный эксперимент реализуется по схеме с тремя входными и с тремя выходными параметрами (рисунок 4.1).

Таблица 4.2 - 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

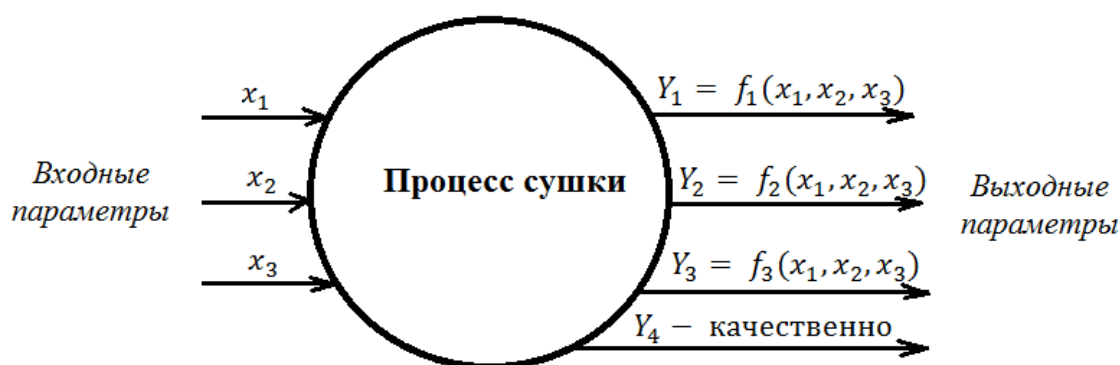


Рисунок 4.1 - Схема математического описания объекта оптимизации при реализации вычислительного эксперимента

4.1.2. Реализация вычислительного эксперимента

Вычислительный эксперимент был реализован по плану ВЗ [67, 70]. Матрица проведения эксперимента с результатами расчета выходных параметров приведена в таблице 4.3. Общий вид уравнения регрессии (функции отклика):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (4.1)$$

Расчет коэффициентов уравнения регрессии проводился по следующим формулам [67]:

- свободный член

$$b_0 = -\frac{1}{16} \sum_{u=1}^8 y_u - \frac{1}{4} \sum_{u=1}^9 y_u; \quad (4.2)$$

- коэффициент при линейных членах

$$b_i = \frac{1}{10} \sum_{u=1}^{14} x_{iu} y_u; \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.3)$$

Таблица 4.3 - Матрица проведения вычислительного эксперимента

№ п/п	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3
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

- коэффициенты при квадратических членах:

$$b_{ii} = \frac{1}{16} \sum_{u=1}^8 y_u - \frac{1}{4} \sum_{u=9}^{14} y_u + \frac{1}{2} \sum_{u=9}^{14} x_{iu}^2 \cdot y_u; \quad (4.4)$$

- коэффициенты при парных взаимодействиях:

$$b_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^8 x_{iu} \cdot x_{ju} y_{uj}. \quad (4.5)$$

При этом уравнение регрессии для конкретных выходных параметров имеют вид:

- продолжительность сушки пиломатериалов, (мин):

$$\hat{Y}_1 = 8046 + 240x_1 + 306x_2 - 1212x_3 + 52,5x_1^2 - 97,8x_2^2 - 247,8x_3^2 + 75x_1x_2 - 15x_2x_3 \quad (4.6)$$

- среднее квадратическое отклонение, %:

$$\hat{Y}_2 = 1,566 - 0,025x_1 - 0,045x_2 + 0,167x_3 + 0,018x_1^2 - 0,02x_2^2 - 0,045x_3^2 - 0,018x_1x_2 + 0,06x_1x_3 - 0,04x_2x_3; \quad (4.7)$$

- минимальное значение критерия безопасности режима:

$$\hat{Y}_3 = 1,51 + 0,02x_1 + 0,01x_2 - 0,223x_3 - 0,02x_1^2 - 0,002x_2^2 + 0,079x_3^2 + 0,0162x_1x_2 + 0,0158x_1x_3 + 0,0129x_2x_3 \quad (4.8)$$

4.1.3. Оптимизация режима сушки по результатам вычислительного эксперимента

Вначале проводилась оптимизация по каждому из выходных параметров. При этом постановка задач была следующей:

$$\begin{cases} Y_1 \rightarrow \min \\ -1 \ll x \ll 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} Y_2 \rightarrow \min \\ -1 \ll x \ll 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} Y_3 \rightarrow \max \\ -1 \ll x \ll 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

где

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

Структура данных оптимизационных режимов моделей (4.9) - (4.11) стандартна и включает в себя целевую функцию и ограничения на входные параметры. В качестве целевых функций в

каждой из моделей выступают выходные параметры эксперимента $\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_3$.

Управляющие параметры (соответственно вектор x), ограничиваются в пределах вычислительного эксперимента (от -1 до +1).

Результаты оптимизации, проведенной в математической среде MathCAD (с применением процедуры Given-Minimize), следующие:

1) Продолжительность сушки:

$$x^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_1 = 6330 \text{ мин} \quad (4.12)$$

2) Среднее квадратическое отклонение влажности сухих пиломатериалов:

$$x^* = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_2 = 1,348 \% \quad (4.13)$$

3) Минимальное значение критерия безопасности в процессе сушки:

$$x^* = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_3 = 1,763 \quad (4.14)$$

Далее значения параметров режима сушки находим путем решения компромиссной задачи методом условного центра масс [4, 14, 19, 27].

Метод заключается в следующем:

Пусть последовательно найдены значения экстремумов для каждой функции отклика

$$\hat{Y}_j^* = f_j(x_j^*), \quad (4.15)$$

Что соответствует точкам в пространстве параметров

$$x_j^* = \begin{vmatrix} x_1^{*j} \\ x_2^{*j} \\ x_3^{*j} \end{vmatrix} \quad (4.16)$$

Введем понятие условной массы точки

$$m_j = \frac{\sum_{j=1}^3 Y_j^*}{Y_j^*} \quad (4.17)$$

Будем полагать, что компромиссному решению будет удовлетворять набор параметров, соответствующих точке с координатами «условного центра масс»:

$$x_j^{**} = \frac{\sum_{j=1}^3 m_j x_j^{*j}}{\sum_{j=1}^3 m_j} \quad (4.18)$$

где $i = 1, 2, 3$.

