

На правах рукописи

САВИНА Виктория Викторовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СУШКИ
ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ТВЁРДОЛИСТВЕННЫХ ПОРОД**

05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2020

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

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Комиссаров Анатолий Петрович

Гороховский Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой автоматизации и инновационных технологий

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

Исаев Сергей Петрович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства

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

Защита состоится **«24» июня 2020 г. в 13.00** на заседании диссертационного совета Д.212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401

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

Автореферат разослан «___» _____ 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Комплексное использование древесины предусматривает ее облагораживание – улучшение природных свойств. Первичным и, в то же время, важнейшим, способом облагораживания древесины является ее сушка. Некачественная или недостаточная сушка древесины неизбежно влечет за собой деформацию, коробление, трещины, образование поверхности, трудно поддающейся отделке, склеиванию и т.п. Особо это касается так называемых «трудносохнущих пород», к которым относится древесина лиственницы, а также твердолиственных пород (ТЛП): дуба, ясеня, бука и некоторых других.

В то же время процесс сушки пиломатериалов является, вероятно, одним из самых энергоемких во всей технологии деревообработки, причем затраты на сушку могут составлять 50-55% и более от стоимости сухих пиломатериалов. Для ТЛП в этом отношении ситуация еще более сложная вследствие крайне длительного процесса сушки как таковой, что связано с особенностями строения древесины. Попытки решения данной проблемы «в лоб», как правило, приводят к существенному снижению качества сушки. При этом необходимо учитывать, что проблемы энергосбережения находятся в центре внимания научно-технической политики, как России, так и всех промышленно развитых стран мира.

В этой связи создание эффективной энергосберегающей технологии сушки древесины ТЛП, является актуальной задачей, имеющей большой практический и научный интерес.

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 др.

Выполненные исследования позволили определить в отношении древесины твердолиственных пород:

- требования к качеству сушки;
- структуру и величину параметров режима сушки;
- путей энергосбережения в технологии сушки и возможностей ее интенсификации.

Наиболее перспективным направлением является применение так называемых бесступенчатых энергосберегающих режимов (БЭР).

Цель работы. Повышение эффективности и качества сушки пиломатериалов твердолиственных пород.

Объектами исследования являются технологические режимы сушки пиломатериалов.

Предметом исследования являются пиломатериалы.

Научной новизной обладают:

1. Уточнение методики моделирования процесса сушки пиломатериалов в части значений влагопереносных характеристик ТЛП.
2. Методика построения режимов сушки пиломатериалов ТЛП с заранее заданным качеством.
3. Модели процесса сушки пиломатериалов ТЛП бесступенчатыми энергосберегающими режимами.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Влагопереносные характеристики древесины дуба.
2. Расчетные модели для построения системы БЭР сушки древесины дуба.
3. Результаты экспериментальной оптимизации параметров БЭР – для сушки древесины дуба.

Достоверность сформулированных в диссертации теоретических положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов и средств научного поиска: применением теории теплообмена капиллярно-пористого тела, система автоматизированного контроля температуры и влажности древесины и агента сушки; информационных технологий с использованием вычислительной среды высокого уровня; обоснованным упрощением и корректными допущениями при разработке математических моделей; адекватностью регрессионных моделей, подтвержденной в соответствии с общепринятыми методиками; результатами производственных испытаний.

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

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

Теоретическая значимость работы заключается в уточнении расчетных значений влагопереносных характеристик древесины ТЛП, в частности дуба, а также методики формирования структуры и величины параметров БЭР сушки пиломатериалов ТЛП.

Практическое значение имеют:

1. Технологические параметры БЭР сушки пиломатериалов.
2. Программное обеспечение для компьютерного моделирования процессов сушки пиломатериалов ТЛП.

Внедрение разработанной технологии в производство позволит:

- исключить операции по проведению влаготеплообработки пиломатериалов;
- снизить расход тепловой энергии на сушку;

- обеспечить высокое качество сушки пиломатериалов.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Численные значения параметров режимов для различных категорий качества сушки ТЛП.

2. Модели процесса сушки ТЛП БЭР.

Место проведения работы. Работа выполнена на кафедре «Автоматизации инновационных технологий» Уральского государственного лесотехнического университета, промышленная апробация проведена в лаборатории сушки ОАО «УралНИИПДрев».

Апробация работы.

Основные результаты и теоретические положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и научно-практических конференциях с международным участием: на научно-технических советах ОАО «УралНИИПДрев» (г. Екатеринбург, 2005 – 2014 г.г.); Межвузовской научно-технической конференции факультета Механической технологии древесины», Екатеринбург: УГЛТУ (2005 г.); Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века», г. Екатеринбург (2012 г.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса», г. Кострома (2012 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России», г. Екатеринбург (2019 г.).

Публикации.

По результатам диссертационных исследований опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в изданиях рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus, 2 патента РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов и рекомендаций, приложений, библиографического списка, включающего 202 наименования. Общий объем работы 138 страниц, 17 рисунков, 68 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе «Состояние вопроса» проведен обзор применения режимов сушки пиломатериалов.

Исследованиями тепловых свойств древесины в различные годы занимались К.Р. Кантер, А.П. Комиссаров, Г.С. Шубин и Э.М. Щедрина, Б.С. Чудинов, Н.М. Кириллов, а среди зарубежных ученых – F. Kollmann и многие другие.

Важным является вопрос об оценке эффективности самого процесса сушки пиломатериалов. С повышением ставки НДС произошел значительный рост тарифов на тепло и электроэнергию в Российской Федерации, в связи с этим решение вопроса снижения энергоемкости продукции деревообрабатывающих предприятий (ДОП) является актуальным, так как в настоящее время доля энергетических затрат в структуре себестоимости продукции достигает 20 – 30%

Переход производственных мощностей ДОП на применение энергосберегающих технологий – является особо важным направлением в области повышения эффективности хозяйствования предприятий в рыночных условиях. По мнению ряда исследователей эффективность процесса сушки может быть оценена расходом энергии на 1 м³ пиломатериалов.

В то же время сушка древесины, в частности пиломатериалов, является продолжительным и весьма энергоемким процессом.

В российской промышленности применяется, в основном, система 3 ступенчатых режимов сушки, разработанная в СССР ещё в 70-е – 80-е годы прошлого века. Разработка этой системы происходила в несколько этапов: 10 ступенчатые режимы, 8 ступенчатые режимы, 6 ступенчатые и, наконец, 3 ступенчатые.

В современных условиях, когда автоматическое управление камерой стало нормой, режим сушки может иметь сколь угодно много ступеней, а в пределе стать просто бесступенчатым. Структура бесступенчатого режима сушки приведена на рисунке 1.

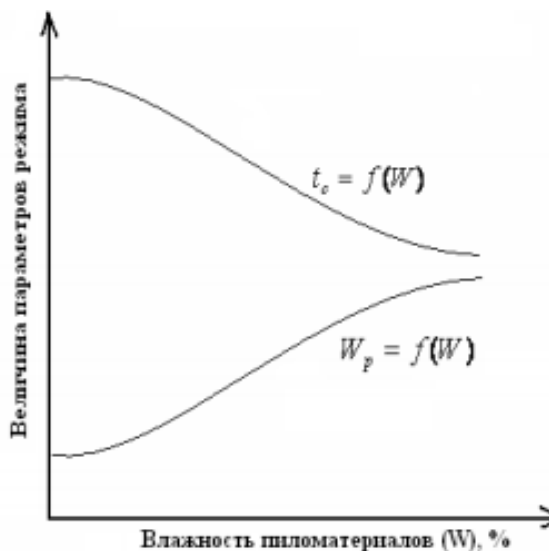


Рисунок 1 – Структура бесступенчатого режима сушки

$t_c = f(W)$ - температура среды;

$W_p = f(W)$ - равновесная влажность древесины

При этом необходимые законы изменения t_c и W_p от влажности древесины могут быть достаточно просто реализованы современными системами автоматического управления лесосушильными камерами. Следует также отметить, что строгий контроль за величиной t_c и W_p в процессе изменения

влажности древесины делает процесс влагообмена древесины со средой относительно управляемым.

Задача о повышении эффективности и качества сушки пиломатериалов может рассматриваться как оптимизационная. В то же время эффективность сушки однозначно определяется затратами энергии на сушку 1 м^3 пиломатериалов.

Таким образом, анализ состояния вопроса позволил сформулировать задачи исследования:

1. Провести теоретические исследования по моделированию влагопереноса в древесине ТЛП.
2. Провести аналитическое исследование кинетики и динамики сушки древесины ТЛП существующими режимами и бесступенчатых энергосберегающих режимов (БЭР) путем компьютерного моделирования процесса сушки
3. Провести экспериментальную проверку технологии сушки пиломатериалов ТЛП БЭР
4. Определить экономическую эффективность БЭР сушки пиломатериалов

Во втором разделе «Определение параметров теплопереноса твердолиственных пород» рассмотрены вопросы моделирования процессов теплообмена древесины в процессе ее сушки. В теории сушки древесина представлена как коллоидное капиллярно-пористое тело.

При анализе процессов взаимодействия древесины с водой Б.С. Чудинов предложил ряд моделей пористой структуры древесины с постоянными капиллярами различной формы сечения. Однако моделей для клеточной стенки с учетом ее коллоидной природы предложено не было. Такая модель была разработана А.Г. Гороховским.

В основу модели коллоидной капиллярно-пористой структуры древесины положены следующие принципы:

1. Свободная влага располагается в системе макрокапилляров, а связанная – в системе микрокапилляров.

2. Система макрокапилляров древесины моделируется следующими анатомическими элементами (таблицы 1 и 2)

- хвойные породы – ранние и поздние трахеиды;
- лиственные породы – сосуды (с учетом сердцевинных лучей) и древесные волокна.

3. Система непостоянных микрокапилляров представляет собой совокупность цилиндрических отверстий в клеточных стенках древесины, радиус которых функционально зависит от влажности древесины в гигроскопической области.

$$r_k = -8,2 \cdot 10^{-6} W^4 + 5,537 \cdot 10^{-4} W^3 - 0,013 W^2 + 0,159 W, \quad (1)$$

где W – влажность древесины, %.

4. К допущениям при моделировании относится то, что пористость клеточной стенки непропорциональна базисной плотности древесины.

5. Расчет параметров модели производится на объем древесины 1 см³ в абсолютно сухом состоянии, с площадью торца 1 см².