В результате получается вектор рациональных значений параметров.

$$x^{**} = \begin{vmatrix} x_1^{**} \\ x_2^{**} \\ x_3^{**} \end{vmatrix} \quad (4.19)$$

Найденные по этому методу средневзвешенные параметры x_j^{**} учитывают не только интересы всех показателей, но и чувствительность по отношению к данному конкретному параметру.

Определим теперь по (4.17) условные массы оптимальных точек пространства параметров, соответствующих выходных параметров процесса сушки.

- Продолжительность сушки:

$$m_1 = 1,015$$

- Среднее квадратическое отклонение влажности пиломатериалов:

$$m_2 = 260,97$$

- Минимальное значение критерия безопасности в процессе сушки:

$$m_3 = 126,31$$

По (4.18) определим координаты условного центра масс:

$$x_1^{**} = -0,341$$

$$x_2^{**} = -0,310$$

$$x_3^{**} = +0,310$$

В натуральном выражении рациональные значения параметров режимов:

$$x_1^{**} = 63,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x_2^{**} = 78,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x_3^{**} = 17,62 \text{ } \%$$

При этом значения выходных параметров процесса сушки составляет:

$$T_{суш} = 135 \text{ час}$$

$$S = 1,503 \text{ } \%$$

$$B_{min} = 1,652$$

4.1.4. Анализ результатов вычислительного эксперимента на основе метода оценки эффективности режимов сушки

Для описания законов изменения параметров состояния среды в процессе сушки применим (3.12) и (3.14).

При этом величины параметров примем:

$$t_{CH} = 63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{CK} = 78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_H = 50 \text{ } \%$$

$$W_{PH} = 17,5 \text{ } \%$$

$$U_K = 8 \text{ } \%$$

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

$$t_c = 63 + 15 \frac{50 - U_T}{42} \quad (4.20)$$

$$W_p = 17,5 * e^{-0.0254(50 - U_T)} \quad (4.21)$$

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 [33].

Метод был разработан для оценки режимов сушки древесины твердолиственных пород, с точки зрения 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.

В основу метода положены подходы немецких ученых [44].

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

$$U = \frac{U_{cp}}{U_{п}} \quad (4.22)$$

где U_{cp} - средняя влажность древесины в процессе сушки, %

$U_{п}$ - влажность поверхности древесины, %

Значение показателя U комплексно характеризует режим сушки на каждой ее ступени. Х. Айхлер [44] называл величину U перепадом сушки. Он нормировал эту величину при $W = 40$ %, считая эту влажность древесины определяюще важной. В таблице 4.4 приведены рекомендуемые значения перепада сушки [44].

Как следует из данной таблицы рекомендуемый допустимый перепад для древесины березы очень невелик и составляет $U = 2,1 - 2,1$, что дополнительно свидетельствует о сложностях в организации ее сушки.

Таблица 4.4 Рекомендуемые значения перепада сушки для различных пород древесины (по Х. Айхлеру [44]).

№ п/п	Порода древесины	Предел насыщения волокна, %	Допустимый перепад при $W = 40 \%$
1.	Ель, Пихта	34 - 30	3,5 - 2,4
2.	Сосна	28 - 26	3,5 - 2,4
3.	Лиственница	28 - 26	2,8 - 2,6
4.	Тополь, Ива	35 - 32	2,6 - 2,5
5.	Липа, Ольха	38 - 32	2,5 - 2,4
6.	Береза	35 - 32	2,3 - 2,1
7.	Кедр	35 - 32	2,3 - 2,1
8.	Вишня	25 - 23	2,2 - 1,9
9.	Клен, Вяз, Груша, Яблоня	30 - 26	2,2 - 1,9
10.	Тис, Тик, Бакаут	25 - 23	2,2 - 2,0
11.	Орех грецкий	25 - 13	2,5 - 2,3
12.	Бук	32 - 32	2,0 - 1,8
13.	Махагони	35 - 32	2,0 - 1,8
14.	Ясень	35 - 25	2,0 - 1,6
15.	Граб	35 - 32	1,8 - 1,3
16.	Самшит, Гикори	35 - 32	1,8 - 1,3
17.	Дуб	25 - 23	1,6 - 1,5

Для эффективной реализации метода необходимо задать поверхностную влажность древесины $U_{\text{п}}$ в процессе сушки. Обычно данная влажность не контролируется в процессе сушки древесины. Контролируется средняя влажность древесины $U_{\text{ср}}$, так как по ее величине назначается величина текущих значений параметров режима, таких как температура и равновесная влажность среды.

Кстати, величина равновесной влажности является определяющей для величины поверхностной влажности древесины $U_{\text{п}}$.

Общий характер изменения влажности древесины при высыхании и увлажнении показан на рисунке 4.2.

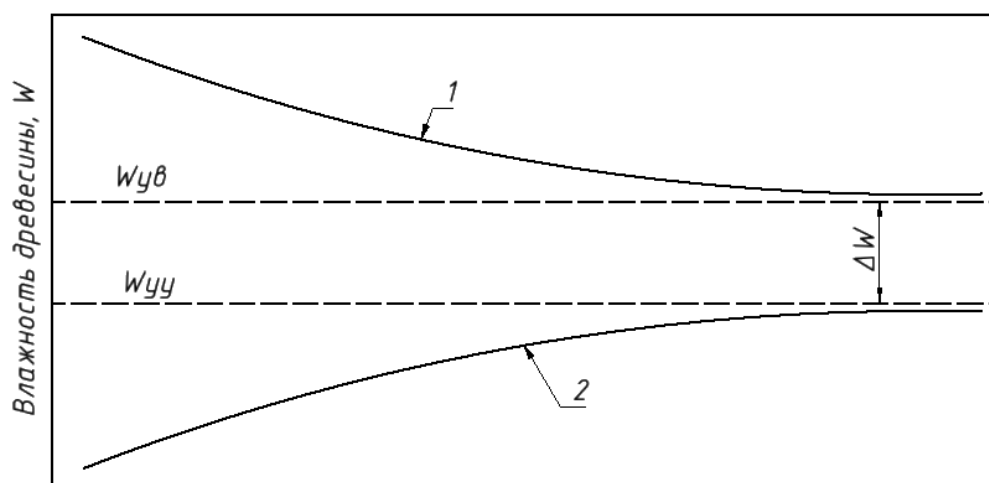


Рисунок 4.2 – Общий характер сорбции и десорбции влаги древесиной

1 – высыхание;

2 – увлажнение;

$W_{\text{ув}}$ – влажность устойчивого высыхания;

$W_{\text{уу}}$ – влажность устойчивого увлажнения;

ΔW – гистерезис влажности.