Таблица 1 – Содержание анатомических элементов в древесине некоторых хвойных пород

Порода	Трахеиды		Сердцевинные лучи, %	Вертикальные смоляные ходы, %	Пористость, %
	ранние, %	поздние, %			
Сосна	59 (55-65)	25 (20-30)	12	4	68,6
Лиственница	48 (45-55)	40 (35-45)	10	2	58,5

Таблица 2 – Содержание анатомических элементов в древесине некоторых лиственных пород

Порода	Сосуды, %	Древесные волокна			Древесная паренхима, %	Сердцевинные лучи, %	Пористость, %
		Сосудистые трахеиды, %	Волокнистые трахеиды, %	Волокна либриформа, %			
Береза (рассеяно-сосудистая)	25 (20-30)	12	7	39	2,0	15 (10-20)	59,5
Дуб (кольцесосудистая)	25	5	28	15	2	25	57,2

Расчет внутренней поверхности клеточной стенки для каждой породы древесины производится по формуле

$$F = 0,5\rho_6, \text{ м}^2 \quad (2)$$

где ρ_6 - базисная плотность древесины, кг/м³, которая для древесины следующих пород имеет значения: сосна – 400 кг/м³; лиственница – 550 кг/м³; береза – 500 кг/м³, дуб – 570 кг/м³.

В результате получены расчетные модели для таких параметров массопереноса как:

- коэффициент влагопроводности a_m ,
- критерий фазового превращения ϵ .

Расчетные значения не зависят от температуры и относительной влажности воздуха. Характер зависимостей показывает существенную зависимость от влажности как в пределах гигроскопической зоны, так и за ее пределами. Общий характер зависимостей соответствует виду экспериментальных кривых, полученных W. Wissmann и H. Shauss.

В третьем разделе «Общие методические положения» даны:

- методика проведения вычислительного эксперимента;
- методика экспериментальных исследований;
- методика математической обработки результатов эксперимента
- математическое моделирование по результатам многофакторных экспериментов.

Методика экспериментальных исследований разработана для сушки пиломатериалов в полупромышленной камере с принудительной циркуляцией агента сушки, установленной в лаборатории сушки ОАО «УралНИИПДрев» (таблица 3).

Для проведения сушки в камере формируется штабель шириной и высотой 2,0 м, длиной 6 м. Ряды пиломатериалов отделены друг от друга калиброванными прокладками толщиной 25 мм.

Система управления камерой позволяет реализовать любую структуру режима в пределах ее технических возможностей.

При проведении экспериментов были использованы две структуры режимов:

- нормативная (согласно РТМ);
- структура БЭР.

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

В четвертом разделе «Исследование процесса сушки пиломатериалов» проведено компьютерное моделирование процессов сушки пиломатериалов режимами различной структуры в результате, которого получено, что режимы сушки пиломатериалов, предлагаемые РТМ различных лет издания, не могут обеспечить качество сушки выше III категории качества по разбросу конечной влажности досок в штабеле, характеризуемым средним квадратическим отклонением влажности.

Эксперимент проводился на полупромышленной камере, установленной в ОАО «УралНИИПДрев».

При выборе постоянных и переменных факторов учитывались результаты исследований, проведенных ранее на данной камере.

Цель эксперимента – определение рациональных значений управляющих факторов при реализации бесступенчатых энергоэффективных режимов сушки.

В качестве основного эксперимента был реализован план типа B_3 .

Постоянные факторы при проведении экспериментов, а также их значения приведены в таблице 4.

Задача повышения показателей эффективности и качества сушки пиломатериалов может рассматриваться как оптимизационная.

Таблица 3 – Технические характеристики камеры

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1.	Объем разовой загрузки (в условном пиломатериале), м ³	14,77
2.	Система нагрева агента сушки: - тип – электрические калориферы - максимальная мощность, кВт - максимальная температура в камере, °С	45,0 95,0
3.	Количество вентиляторных узлов	3
4.	Система контроля и автоматического управления: - контроль и автоматическое регулирование температуры по сухому термометру - контроль и автоматическое управление степени насыщенности среды - контроль (и запись в непрерывном режиме) текущей влажности пиломатериалов - система оптимального управления сушкой	да да да да

Таблица 4 – Значение постоянных факторов при проведении эксперимента

№ п/п	Наименование фактора	Значение фактора
1	Порода древесины	Дуб
2	Размеры пиломатериалов - толщина - ширина - длина	40 мм 125 – 175 мм 6,0 м
3	Вид пиломатериалов	Обрезные
4	Объем загрузки камеры	15,8 м ³
5	Начальная влажность древесины	60 – 70 %
6	Конечная влажность древесины	8 %
7	Конечное значение температуры агента сушки	75 °С
8	Переходные влажности древесины для кривой равновесной влажности агента сушки: u _{п1} u _{п2}	0,1 0,35

Однако для проведения процедуры классической оптимизации необходимо наличие оптимизационной модели, включающей целевую функцию и систему ограничений, которая строится на основе математического описания объекта

оптимизации. В данной работе построение математического описания объекта оптимизации, в качестве которого рассматривался режим сушки пиломатериалов, проводилось на базе специально спланированного вычислительного эксперимента.

Предлагаемая нами система бесступенчатых режимов позволяет назначать режим сушки пиломатериалов по требуемой категории качества. С одной стороны, это увеличивает количество режимов, а с другой стороны существенно упрощает выбор.

При этом уравнения регрессии для конкретных выходных параметров имеют вид.

Продолжительность сушки до влажности $W=12\%$ (τ_1):

$$\bar{y}_1 = 24780 + 3128 \cdot x_1 + 1657 \cdot x_2 - 2747 \cdot x_3 - 2002 \cdot x_4 - 4578 \cdot x_5 + 333.636 \cdot x_1^2 + 333.636 \cdot x_2^2 + 403.636 \cdot x_3^2 + 83.636 \cdot x_4^2 + 523.636 \cdot x_5^2 + 266.25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1371 \cdot x_1 \cdot x_3 - 241.25 \cdot x_1 \cdot x_4 - 466.25 \cdot x_1 \cdot x_5 - 196.25 \cdot x_2 \cdot x_3 + 283.75 \cdot x_2 \cdot x_4 - 316.25 \cdot x_2 \cdot x_5 + 21.25 \cdot x_3 \cdot x_4 + 621.25 \cdot x_3 \cdot x_5 - 83.75 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (4)$$

Продолжительность сушки до влажности $W=7\%$ (τ_2):

$$\bar{y}_2 = 31150 + 3978 \cdot x_1 + 3814 \cdot x_2 - 4592 \cdot x_3 - 1828 \cdot x_4 - 6992 \cdot x_5 + 486.667 \cdot x_1^2 + 486.667 \cdot x_2^2 + 1437 \cdot x_3^2 + 156.667 \cdot x_4^2 + 936.667 \cdot x_5^2 + 746.25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2371 \cdot x_1 \cdot x_3 - 8.75 \cdot x_1 \cdot x_4 - 708.75 \cdot x_1 \cdot x_5 - 946.25 \cdot x_2 \cdot x_3 + 541.25 \cdot x_2 \cdot x_4 - 958.75 \cdot x_2 \cdot x_5 - 116.25 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1184 \cdot x_3 \cdot x_5 - 653.75 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (5)$$

Перепад влажности по толщине доски (S_T):

$$\bar{y}_3 = 0,057 - 3,889 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 0,016 \cdot x_2 + 0,012 \cdot x_3 - 5,556 \cdot 10^{-5} \cdot x_4 - 6,111 \cdot 10^{-7} \cdot x_5 - 3,939 \cdot 10^{-4} \cdot x_1^2 - 3,939 \cdot 10^{-4} \cdot x_2^2 - 5,894 \cdot 10^{-3} \cdot x_3^2 + 1,061 \cdot 10^{-4} \cdot x_4^2 + 1,061 \cdot 10^{-4} \cdot x_5^2 + 3,75 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 + 4,125 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_4 + 0 \cdot x_1 \cdot x_5 - 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_3 + 0 \cdot x_2 \cdot x_4 - 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_5 + 0 \cdot x_3 \cdot x_4 - 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot x_3 \cdot x_5 + 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (6)$$

Среднее квадратическое отклонение влажности (S_w)

$$\bar{y}_4 = 0,019 - 2,232 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 2,509 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 2,787 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 - 1,667 \cdot 10^{-6} \cdot x_4 + 5,803 \cdot 10^{-5} \cdot x_5 + 5,803 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 + 5,803 \cdot 10^{-5} \cdot x_2^2 - 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot x_3^2 + 5,803 \cdot 10^{-5} \cdot x_4^2 + 5,803 \cdot 10^{-5} \cdot x_5^2 - 1,061 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,261 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,875 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_4 + 1,063 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,875 \cdot 10^{-6} \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,875 \cdot 10^{-6} \cdot x_2 \cdot x_5 + 0 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,875 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,063 \cdot 10^{-5} \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (7)$$

Минимальное значение критерия безопасности режима в течение сушки (B_{\min}):

$$\bar{y}_5 = 1,626 + 0,177 \cdot x_1 + 0,55 \cdot x_2 - 0,094 \cdot x_3 + 0,072 \cdot x_4 + 0,061 \cdot x_5 + 0,017 \cdot x_1^2 + 0,014 \cdot x_2^2 - 0,03 \cdot x_3^2 + 7,879 \cdot 10^{-4} \cdot x_4^2 + 7,288 \cdot 10^{-3} \cdot x_5^2 + 0,01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,045 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,016 \cdot x_1 \cdot x_4 + 0,016 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,011 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,019 \cdot x_2 \cdot x_3 - 2,062 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_4 + 5,438 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_5 + 1,312 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,01 \cdot x_3 \cdot x_5 + 0,014 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (8)$$

Задача оптимизации для соответствующей категории качества может быть сформулирована следующим образом:

I категория качества

$$\left. \begin{array}{l} \tau_2 \rightarrow \min \\ -1 \leq x \leq 1 \\ B_{\min} \geq 1,3 \\ S_w \leq 0,01 \\ S_T \leq 0,02 \end{array} \right\} \quad (9)$$

II категория качества

$$\left. \begin{array}{l} \tau_2 \rightarrow \min \\ -1 \leq x \leq 1 \\ B_{\min} \geq 1,2 \\ S_w \leq 0,015 \\ S_T \leq 0,03 \end{array} \right\} \quad (10)$$

III категория качества

$$\left. \begin{array}{l} \tau_2 \rightarrow \min \\ -1 \leq x \leq 1 \\ B_{\min} \geq 1,2 \\ S_w \leq 0,02 \\ S_T \leq 0,035 \end{array} \right\} \quad (11)$$

Выражения (9 – 11) представляют собой оптимизационные модели, в которых в качестве критерия оптимальности (целевой функции) используется зависимость продолжительности сушки от управляющих факторов вычислительного эксперимента. Ограничения на управляющие факторы даны аналогично моделям частной оптимизации. Характерной же особенностью данных оптимизационных моделей является то, что в них присутствуют ограничения на параметры, характеризующие качество сушки. При этом величина правой части этих ограничений выбрана с учетом рекомендаций РТМ. Что же касается величины критерия безопасности режима B_{\min} , то рекомендации по выбору его соответствующих значений приведены.