Вообще, проблемой равновесной влажности древесины, устойчивой влажности древесины при высыхании и увлажнении, изменением влажности древесины в процессе эксплуатации деревянных изделий и т.п. занимались многие ученые в 30 - 70-е годы XX века [16, 49, 54, 56, 62, 74, 79, 82, 84, 101, 107, 114, 115, 121 - 125].

Уже в те годы сложились устойчивые представления о природе гигроскопичности древесины. Микрокапилляры клеточных стенок (А.Г. Гороховский называл их нанокапиллярами [12]) имеют весьма развитую внутреннюю поверхность. При взаимодействии этой поверхности с молекулами водяного пара происходит сорбция, с последующим образованием монослоев гигроскопической влаги. Влага в этих микрокапиллярах образует вогнутые мениски, упругость водяного пара над которыми тем меньше упругости водяного пара над гладкой водной поверхностью, чем меньше радиус капилляра. При этом величина коэффициента снижения давления пара (a , следовательно, и ϕ) составляет [12]:

$$K = \frac{P}{P_{\infty}} = \exp\left(-\frac{2\delta V_{\text{ж}}}{rRT}\right), \quad (4.23)$$

где P – давление пара над мениском жидкости в капилляром радиусе r ;

$P_{\text{ж}}$ - тоже при $r_{\text{м}} \rightarrow \infty$ ($r_{\text{м}}$ - радиус мениска);

σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

$V_{\text{ж}}$ – молярный объем жидкости, м³/моль.

Конденсация водяного пара в микрокапиллярах клеточной стенки будет наблюдаться при давлении водяного пара в них меньше, чем давление пара в насыщенном влагой воздухе. При этом каждому значению относительной влажности воздуха соответствует определенный радиус микрокапилляров, то есть устойчивая величина толщины слоя гигроскопической влаги. Если фактическая величина этого слоя будет меньше устойчивой, конденсация влаги на

внутренней поверхности клеточных стенок (точнее микрокапилляров) будет продолжаться до тех пор, пока толщина слоя гигроскопической влаги не сравняется с устойчивой, а влажность древесины не станет равновесной.

При обратном процессе, когда влажность древесины больше равновесной, упругость водяного пара над мениском микрокапилляров окажется больше упругости пара в воздухе и будет иметь место переход влаги из древесины в воздух (процесс высыхания).

Точке насыщения волокна соответствует максимальная толщина слоев гигроскопической жидкости в микрокапиллярах, дальнейшее увеличение которых уже невозможно.

Известно, что равновесная влажность древесины неодинакова при различном направлении процесса [101].

Устойчивая влажность древесины при увлажнении (W_{yy}), меньше, чем при высыхании (W_{yb}). Разница между ними:

$$W_{yb} - W_{yy} = \Delta W \quad (4.24)$$

может быть названа численной характеристикой гистерезиса поглощения.

Явление гистерезиса может быть объяснено тем, что при увлажнении, стенки микрокапилляров смачиваются влагой хуже, чем при высыхании за счет частичного поглощения поверхностью капилляров молекул газов из воздуха, наравне с молекулами водяного пара.

В результате этого при одинаковом парциальном давлении водяного пара (и, следовательно, при одинаковой кривизне менисков) устойчивая толщина слоя гигроскопической влаги оказывается при увлажнении меньше, чем при высыхании, то есть устойчивая влажность W_{yy} будет меньше, чем устойчивая влажность W_{yb} .

На основании многочисленных исследований П.С. Серговский [86] приводит следующие соотношения:

$$W_{yy} = (W_p - 2,5) \pm 1,5\% \quad (4.25)$$

$$W_{yv} = W_p + 1\% \quad (4.26)$$

Таким образом, в установившемся режиме можно считать, что влажность поверхности сохнувшей древесины примерно на 1% выше, чем равновесная влажность среды.

Рассмотрим теперь, насколько эффективно применение того или иного режима сушки древесины березы с точки зрения экспресс-оценки (см. выше).

Полученные расчетом данные для текущей влажности древесины 40 % сведены в таблицу 4.5.

Если теперь мы обратимся к таблице 4.4, то 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.

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.

Таблица 4.5 - Расчетные значения перепада сушки древесины березы для различных режимов сушки

№ п/п	Наименование режима	t_{cp}	Δt	$\varphi, \%$	W_p	$W_{п}$	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; Δt – психрометрическая разность, °С; φ - относительная влажность воздуха, %;

W_p – равновесная влажность древесины, %; $W_{п}$ – влажность поверхности сохнувшей древесины, %;

U – величина перепада сушки древесины березы.

4.2. Производственные эксперименты

4.2.1. Опытные сушки в Режевском леспромхозе

Всего проведено 7 опытных сушек пиломатериалов древесины березы, характеристика которых приведена в таблице 4.6.

Как следует из таблицы 4.6 сушка, проводилась до двух значений конечной влажности

- 1) $W_1 = 8 \pm 2$ (мебельный щит)
- 2) $W_2 = 10 \pm 2$ (строганный погонаж)

Кроме того следует отличать, что сушка по режимам из нормативно-технической документации (НТД) на камеру проводилась с проведением конечных влаготеплообработок, а согласно разработанным нами режимам, назовем их экспериментальными бесступенчатыми режимами, влаготеплообработки не проводились.

По имеющимся в таблице 4.6 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 [21, 78], 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 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 [79]. Это позволило снизить влажностные напряжения и, соответственно, облегчить конечное температурно-влажностное состояние древесины, что, конечно же, привело к существенному снижению напряжений.

Все это позволяет говорить о возможности практического применения разработанного нами экспериментального бесступенчатого режима.

Таблица 4.6 - 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

4.2.2. Опытные сушки в ООО «НИКРЕС»

Всего проведено 5 опытных сушек березовых пиломатериалов толщиной 50 мм.

Основной целью данного промышленного эксперимента было установление значений разницы во времени сушки между нормативным режимом 6-B [78] 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 4.7.

Данные, приведенные в таблице 4.7, позволяют сделать следующие выводы:

1. Продолжительность сушки березовых пиломатериалов толщиной 50 мм бесступенчатым режимом значительно меньше, чем режимом 6-B.

2. Качественные показатели сушки по величине разброса конечной влажности полностью соответствуют требованиям РТМ [78] и рекомендациям, приведенным в [12].

3. Внутренние напряжения в древесине полностью соответствуют требованиям РТМ [78]. Таким образом, экспериментальный бесступенчатый режим возможно применить и на камерах среднего класса.

Таблица 4.7 - Характеристика опытных сушек

Режим 6-B			Экспериментальный бесступенчатый режим		№ сушки	Продолжитель- ность 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	$9,8 \pm 2,7$	II
конечные	77	4,5	6	6	2	152			
Нормативная продолжительность сушки 187 час.			-		3	159			
					4	148			
					5	151			
					$\tau_{ср}$, час.	154			

4.3. Техничко-экономическое обоснование предлагаемой технологии

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 те же 10 % снизить расход тепловой и электрической энергии.

Произведем ориентировочный расчет возможного снижения затрат на проведенные процессы сушки пиломатериалов из древесины березы.

Исходные значения для расчета приведены в таблице 4.8, результаты расчета – в таблице 4.9.

Расчет произведен по следующим формулам:

1. Условная экономия от снижения брака

$$\mathcal{E}_1 = \frac{Q_1 * \Pi_1 * \mathcal{C}_1}{100}, \quad (4.27)$$

где Q_1 - количество пиломатериалов, м³;

Π_1 - процент брака, %;

\mathcal{C}_1 - цена 1м³ пиломатериала, руб/м³.

Таблица 4.8 - Исходные данные для расчета условной экономии

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Величина показателя
1.	Расчетная камера	-	MGR-50
2.	Высушиваемый пиломатериал	порода	Береза
	толщина	мм	50
	ширина	мм	150 - 180
3.	Стоимость 1м ³ пиломатериала	руб/м ³	25000
4.	Снижение времени сушки при применении бесступенчатого режима	час	30
5.	Суммарная электрическая мощность приводов вентиляторов	кВт	12,0
6.	Отпускная цена электроэнергии	руб/кВт·час	6,0
7.	Тепловая мощность калориферов	Гкал/час	0,3
8.	Отпускная цена тепловой энергии	руб/Гкал	1500
9.	Разовая загрузка камеры на высушиваемом пиломатериале	м ³	54
10.	Расчетная годовая производительность камеры на существующем режиме	м ³	2000
11.	Расчетная годовая производительность на бесступенчатых режимах	м ³	2200

Таблица 4.9 - Результаты расчета суммарной экономии

№ п/п	Статья экономии	Экономия на 1 сушке (54 м ³), руб.	Экономия на 1м ³ , руб.	Экономия на годовую программу (2200 м ³), 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

2. Экономия от снижения расхода электроэнергии, руб.:

$$\mathcal{E}_2 = P_1 * \Delta\tau * C_2, \quad (4.28)$$

где P_1 - установленная мощность электродвигателей, кВт;

$\Delta\tau$ - снижение времени сушки, час;

C_2 - цена 1кВт.час электроэнергии, руб.

3. Экономия от снижения расхода тепловой энергии, руб.:

$$\mathcal{E}_3 = P_2 * \Delta\tau * C_3, \quad (4.29)$$

где P_2 – тепловая мощность калориферов, Гкал/час;

$\Delta\tau$ - снижение времени сушки, час;

C_3 - цена 1 Гкал тепловой энергии, руб.

4. Суммарная экономия, руб.:

$$\Sigma \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3, \quad (4.30)$$

Расчет показал, что при годовом объеме производства 2200 м³ (годовая производительность камеры MGR-50 при сушке бесступенчатым режимом) условная экономия составляет около 4 млн. руб.

4.5. Выводы

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

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

4.5.3. Оптимизация по частным критериям показала, что определенный набор значений управляющих факторов позволяет получить значение выходного параметра на уровне I - II категории качества РТМ - 85 [78].

4.5.4. 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.

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

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

4.5.7. Расчет экономической эффективности разработанной технологии подтвердил ее высокую эффективность. Так, при годовом объеме сушки березовых пиломатериалов 2200 м³, 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^3 около 4 млн. рублей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, В.П. А.С. СССР № 953399. Способ сушки древесины / В.П. Агапов, А.П. Калюжный / Б.И. № 31. 1982.
2. Алексеев, Е.Р. Mathcad – 12 / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова. - М.: NT Press, 2005. - 345 с.
3. Ананьин, П.И. Высокотемпературная сушка древесины / П.И. Ананьин, В.Н. Петри. - М. – Л.: Гослесбумиздат, 1963.
4. Андреев, В.Н. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе / В.Н. Андреев. - Изд. Университета Йоэнсуу, Финляндия, 1999.
5. Андропова, Н.А. Сушка и сушила для дерева / Н.А. Андропова. - М.: ОНТИ, 1936.
6. Арциховская, Н.В. Исследование влагопроводности древесины / Н.В. Арциховская // Тр. ин-та АН СССР. Т. IX. 1953.
7. Баженов, В.А. Проницаемость древесины жидкостями и ее практическое значение / В.А. Баженов. - М.: Изд-во АН СССР. 1952.
8. Богданов, Е.С. Автоматизация процессов сушки пиломатериалов. / Е.С. Богданов. – М.: Лесная промышленность, 1979.
9. Боровиков, А.М. Упругость, вязкость и пластичность древесины / А.М. Боровиков // Деревообрабатывающая промышленность, 1970. - № 9. - С. 9 - 12.
10. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. - М.: Лесная промышленность, 1989.
11. Гаврилова, Р.И. Исследование процесса сушки с переменными коэффициентами тепло- и массопереноса / Р.И. Гаврилова // Инженерно-физический журнал, 1964. - Т. VII. - № 8. - С. 37 – 42.

12. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Гороховский Александр Григорьевич. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. - 263 с.

13. Гороховский, А.Г. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.С. Агафонов // Лесной журнал, 2022. №1. С. 166 – 172.

14. Гороховский А.Г. Оптимизация процесса сушки древесины березы / / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.С. Агафонов // Деревообрабатывающая промышленность, 2024. - №1. - С. 10 – 14.

15. 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.

16. 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

17. Гороховский, А.Г. Анализ режимов сушки пиломатериалов твердолиственных пород (обзор) / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, В.В. Савина, А.С. Агафонов // Деревообрабатывающая промышленность, 2021. - №2. - С. 47 – 53.

18. Гороховский, А.Г. Исследование сушки древесины дуба трехступенчатыми режимами / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, В.В. Савина, А.С. Агафонов // Деревообрабатывающая промышленность, 2021. - №3. - С. 12 – 19.

19. 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.

20. Гороховский, А.Г. Начальный прогрев штабеля при сушке пиломатериалов без искусственного увлажнения обрабатывающей среды / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, О.А. Удачина // Деревообрабатывающая промышленность, 2005. - №6. - С. 13 - 15.

21. ГОСТ 16371 - 93. Мебель бытовая. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1993.

22. ГОСТ 16588 – 91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. - М.: Изд-во стандартов, 1992.

23. ГОСТ 19973 – 84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия. - М.: Изд-во стандартов, 1984.

24. ГОСТ 2140-81. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения. - М.: Стандартиформ, 2006.

25. ГОСТ 23431 – 79. Древесина. Строение и физико-механические свойства. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1988.

26. Доработка и экспериментальная проверка метода измерения влажности древесины по изменению параметров сушильного агента // Отчет по теме № 32.12. - № г.р. 78250024. СвердловНИИПДрев. Свердловск, 1982.

27. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выборы вариантов систем / Ю.А. Дубов. - М.: Наука, 1986.

28. Дьяконов, К.Ф. Влияние высокотемпературных режимов сушки на прочность древесины сосны / К.Ф. Дьяконов // Деревообрабатывающая промышленность, 1965. - № 1.

29. Дьяконов, К.Ф. Влияние гидротермической обработки на прочность древесины березы и лиственницы / К.Ф. Дьяконов // Деревообрабатывающая промышленность, 1967. - № 4.

30. Иванов, Ю.М. Предел пластического течения древесины / Ю.М. Иванов. - М.: Стройиздат, 1948.
31. Иванов, Ю.М. Эластическая деформация древесины / Ю.М. Иванов // Коллоидный журнал, 1957. - Вып. 3.
32. Иванов, Ю.М. Реологические параметры древесины и фанеры в условиях влажных деформаций / Ю.М. Иванов, Л.О. Лепарский // Тр. юб. науч.-техн. конф. ЦНИИМОД: Архангельск, 1968. - С. 72 - 84.
33. Катулев, А.Н. Современный синтез критериев в задачах принятия решений / А.Н. Катулев. - М.: Радио и связь, 1992.
34. Кирьянов, Д.В. Mathcad – 12 / Д.В. Кирьянов. - СПб.: БХВ – Петербург, 2005. - 576 с.
35. Коноплева, Т.М. Влагопоглощение древесины березы после гидротермической обработки / Т.М. Коноплева, Р.П. Молодцова // Деревообрабатывающая промышленность, 1966. - №2.
36. Корнилов, В. Режимы сушки / В. Корнилов // Дерево. RU, 2006. - № 3. - С. 54 – 57.
37. Красухина, Н.П. О рациональных режимах сушки березовых пиломатериалов в камерах периодического действия / Н.П. Красухина // Деревообрабатывающая промышленность, 1988. - №6. - С. 5 - 7.
38. Краткое руководство по внедрению высокотемпературных режимов. Архангельск: ЦНИИМОД, 1961.
39. Кречетов, И.В. Сушка пиломатериалов / И.В. Кречетов. - М., Гослестехиздат, 1946.
40. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. - М.-Л., Гослесбумиздат, 1949.
41. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. - М., Лесная промышленность, 1972.
42. Кротов, Л.Н. Рациональная структура режимов сушки пиломатериалов / Л.Н. Кротов // Деревообрабатывающая промышленность, 1987. - № 12. - С. 14 - 15.

43. Кротов, Л.Н. Способ сушки пиломатериалов / Л.Н. Кротов, Н.П. Толкачева, С.В. Мансуров // А.С. №1195160, Б.И. №8, 1984.
44. Лангендорф, Г. Облагораживание древесины / Г. Лангендорф, Х. Айхлер. - М.: Лесная промышленность, 1982.
45. Леонтьев, А.И. Теория тепломассообмена / А.И. Леонтьев. - М.: Высшая школа, 1979.
46. Леонтьев Н.Л. Влияние высокотемпературной сушки древесины сосны на ее физико-механические свойства / Н.Л. Леонтьев, И.В. Кречетов, Б.С. Царев, Р.П. Болденков // Деревообрабатывающая промышленность, 1957. - № 6.
47. Логинов, Л.И. Численное интегрирование с помощью неявных формул / Л.И. Логинов, П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал, 1960. - Т. VI. - № 10. - С. 93 – 108.
48. Лукаш, А.А. Комплексная переработка древесины мягких лиственных пород в материалы и изделия с улучшенными эксплуатационными свойствами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Лукаш Александр Андреевич. - Брянск: БГИТУ, 2019.
49. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А.В. Лыков. - М.: Гизлегпром, 1938. - 590 с.
50. Лыков, А.В. О предельных переходах системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал, 1973. - Т. XXIV. - № 1. - С. 152 - 155.
51. Лыков, А.В. О системах дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал, 1974. - Т. XXVI. - № 1. - С. 18 - 25.
52. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. - М.: Энергия, 1968. - 470 с.
53. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. - 465 с.