Результаты оптимизации режимов сушки по требуемой категории качества, полученные с применением процедуры Given – Minimize BC Mathcad, приведены в таблице 5.

Целью экспериментальных исследований является определение рациональных значений управляющих факторов при реализации бесступенчатых энергоэффективных режимов сушки.

В качестве основного эксперимента был реализован план типа B_3 .

Функции отклика по выходным параметрам эксперимента имеют вид:

$$\hat{Y}_1 = 580 + 6,2x_1 + 3,5x_2 - 11,8x_3 + 5,7x_1^2 + 9,3x_2^2 - 16,2x_3^2 + 7,5x_1x_2 - 8,4x_1x_3 - 4,6x_2x_3 \quad (12)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,62 - 0,08x_1 + 0,065x_2 - 0,03x_3 - 0,04x_1^2 - 0,02x_2^2 - 0,01x_3^2 - 0,1x_1x_3 - 0,06x_2x_3 \quad (13)$$

$$\hat{Y}_3 = 3,28 + 0,51x_1 - 0,43x_2 - 0,15x_3 + 0,27x_1^2 + 0,58x_2^2 + 0,21x_3^2 - 0,29x_1x_2 - 0,67x_1x_3 - 0,36x_2x_3 \quad (14)$$

Таблица 5 – Результаты оптимизации режимов сушки по категориям качества

№ п/п	Управляющий фактор/критерий качества	Значения управляющих факторов/критериев оптимальности при категории качества		
		I	II	III
1	u_{pH}	0,2	0,18	0,16
2	u_{pK}	0,08	0,06	0,04
3	$u_{п1}$	0,1	0,1	0,1
4	$t_{н}, ^\circ C$	55	55	55
5	$t_{к}, ^\circ C$	75	75	75
6	τ_2 , час	636,33	530,83	427,5
7	B_{min}	2,189	1,863	1,654
8	S_T	0,02	0,027	0,037
9	S_W	0,01	0,013	0,017

Результаты вычислений интерпретированы графически на рисунках 2 – 4.

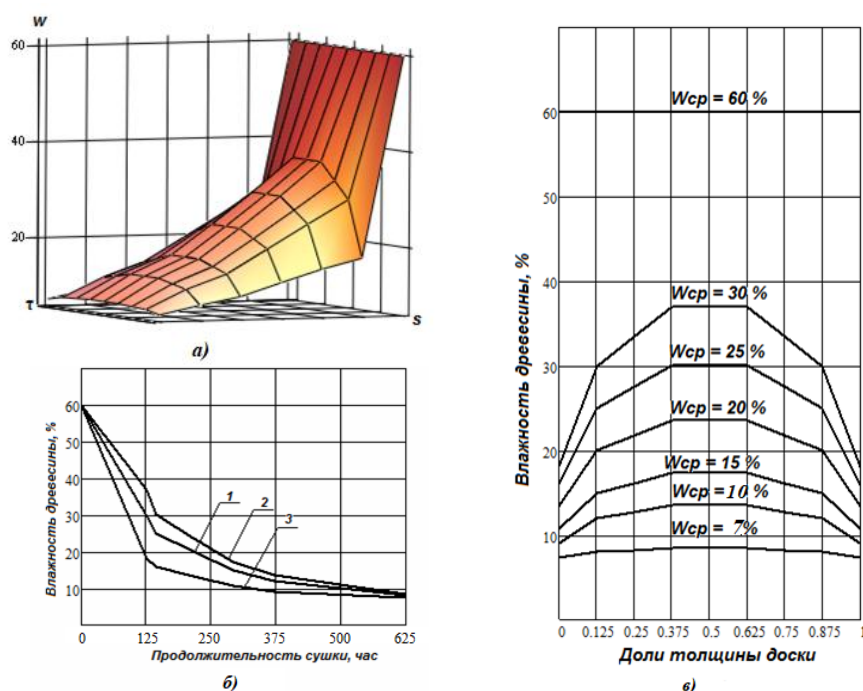


Рисунок 2 – Кинетика сушки пиломатериала дуба (1 категория качества)

- а) Распределение влажности древесины в пространстве параметров времени и толщины доски;
- б) Изменение влажности древесины во времени (1 – средняя влажность, 2 – внутренние слои, 3 – наружные слои);
- в) Распределение влажности древесины по толщине доски (для различной величины средней влажности)