54. Лыков, А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. - М.: ГИТТЛ, 1954.
55. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 535 с.
56. Любимов, Н.Я. Теория и практика сушки дерева / Н.Я. Любимов. - М.: Гослестехиздат, 1932. - 368 с.
57. Любовецкий, П.В. Сушка древесины с цикловым прогревом / П.В. Любовецкий. - М.: Лесная промышленность, 1986.
58. Моисеев, Н.Н. Математические методы системного анализа / Н.Н. Моисеев. - М.: Наука, 1981.
59. Насобин, В.В. Лесосушильные камеры и технология сушки пиломатериалов / В.В. Насобин, В.В. Сергеев, Ю.И. Тракало: учебное пособие. - Екатеринбург, УГЛТА. - 2001.
60. Национальный атлас России. Том 1. Леса. nationalatlas.ru > tom 1/ 364-367.
61. Никитенко, Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток / Н.И. Никитенко // Киев: Наукова думка, 1971.
62. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л.М. Никитина. - М.: Энергия, 1968. - 499 с.
63. Нормативы по камерной сушке пиломатериалов. М.-Л.: Гослестехиздат, 1951.
64. Нормативы по камерной сушке пиломатериалов. М.-Л.: Гослестехиздат, 1957.
65. Огарков, Б.И. Теория упругого последействия древесины / Б.И. Огарков // Журнал технической физики, 1957. - Т. XXVII. - Вып. 5.

66. Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. - М.: Наука, 1984.

67. Пен, Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов ЦБП / Р.З. Пен. – Красноярск: Изд. Красноярского университета, 1982.

68. Петри, Л.Ф. Высокотемпературная сушка березовой, осиновой и липовой древесины среди перегретого пара при атмосферном давлении / Л.Ф. Петри // Известия вузов: Лесной журнал, 1963. - № 2. - С. 108 – 112.

69. Петри, Л.Ф. Изучение влияния переменного гигроскопического увлажнения и высушивания на влагопоглощение и прочность древесины березы и сосны, высушенной в комнатных условиях или подвергнутой высокотемпературной сушке в среде перегретого пара при атмосферном давлении / Л.Ф. Петри // Труды Уральского лесотехнического института. - Вып. 26. Сборник работ факультета механической технологии древесины. - Свердловск, 1972. - С. 91 – 96.

70. Пижурин, А.А. Исследования процессов деревообработки / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. - М.: Лесная промышленность, 1984.

71. Пижурин А.А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. - М.: Лесная промышленность, 1988.

72. Пинчевская, Е.А. Оценка качества сушки пиломатериалов с учётом изменчивости свойств материала и среды / Е.А. Пинчевская // Деревообрабатывающая промышленность, 2008. - № 4. - С. 9 - 12.

73. Пинчевская, Е.А. Прогнозирование уровня качества сушки пиломатериалов / Е.А. Пинчевская // Деревообрабатывающая промышленность, 2008. - № 3. - С. 8 - 12.

74. Пухов, А.К. Влагообмен древесины со средой в процессе конвективной сушки / А.К. Пухов // Деревообрабатывающая промышленность, 1964. - № 8. - С. 12 - 14.

75. Разработка рациональных процессов сушки заготовок лыж и тарной дощечки // Отчет по научно-исследовательской работе. - № г.р. 73045149. - Л.: ЛТА им. С.М. Кирова, 1975.

76. Ржаницын, А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени / А.Р. Ржаницын. - М.: Гостехиздат, 1949.

77. Руководящие материалы по камерной сушке пиломатериалов. Архангельск: ЦНИИМОД, 1971. - 162 с.

78. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. - Архангельск: ЦНИИМОД, 1985.

79. Савина, В.В. Повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов твёрдолиственных пород: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Савина Виктория Викторовна. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. - 140с.

80. Сергеев, В.В. Повышение эффективности сушки пиломатериалов в камерах малой мощности: дис. ... д-ра техн. наук 05.21.05 / Сергеев Валерий Васильевич. - СПб.: СПбЛТА им. С.М. Кирова, 1999.

81. Сергеев, В.В. Древесиноведение. Лесное товароведение. Основы сушки пиломатериалов: курс лекций / В.В. Сергеев, Н.П. Васильев, А.В. Солдатов. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2008.

82. Серговский, П.С. Влагопроводность древесины / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность, 1955. - № 2. - С. 3 - 8.

83. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Серговский. - М.: Лесная промышленность, 1987.

84. Серговский, П.С. Исследование влагопроводности и разработка методов расчета процессов сушки и увлажнения древесины: автореф. дис. д-ра техн. наук / Серговский Павел Семенович. - М: МЛТИ, 1953. - 42 с.

85. Серговский, П.С. О рациональных режимах сушки пиломатериалов в высокотемпературных сушилках / П.С. Серговский // Деревообрабатывающая промышленность, 1962. - № 1. - С. 4 – 8.; - № 2. - С. 2 - 6.

86. Серговский, П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины / П.С. Серговский. - М.: Гослесбумиздат, 1952.

87. Серговский, П.С. Об упруго-пластических свойствах древесины в связи с напряжениями и деформациями при ее сушке / П.С. Серговский, В.Н. Быковский, В.О. Самуйлло // Деревообрабатывающая промышленность, 1961. - № 6. - С. 3 - 6.

88. Соколов, П.В. Ускоренные способы сушки древесины / П.В. Соколов. – М. - Л.: Гослесбумиздат, 1956.

89. Уголев, Б.Н. Внутренние напряжения в древесине при ее сушке / Б.Н. Уголев. - М. – Л.: Гослесбумиздат, 1959. - 116 с.

90. Уголев, Б.Н. Метод исследования реологических свойств древесины при переменной влажности / Б.Н. Уголев // Заводская лаборатория, 1961. - № 2.

91. Уголев, Б.Н. Определение реологических показателей древесины / Б.Н. Уголев // Деревообрабатывающая промышленность, 1963. - № 2. - С. 17 - 19.

92. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов. - М.: Лесная промышленность, 1980. - 206 с.

93. Уголев, Б.Н. Исследование влияния температуры и влажности на показатели реологических свойств древесины березы / Б.Н. Уголев,

В.И. Пименова // Деревообрабатывающая промышленность, 1963. - № 6. - С. 10 - 12.

94. Удачина, О.А. Технология сушки пиломатериалов без начального увлажнения обрабатывающей среды для камер малой мощности: дис. ... канд. тех. наук 05.21.05 / Удачина Ольга Александровна. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2007.

95. Ушков, А.С. Влагоемкость древесины и фанеры / А.С. Ушков. - М.: Гослестехиздат, 1933.

96. Феллер, М.Н. Бесконечные эллиптические уравнения и операторы типа П. Леви / М.Н. Феллер // Успехи математических наук, 1986. - Т. 41. - Вып. 4 (250). - С. 97 – 140.

97. Феллер, М.Н. Учёт влияния случайного коэффициента влагопроводности и случайной начальной влажности на процесс влагопереноса при сушке пиломатериалов / М.Н. Феллер // Научно-технический прогресс в деревообрабатывающей промышленности, 1980. - С. 147 – 148.

98. Хухрянский, П.Н. Прочность древесины / П.Н. Хухрянский. - М. - Л.: Гослесбумиздат, 1955. - 152 с.

99. Цой, П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса / П.В. Цой. - М.: Эгергоатомиздат, 1984.

100. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. - Новосибирск: Наука, 1976.

101. Чулицкий, Н.Н. Исследование факторов и характеристик режимов сушки древесины / Н.Н. Чулицкий. - М., Гослестехиздат, 1934.

102. Шитова, А.Е. Влияние повышенной температуры в процессе сушки бука на его физико-механические свойства / А.Е. Шитова // Деревообрабатывающая промышленность, 1962. - № 4.

103. Шишкина, Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого

влажнопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Шишкина Елена Евгеньевна. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. - 336 с.

104. Шубин, Г.С. Исследование процесса и разработка методов расчета продолжительности высокотемпературной конвективной сушки древесины (тонких сортиментов): автореф. дис.... канд. техн. наук / Шубин Григорий Соломонович. - М.: МЛТИ, 1967.

105. Шубин, Г.С. Некоторые вопросы влажнопереноса в процессе сушки древесины / Г.С. Шубин // Известия Вузов: Лесной журнал, 1990. - № 2. - С. 57 - 60.

106. Шубин, Г.С. О влажнопереносе в древесине / Г.С. Шубин // Научные труды МЛТИ. - Вып. 149. - М.: МЛТИ, 1983. - С. 39 - 39.

107. Шубин, Г.С. О коэффициентах переноса тепла и влаги в древесине / Г.С. Шубин // Деревообрабатывающая промышленность, 1989. - № 8. - С. 10 - 13.

108. Шубин, Г.С. О механизме перемещения свободной влаги в древесине / Г.С. Шубин // Изв. вузов: Лесной журнал, 1985. - № 5. - С. 120 - 122.

109. Шубин, Г.С. Обобщенная система уравнений тепломассопереноса при переменных условиях среды и ее реализация на ЭВМ для расчета процессов сушки древесины / Г.С. Шубин // Изв. вузов: Лесной журнал, 1988. - № 3. - С. 49 - 56.

110. Шубин, Г.С. Рационализация структуры высокотемпературных режимов сушки пиломатериалов / Г.С. Шубин // Деревообрабатывающая промышленность, 1989. - № 11.

111. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины (вопросы теории, методы расчета и совершенствования технологии): дисс. ... д-ра техн. наук / Шубин Григорий Соломонович. М.: МЛТИ. 1985.

112. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. - М.: Лесная промышленность, 1990. - 336 с.

113. Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин. - М.: Лесная промышленность, 1973. – 248 с.

114. Шубин, Г.С. О влиянии породы древесины на ее равновесную влажность / Г.С. Шубин, А.В. Чемоданов // Науч. тр. М: МЛТИ, 1981. Вып. 117. - С. 61 - 66.

115. Щедрина, Э.Б. Исследование тепловых и влажностных характеристик древесины в условиях повышенных и пониженных температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Щедрина Эмма Борисовна. М.: МЛТИ, 1976. - 22 с.

116. Юсупов, К.Г. О влиянии высокотемпературных режимов сушки на механические свойства древесины / К.Г. Юсупов, В.Н. Петри // Сборник трудов СвердНИИПДрев, 1968. - Вып. 3. - С. 105 – 117.

117. Юсупов, К.Г. Сушка пиломатериалов из древесины березы, пораженной ложным ядром / К.Г. Юсупов, Г.Р. Урванов, Н.П. Князева, Ф.В. Леушина // Сборник трудов СвердНИИПДрев, 1968. - Вып. 3. - С. 100 – 105.

118. Юшков, П.П. О численном интегрировании уравнения теплопроводности в случае, когда термические коэффициенты зависят от температуры / П.П. Юшков // Инженерно-физический журнал, 1958. – Т. I. – № 9. - С. 102 – 108.

119. Egner, K. Zur trocknung Von Holzern bei. Temperaturen ii ber 100°c. / K. Egner // Holz als Roh und Werkstoff. - Jg. 9. - Nr.3. - 1951.

120. Janik, W. Handbuch der Holzrocknung / W. Janik // Facbuchverlag. - Leipzig, 1960.

121. Kollmann, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe / F. Kollmann // Bd. I. Berlin. Göttingen. – München, 1955.

122. Maku, T. Heat conduction in wood. Relation between the moisture content and the heat condution vertical to the grain / T. Maku // Wood. Res., R. Kyoto, Japan, 1951. - № 6.

123. Skaar, C.H. Water in wood / C.N. Skaar. - N. I., 1972. - P. 218.

124. Stamm, A.J. Passage of liquids and dissolved materials through softwoods / A.J. Stamm. - U. S. Dept. of Agr. Washington, 1946.

125. Wissmann, W. Über das Verhalten von Baustoffen gegen Feuchtigkeitseinwirkungen aus der umgebenden Luft: Diss. T.H. - Darmstadt, 1954.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Утверждаю

Директор ООО «НИКРЕС»

Никревич Е.С.