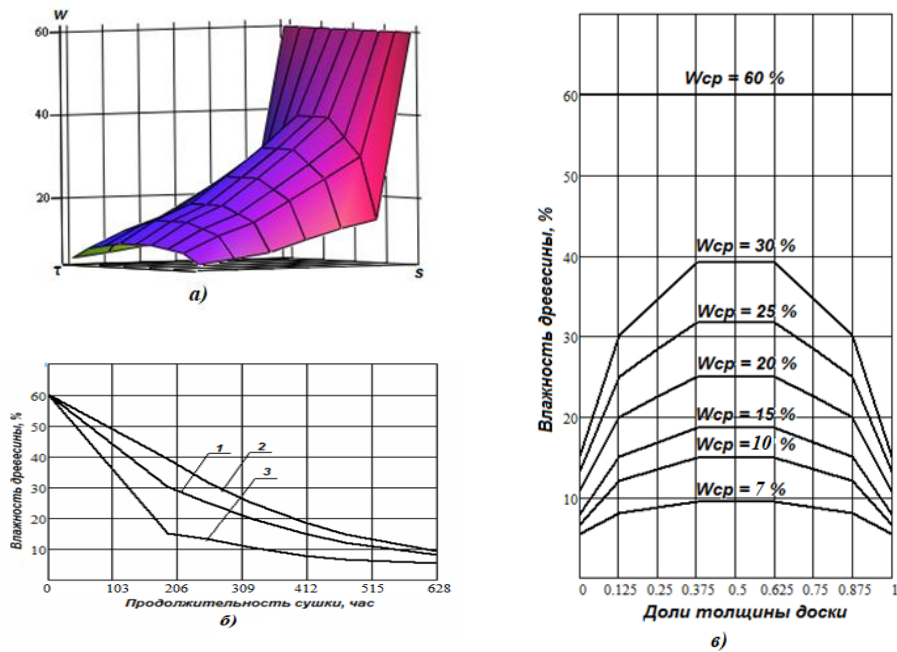


Рисунок 3 – Кинетика сушки пиломатериала дуба (2 категория качества)

- а) Распределение влажности древесины в пространстве параметров времени и толщины доски;
- б) Изменение влажности древесины во времени (1 – средняя влажность, 2 – внутренние слои, 3 – наружные слои);
- в) Распределение влажности древесины по толщине доски (для различной величины средней влажности)

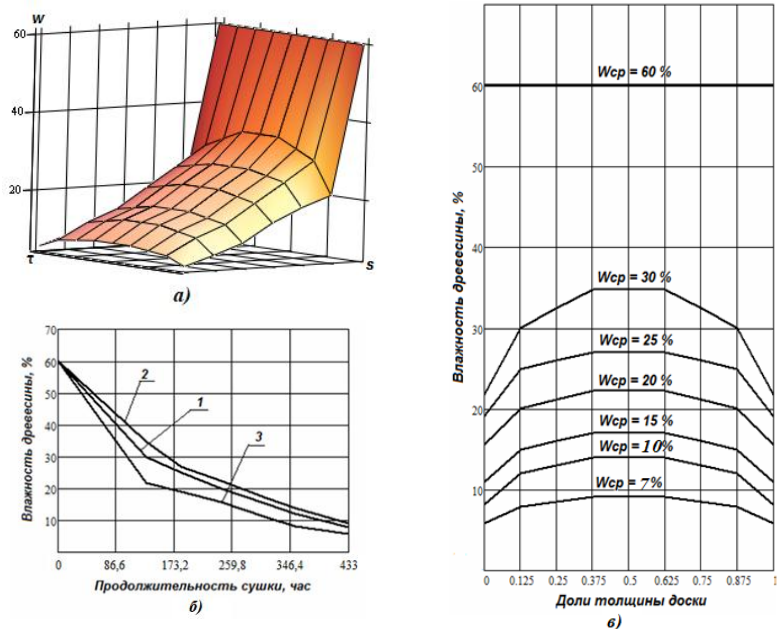


Рисунок – 4 Кинетика сушки пиломатериала дуба (3 категория качества)

- а) Распределение влажности древесины в пространстве параметров времени и толщины доски;
- б) Изменение влажности древесины во времени (1 – средняя влажность, 2 – внутренние слои, 3 – наружные слои);
- в) Распределение влажности древесины по толщине доски (для различной величины средней влажности)

Все экспериментально-статистические модели адекватны.

Внутренние напряжения в древесине после сушки во всех опытах были на уровне требований I–II категорий качества.

Оптимизация по частным критериям дала следующие результаты.

$$Y_1 = T_{\text{суш}} = 552 \text{ час};$$

$$Y_2 = S = 0,825 \text{ \%};$$

$$Y_3 = N = 5,36 \text{ ГДж/м}^3$$

При этом получили оптимальные значения управляющих факторов (таблица 6).

Таблица 6 – Оптимальные значения управляющих факторов

для $T_{\text{суш}}$	для S	для N
$u_{\text{рн}} = 0,18$	$u_{\text{рн}} = 0,16$	$u_{\text{рн}} = 0,2$
$u_{\text{рк}} = 0,07$	$u_{\text{рк}} = 0,08$	$u_{\text{рк}} = 0,06$
$t_{\text{н}} = 70^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{н}} = 60^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{н}} = 60^{\circ}\text{C}$

Решение компромиссной задачи осуществлялось методом условного центра масс.