«2» февраля 2024г.

АКТ

производственных испытаний

г. Первоуральск

Комиссия в составе:

Васильев С.Н. – оператор сушильных установок ООО «НИКРЕС»

Гороховский А.Г. – заведующий кафедрой УТСиИТ ФГБОУ ВО УГЛТУ

Агафонов А.С. – аспирант ФГБОУ ВО УГЛТУ

Составили настоящий акт в том, что в период с 9 октября 2023 г. по 01 февраля 2024 г. были проведены производственные испытания опытной технологии сушки березовых пиломатериалов бесступенчатыми режимами.

1. Объект испытаний

Объектом производственных испытаний является технология сушки бесступенчатыми режимами, разработанная на основании исследований, проведенных кафедрой УТСиИТ ФГБОУ ВО УГЛТУ.

2. Цель и задачи

Целью производственных испытаний является подтверждение эффективности опытной технологии сушки пиломатериалов.

Задачи производственных испытаний:

- подтверждение возможности использования предложенной структуры режима для лесосушильной камеры УРАЛ-30;
- определение производственной фактической продолжительности сушки;
- определение возможных дефектов сушки и частоты их проявления.

3. Условия испытаний

- Испытания проводятся на лесосушильной камере УРАЛ-30, теплоноситель – горячая вода.
- Структура режима сушки представлена в таблице. Категория режима – мягкий.

- Материал: порода древесины – береза;
 толщина 50 мм, ширина: необрезной, длина: 6,0 м;
 начальная влажность древесины: 50 – 60 %;
 конечная влажность древесины: 10,0 %.

Таблица

Структура бесступенчатого режима сушки пиломатериалов древесины березы

Температура среды, °С		Равновесная влажность среды, %		Закон изменения равновесной влажности
Начальная	Конечная	Начальная	Конечная	
60	80	16	8	Экспонента

Примечание: промежуточные и конечные ВТО не проводились

- Формирование штабеля:
 Штабель формируется из пакетов. Пакеты собираются на прокладках, толщиной 25 мм.
- Общее количество опытных сушек: 5.
- Контроль продолжительности и качества сушки проводится согласно РТМ по технологии камерной сушки пиломатериалов.

4. Результаты испытаний

Проведенные испытания показали следующее:

4.1. Продолжительность сушки пиломатериалов:

I сушка – 177 час.;

II сушка – 152 час.;

III сушка – 159 час.;

IV сушка – 148 час.;

V сушка – 131 час.

Нормативное расчетное время сушки согласно РТМ составляет 187 час. (до конечной влажности 8 %), режим нормативный мягкий 6-В.

4.2. Дефекты сушки пиломатериалов:

- пластевые трещины – нет;

- торцовые трещины – нет;

- коробление – нет.

4.3. Показатели качества сушки:

- конечная влажность пиломатериалов ($W = 9,8 \pm 2,7 \%$);


- внутренние напряжения (по отклонениям зубцов силовых секций): I и II категория качества.

5. Заключение


Предложенная структура режима сушки эффективна и позволяет получать высокое качество сушки при продолжительности сушки меньше нормативной.

Подписи:

от ООО «НИКРЕС»

 С.Н. Васильев

от ФГБОУ УГЛТУ

 А.Г. Гороховский

 А.С. Агафонов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Акт произведенных испытаний

Мы нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что в период с 20 февраля 2024 г. по 13 марта 2024 г., в сушильном хозяйстве Режевского леспромхоза проводились производственные испытания опытно - промышленной технологии сушки пиломатериалов из древесины березы, разработанной на кафедре управления в технических системах и инновационных технологий ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ).

Испытания проведены на лесосушильной камере MGR – 50. Результаты испытаний подтвердили эффективность разработанной технологии.

От Режевского ЛПХ
Н.В. Федоровцева
Н.В. Федоровцева

От УГЛТУ
А.Г. Гороховский
А.Г. Гороховский
А.С. Агафонов
А.С. Агафонов



Утверждаю
Проректор по ИРИД

В.В. Фомин

2024 г.

Акт

о внедрении в учебный процесс на кафедре Управления в технических системах и инновационных технологий Уральского государственного лесотехнического университета разработок по проблеме
«Совершенствование технологии сушки древесины лиственных пород»

1. Проблема разрабатывалась кафедрой Управления в технических системах и инновационных технологий Уральского государственного лесотехнического университета.
2. Руководитель темы: заведующий кафедрой Управления в технических системах и инновационных технологий Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор Гороховский Александр Григорьевич.
3. Соискатель – Агафонов Артем Сергеевич.
4. Наименование разделов темы, выполненных соискателем: построение системы бесступенчатых режимов сушки пиломатериалов лиственных пород, в частности березы; моделирование и оптимизация процессов влагоудаления из древесины березы, определение экономической эффективности внедрения бесступенчатых режимов сушки.
5. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат:
 - подготовлены материалы для технологического регламента по использованию бесступенчатых режимов сушки пиломатериалов лиственных пород;

- разработано программное обеспечение для компьютерного моделирования процессов сушки пиломатериалов лиственных пород в вычислительной среде MathCAD.


6. Внедрение по курсу дисциплин: «Сушка и тепловая обработка древесины», «Гидротермическая обработка древесины», «Теория, техника и технология тепловой обработки и сушки древесины».


7. Влияние на качество подготовки специалистов: решается актуальная задача повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов лиственных пород.

8. Рекомендации – результаты исследований использовать в курсовом и дипломном проектировании выпускающей кафедры Управления в технических системах и инновационных технологий Уральского государственного лесотехнического университета.

9. Эффект от внедрения – результаты исследований опубликованы в десяти научных работах, из них в пяти изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и в одной работе в международной базе данных Web of Science.

Состав комиссии:

Директор Инженерно-технического института,
доктор технических наук, профессор  Е.Е. Шишкина

Заведующий кафедрой
Управления в технических системах
и инновационных технологий
доктор технических наук, профессор  А.Г. Гороховский

Заведующий лабораторным комплексом №4,
кандидат технических наук, доцент  А.В. Мялицин