В этом случае значения выходных параметров процесса сушки составляют:

$$T_{\text{суш}} = 620 \text{ час};$$

$$S = 0,950 \text{ \%};$$

$$N = 6,361 \text{ ГДж/м}^3$$

Для проведения сравнительного анализа полученных результатов эксперимента был проведен ряд контрольных сушек пиломатериалов по нормативным режимам. Результаты данной серии опытов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты опытных сушек нормативными режимами

Режим сушек	Количество сушек	Выходные параметры процесса*					
		Продолжительность сушки		Среднеквадратическое отклонение		Расход энергии на сушку	
		$T_{\text{ср}}$, час	S_T	$S_{\text{ср}}$, %	S_s , %	$N_{\text{ср}}$, ГДж/м ³	S_N , ГДж/м ³
6 – Б	8	620	18,3	2,67	0,53	6,1	0,56

Примечания – 1. Температура на III ступени режима была 80°C .

2. Внутренние напряжения во всех сушках соответствовали II категории качества сушки.

3. (*) – средние значения.

Полученные в результате оптимизации путём решения компромиссной задачи методом условного центра масс значения параметров режима весьма близко совпадают с полученными в главе 3 путём аналитической оптимизации параметрами режима для II категории качества (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты аналитической и экспериментальной оптимизации режимов сушки условного пиломатериала

№ п/п	Параметры режима / значения выходного параметра	Значения	
		Аналитическая оптимизация	Экспериментальная оптимизация
1	$u_{рн}$	0,185	0,173
2	$u_{рк}$	0,04	0,06
3	$t_{н}, ^\circ\text{C}$	55	63
4	$t_{к}, ^\circ\text{C}$	70	75
5	$\tau_{\text{сушки}} (W_k = 12 \%), \text{ час}$	530	620
6	$S_w, \%$ (категория качества)	1,3 (II)	0,950 (I)
7	Внутренние напряжения, МПа (категория качества)	1,376 (II)	I – II

Достаточно близко также совпадает время сушки: в эксперименте оно на 1,7 % больше, что можно отнести в первую очередь на идеализацию условий сушки в вычислительном эксперименте.

Следует отметить, что экспериментально полученные значения среднего квадратического отклонения влажности древесины существенно, почти в 1,4 раза меньше таковых, но полученных аналитически. При этом по данным эксперимента этот показатель качества сушки полностью соответствует I категории качества. Данная методика рассчитана на конечное количество ступеней режима сушки и для бесступенчатых режимов мы считали, что, гипотетически, количество ступеней было 10. Очевидно, что для повышения точности необходимо количество этих гипотетических ступеней увеличить до 20 – 25.

Кроме того, следует отметить, что также достаточно близко совпадают результаты теории и эксперимента при сушке нормативными 3-ступенчатыми режимами. Так, продолжительность сушки в эксперименте отличается от теоретической лишь на 2,5 %. Есть, как и в предыдущем случае, расхождения между теорией и экспериментом в отношении S_w . Правда, справедливости ради, следует отметить, что в данном случае эти расхождения существенно меньше и составляют порядка 10 %. Это также можно объяснить тем, что в теории и эксперименте количество ступеней режима было всё-таки одинаковым – 3.

Следует также отметить, что применение нормативных режимов, как в теории, так и на практике позволило получить качество сушки соответствующее только III категории качества.

Проведенная оценка экономической эффективности, показала, что при годовом объеме сушки 2000 м³ внедрение технологии на основе бесступенчатых энергоэффективных режимов обеспечивает экономию в размере 450 тыс. руб., в том числе за счет снижения брака около 180 тыс. руб. При этом общее снижение себестоимости сушки составляет около 20 %.

По результатам проведенных исследований процесса сушки пиломатериалов можно заключить следующее:

1. Компьютерное моделирование процессов сушки пиломатериалов из древесины дуба режимами различной структуры показало, что:

- нормализованные РТМ режимы без применения корректирующих качественные показатели процедур (промежуточные и конечные влаготеплообработки, кондиционирующая обработка) обеспечивают качество по таким показателям как среднее квадратическое отклонение влажности в штабеле и перепад влажности по толщине доски соответствующее лишь III категории качества;

- применение влаготеплообработок снижает внутренние напряжения, но не позволяет получить приемлемые значения перепада влажности древесины по толщине;

- применение БЭР сушки обеспечивает необходимые «эффективности» сушки при её приемлемой продолжительности без применения влаготеплообработок, кондиционирующей обработки и т.п.

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

3. Оптимизация БЭР по частным критериям показала, что определенный набор значений управляющих факторов позволяет получить значение параметра, характеризующего качество сушки на уровне или даже выше требований РТМ. Это в первую очередь касается таких параметров качества сушки, нормируемых РТМ как перепад влажности по толщине доски (S_T) и среднее квадратическое отклонение влажности в высушенном штабеле (S_W).

4. В то же время, применение оптимизированного по одному показателю режима сушки не может обеспечить приемлемую величину остальных показателей, характеризующих качество сушки.

5. Оптимизация БЭР, проведенная по категориям качества сушки, показала высокий потенциал подобного подхода к назначению режимов, так как полученные при этом режимы позволяют получить пиломатериалы, отвечающие определенной категории качества без проведения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки.

6. Оптимизация режимов сушки по параметрам энергоэффективности показала достаточно близкое совпадение параметров режима при оптимизации по расходу тепловой энергии и общей суммарной стоимости энергии. Однако минимальная стоимость энергии достигается при минимальном времени сушки, что объясняется существенной разницей в стоимости тепловой и электрической энергии.

7. Принципиальное отличие тепломасообмена при сушке БЭР позволяет повысить равномерность сушки (снизить перепад влажности по толщине сортамента), а также существенно снизить внутренние напряжения.

8. Лабораторный эксперимент полностью подтвердил высокую достоверность ранее проведенного вычислительного эксперимента. Результаты экспериментальной оптимизации достаточно близко совпадают с аналитической.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Применяемая до настоящего времени в производстве система трехступенчатых режимов, с современных позиций обладает целым рядом недостатков, обусловленных, главным образом, существенным перепадом величин параметров при переходе со ступени на ступень, что приводит к снижению качества сушки.
2. Современные технические средства позволяют реализовать так называемые БЭР с плавным изменением величины параметров во времени, что в значительной степени нивелирует недостатки трехступенчатых режимов, а также позволяет осуществлять непрерывное управление влагообменом древесины с обрабатываемой средой.
3. Нормативные режимы сушки древесины твердолиственных пород (без применения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки) могут обеспечивать качество сушки не выше III категории качества. Применение влаготеплообработки снижает внутренние напряжения в древесине, но не позволяет получить приемлемые величины перепада влажности древесины по толщине доски. Это связано с тем, что ступенчатое изменение величины основных параметров режима приводит к нарушениям в соотношении между внутренним и внешним влагообменом древесины.
4. Полученные путем компьютерного моделирования процесса сушки пиломатериалов из древесины дуба БЭР позволяют проводить сушку пиломатериалов, полностью отвечающих определенной категории качества без применения влаготеплообработок и кондиционирующей обработки.
5. Экспериментальная оптимизация БЭР сушки пиломатериалов древесины дуба показала достаточно близкое совпадение ее результатов с результатами компьютерного моделирования.
6. Разработанная методика формирования БЭР сушки пиломатериалов позволяет определять структуру и величины параметров режима в зависимости от требуемого качества сушки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Сергеев В.В. Моделирование процесса теплообмена / В.В. Сергеев, Е.В. Воронцов, Ю.И. Тракало, **В.В. Савина**, О.В. Кузнецова // Лесной журнал № 3. Архангельск, 2005. С. 139-144.
2. Левинский Ю.Б. Влияние подбора древесины на эксплуатационные показатели комбинированных клеёных балок / Ю.Б. Левинский, Р.И. Агафонова, **В.В. Савина** // Деревообрабатывающая промышленность № 4, 2007. С. 27 – 28.

3. Комиссаров А.П. Энерго- и ресурсосберегающая технология производства строганого шпона / А.П. Комиссаров, **В.В. Савина** // Аграрный вестник Урала №11-1. Екатеринбург, 2012. С. 47 – 48.
4. Гороховский А.Г. Физическая модель коллоидной капиллярно-пористой структуры древесины/ А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **В.В. Савина** // Хвойные бореальной зоны, № 4. Красноярск, 2018. С. 350-354.

В издании, индексируемом в Scopus:

5. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Zalesov S.V., **Savina V.V.** Computer Modelling of Nonisothermal Transfer of Moisture during Drying of Wood with the Use of the Computing Environment Mathcad // CEUR Workshop Proceedings ITTCS 2018 - Proceedings of the 5-th International Young Scientists Conference on Information Technologies, Telecommunications and Control Systems 2018.

В прочих изданиях

6. Комиссаров А.П. Новые аспекты в теории тепловой обработки древесины/ А.П. Комиссаров, **В.В. Савина** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований: – Пенза, 2009. – С.65–66.

В сборниках докладов на конференциях:

7. Тракало Ю.И. Особенности сушки-прогрева пиломатериалов/ Ю.И.Тракало, **В.В. Савина** // Материалы Межвузовской научно-технической конференции факультета Механической технологии древесины – Екатеринбург: УГЛТУ, 2005.
8. Комиссаров А.П. Повышение эффективности сушки пиломатериалов некоторых пород древесины / А.П.Комиссаров, **В.В.Савина**, Е.Р.Самаркин, Е.С.Синегубова // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII Международного Евразийского симпозиума / Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет, Уральский лесной технопарк. – Екатеринбург, 2012. – С. 109–113.
9. Комиссаров А.П. Объемная твердость как фактор регулирования процесса тепловой обработки некоторых пород древесины / А.П. Комиссаров, **В.В.Савина**, Е.Р.Самаркин // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. Кострома, 2012. – С. 33–36.
10. Гороховский А.Г. Рациональная структура режимов сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, **В.В. Савина** // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XV Всероссийской

научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО УГЛТУ. Екатеринбург, 2019. – С. 115-116.

Патенты:

11. Патент на полезную модель № RU 91417 U1 Вертикальная сушильная камера для сыпучих материалов / Семин А.Н., Комиссаров А.П., **Савина В.В.**, Тихонов В.Д. // Заявка 2009130617/22 от 10.08.2009, Опубл. 10.02.2010.
12. Патент на изобретение № RU 2557362 С2 Способ определения объемной твердости древесины / Комиссаров А.П., **Савина В.В.** // Заявка 2013150245/28 от 11.11.2013, Опубл. 20.07.2015, бюл. № 20.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать _____ 2020. Объем 1 авт.л. Заказ № ____ Тираж 100 экз.
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Отдел оперативной полиграфии.